

Aalto-yliopisto  
Insinöörیتieteiden korkeakoulu  
Energia- ja konetekniikka

## **Kandidaatintyö**

Korkean lämpötilan lämpöpumput

6.9.2024

**Rosa Heilala**

---

**Tekijä** Rosa Heilala

---

**Työn nimi** Korkean lämpötilan lämpöpumput

---

**Koulutusohjelma** Insinööritieteiden korkeakoulu

---

**Pääaine** Energia- ja konetekniikka**Pääaineen koodi** ENG4000

---

**Vastuopettaja** Kari Alanne

---

**Työn ohjaaja(t)** Timo Laukkanen, Sophia Havulinna

---

**Päivämäärä** 06.09.2024**Sivumäärä** 27**Kieli** Suomi

---

## Tiivistelmä

Suomi sekä EU ovat asettaneet tavoitteita kasvihuonepäästöjen ja energiankäytön vähentämiseksi. Teollisuuden ollessa Suomen suurin energiankuluttaja sekä energiasektorin ollessa suurin päästölähde, tarvitaan teollisuuden prosessien lämmittämiseksi uusia ratkaisuja. Tämän kandidaatintyön tavoitteena oli tarjota Suomen teollisuudelle tietoa keinosta vähentää kasvihuonepäästöjä sekä energiankulutusta ja antaa ratkaisu hukkalämmön tehokkaampaan hyödyntämiseen. Korkean lämpötilan lämpöpumpuilla on suurta potentiaalia korvaamaan entisiä lämmitysratkaisuja. Työ toteutettiin kirjallisuustutkimuksena.

Korkean lämpötilan lämpöpumpuilla tarkoitetaan lämpöpumppuja, joilla voidaan tuottaa yli 90 °C:n lämpötiloja. Lämpöpumpputeknologioista kompressorilämpöpumpulla on eniten sovelluskohteita. Metsä- kemian- ja elintarviketeollisuudessa on eniten potentiaalia korkean lämpötilan lämpöpumpuille hukkalämmön määrän sekä sopivien lämpötilojen vuoksi. Sopivia sovelluskohteita ovat esimerkiksi sahatavaran, muotoonpuristetun kuidun ja paperin kuivaus, tislauk, sumukuivaus, sterilointi ja makkaran kypsennys/savustusprosessi. Etenkin kompressoreiden ja kylmäaineiden kehitys on mahdollistanut korkeiden lämpötilojen saavuttamisen, ja nykyisellä teknologialla voidaan saavuttaa jopa 250 °C:n lämpötila.

Korkean lämpötilan lämpöpumpuilla on merkittävä rooli teollisuuden energiankäytön sekä kasvihuonepäästöjen vähentämisessä. Kehityksen ollessa nopeaa, myös mahdolliset sovelluskohteet laajenevat. Edellä mainittujen sovelluskohteiden lisäksi korkean lämpötilan lämpöpumppuja voidaan käyttää myös muilla teollisuudenaloilla ja muissa prosesseissa. Soveltuvuuden arvioimiseksi tiettyyn prosessiin on kuitenkin tehtävä tarkempi selvitys muun muassa prosessin lämpövirroista sekä lämpöpumpun sijoittamisen taloudellisesta kannattavuudesta.

---

**Avainsanat** lämpöpumppu, energiatehokkuus, teollisuus, sähköistyminen

---

# Sisällysluettelo

1 Johdanto.....	1
2 Lämpöpumput.....	2
2.1 Toimintaperiaate.....	2
2.2 Lämpöpumpputyypit .....	2
2.2.1 Avoin kierto.....	3
2.2.2 Suljettu kierto .....	4
2.3 Tehokkuus .....	6
3 Korkean lämpötilan lämpöpumput .....	7
3.1 Kierto-prosessit.....	7
3.2 Komponentit .....	9
3.3 Kylmäaineet.....	10
3.4 Höyryntuotanto.....	13
3.5 Markkinatilanne.....	15
4 Sovelluskohteet teollisuudessa .....	16
4.1 Mahdolliset sovelluskohteet .....	16
4.1.1 Metsäteollisuus .....	17
4.1.2 Kemianteollisuus .....	18
4.1.3 Elintarviketeollisuus .....	18
4.2 Integrointi järjestelmään .....	20
4.3 Haasteet .....	21
5 Johtopäätökset .....	22
Lähdeluettelo .....	24

# 1 Johdanto

Ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi Suomi on sitoutunut yhdessä EU:n kanssa vähentämään kasvihuonepäästöjä. Suomen tavoitteena on vähentää päästöjen määrää 60 % vuoden 1990 tasolta vuoteen 2030 mennessä sekä saavuttaa hiilineutraalius vuoteen 2035 mennessä. (Ympäristöministeriö, 2024.) Lisäksi Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin 2023/1791 mukaan EU:n jäsenvaltioiden tulisi vuoteen 2030 mennessä vähentää loppuenergiankulutusta vähintään 11,7 % vuoden 2020 viiteskenaarion ennusteista. Vuonna 2022 energiassektori aiheutti päästöjä lähes 33 miljoonaa tonnia CO<sub>2</sub>-ekv. aiheuttaen noin 72 % Suomen päästöistä. (Tilastokeskus, 2023.) Teollisuuden osuus energiankulutuksesta oli 44,1 % (Tilastokeskus, 2024).

Tilojen ja veden lämmittämisen lisäksi merkittävä osuus teollisuudessa käytettävästä energiasta kuluu erilaisten prosessien lämmittämiseen. Useat prosessit, kuten valkaisu, kuivaus ja tislauk, vaativat korkeita, yli 80 °C:n lämpötiloja. (Arpagaus ym., 2018.) Suomessa näiden lämpötilojen saavuttamiseen käytetään edelleen huomattavia määriä fossiilisia polttoaineita, ja suurimmat kuluttajat ovat metalli-, kemian- ja metsäteollisuus (Motiva, 2024).

Yksi vaihtoehto fossiilisille polttoaineille on korkean lämpötilan lämpöpumppujen käyttö. Korkean lämpötilan lämpöpumpuilla tarkoitetaan lämpöpumppuja, joilla voidaan tuottaa yli 90 °C:n lämpötiloja. Koska lämpöpumput hyödyntävät teollisuudessa syntyvää hukkalämpöä, ne parantavat samalla teollisuuden energiatehokkuutta. Lisäksi niitä voidaan käyttää kaukolämmön tuottamiseen. (Motiva, 2024.)

Korkean lämpötilan lämpöpumpuilla voidaan siis saavuttaa merkittäviä energiasäästöjä sekä päästövähennyksiä, mikä auttaa Suomea saavuttamaan ilmastopoliittiset tavoitteensa. Suomessa sähkön ja kaasun välinen hintasuhde vuosien 2016–2020 keskiarvona oli 1,25, mikä tekee lämpöpumppuinvestoinnista houkuttelevan (IEA Annex, 2023). Korkean lämpötilan lämpöpumppujen käyttö Suomessa on kuitenkin vielä melko vähäistä (Motiva, 2024).

Tämän työn tavoitteena on tarjota Suomen teollisuudelle tietoa keinosta vähentää energiankulutusta sekä kasvihuonepäästöjä ja antaa ratkaisu hukkalämmön tehokkaampaan hyödyntämiseen. Erityisesti keskitytään suljetun kierron kompressorilämpöpumppuihin, jotka ovat teollisuuden yleisimpiä lämpöpumpputyyppejä (Arpagaus ym., 2018). Työ toteutetaan kirjallisuustutkimuksena ja tutkimuskysymyksiä ovat:

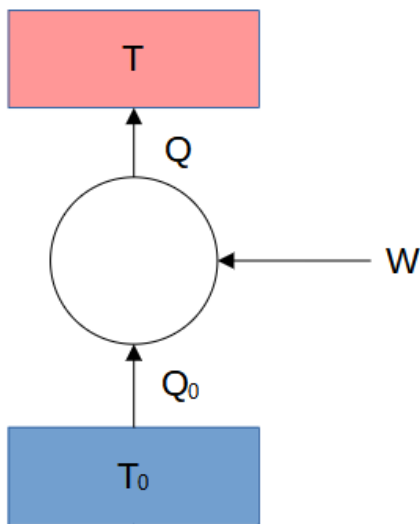
1. Millaisia korkean lämpötilan lämpöpumpputeknologioita on olemassa?
2. Mikä mahdollistaa korkeiden lämpötilojen saavuttamisen?
3. Mitä sovelluskohteita korkean lämpötilan lämpöpumpuilla on Suomen teollisuudessa?

## 2 Lämpöpumput

Tässä luvussa käsitellään lämpöpumpun toimintaperiaatetta. Lisäksi kerrotaan lämpöpumppujen luokittelusta ja erilaisista lämpöpumpputyypeistä. Lopussa käsitellään lämpöpumpun tehokkuutta kuvaavaa COP-arvoa.

### 2.1 Toimintaperiaate

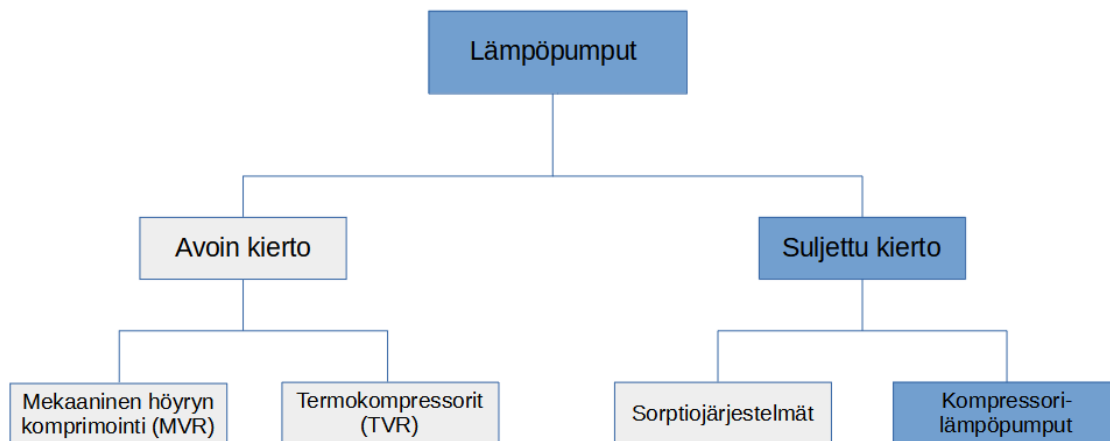
Lämpöpumput siirtävät lämpöä matalammasta lämpötilasta korkeampaan kuvan 1 mukaisesti hyödyntämällä sähkö- tai lämpöenergiaa. Tämän ansiosta voidaan hyödyntää lämpöä, joka muuten menisi hukkaan. (IEA Annex 58, 2023.) Suomessa teollisuuden potentiaalikelpoista hukkalämpöä jätetään käyttämättä noin 16 TWh vuodessa (Motiva, 2024) eli lämpöpumppujen käytöllä on teollisuudessa suuri potentiaali energiatehokkuuden lisäämisessä.



Kuva 1. Lämpöpumpun toimintaperiaate. Mukailten lähdettä (Aittomäki ym., 2008, s. 5).

### 2.2 Lämpöpumpputyypit

Lämpöpumput voidaan kuvan 2 mukaisesti jakaa avoimen ja suljetun kierron lämpöpumppuihin. Avoimen kierron lämpöpumpuissa sekä energiaa että ainetta siirtyy lämpöpumpun ja ympäristön välillä. Tällaisia lämpöpumppuja ovat mekaaniset höyryn komprimointilaitteet eli MVR-lämmittimet (Mechanical vapor recompression) ja termokompressorit eli TVR-laitteet (Thermal vapor recompression). Suljetun kierron lämpöpumpuissa lämpöpumpun ja ympäristön välillä siirtyy vain energiaa, ja pumpun sisällä kiertävä kylmäaine siirtää lämmön kohteeseen lämmönvaihtimen avulla. Suljetun kierron lämpöpumppuja ovat kompressorilämpöpumput sekä sorptiojärjestelmät. (S. Wolf ym., 2012.)



Kuva 2. Lämpöpumppujen jaottelu. Mukailten lähdettä (Arpagaus ym., 2018).

### 2.2.1 Avoin kierto

MVR-lämmittimet käyttävät matalapaineista höyryä lämmönlähteenä ja puristavat sen mekaanisella kompressorilla korkeampaan lämpötilaan ja paineeseen. Kompressorit toimivat joko sähkö- tai polttomoottorilla. Puristettu höyry voidaan käyttää joko suoraan tai siirtää se lämmönvaihtimen avulla prosessiin (S. Wolf ym., 2012.)

S. Wolfin (2017) mukaan MVR-lämmittimillä voidaan saavuttaa korkeintaan 190 °C:n lämpötiloja ja nostaa höyryn lämpötilaa enintään 30 °C yhden kompressorivaiheen aikana. Kluten ym. (2024) mukaan S. Wolfin arviot ovat hyvin linjassa valmistajilta kerätyn datan kanssa, mutta myös korkeammat lämpötilat ovat mahdollisia. Esimerkiksi Spilling Technologies GmbH on kehittänyt MVR-lämmittimen, joka kykenee lämmittämään höyryn jopa 280 °C:seen (IEA Annex 58, 2023).

Korkean lämpötilan lisäksi MVR-lämmittimillä voidaan saavuttaa hyvin korkeita hyötysuhteita, mikä lisää energiatehokkuutta. MVR-lämmittimillä on kuitenkin korkeat investointi- ja ylläpitokustannukset, ja ne ovat herkkiä prosessin parametrien vaihtelulle. (Motiva, 2024.) Tämä voi rajoittaa niiden mahdollisia sovelluskohteita ja investoinnin kannattavuutta.

Korkeapaineista höyryä energialähteenä käyttävät TVR-laitteet nostavat korkeapaineisen höyryn lämpötilaa käyttäen ejektoria. Korkeapaineinen höyry kulkee suuttimen läpi ejektoriin sekoittuen höyrystimeltä tulevaan höyryyn. Ejektorilla höyryseos laajenee ja sen kineettinen energia muutetaan paineeksi, jolloin seoksen lämpötila nousee. Lauhduttimella höyryseos luovuttaa lämpöä kohteeseen, jolloin osa höyrystä tiivistyy nesteeksi. Höyry ja neste erotetaan toisistaan ja nestemäinen vesi poistetaan systeemistä. Tämän jälkeen höyry siirtyy höyrystimelle ja absorboi lämpöä lämmönlähteestä. (S. Wolf ym., 2012.)

S. Wolfin (2017) mukaan TVR-laitteella voidaan saavuttaa korkeintaan 150 °C:n lämpötiloja ja enintään 20 °C:n lämpötilanosto. Toisaalta Kluten ym. (2024) mukaan valmistajilta saadun datan perusteella TVR-laitteella voidaan saavuttaa jopa 350 °C:n lämpötiloja.

TVR-laitteiden ylläpitokustannukset ovat pienet (S. Wolf ym., 2012). TVR-laitteilla on kuitenkin huono hyötysuhde, mikä rajoittaa laitteen käyttömahdollisuuksia (Aittomäki ym., 2008, s. 350–351). MVR-lämmittimissä ja kompressorilämpöpumpuissa käytetyn mekaanisen kompressorin hyötysuhde on noin kolme kertaa korkeampi kuin ejektorin (Motiva, 2014).

## 2.2.2 Suljettu kierto

Energianlähteenä lämpöä käyttävät sorptiojärjestelmät voidaan jakaa absorptio- ja adsorptiolämpöpumppuihin. Absorptiolämpöpumput voidaan jakaa tyyppin 1 ja tyyppin 2 adsorptiolämpöpumppuihin.

Tyyppin 1 absorptiolämpöpumpun toiminta perustuu höyrystyvän kylmäaineen ja höyrystymättömän liuotinaineen kiertoon. Yleisimmät kiertoaineet ovat vesi-litiumbromidi ja ammoniakki-vesi. Höyrystimellä kylmäaine absorboi matalassa lämpötilassa olevaa lämpöä, minkä jälkeen se siirtyy imeyttimelle. Myös liuotinaine tuodaan keittimeltä imeyttimelle paisuntaventtiilin kautta. Imeyttimellä kylmäaine liukenee liuotinaineeseen, jolloin vapautuu lämpöä. Liuos pumpataan keittimelle, jossa kylmäaine höyrystyy korkeassa lämpötilassa olevan lämmön avulla. Lämpö voidaan tuottaa polttamalla fossiilisia polttoaineita tai hyödyntämällä hukkalämpöä. Seuraavaksi kylmäaine siirtyy lauhduttimelle, jossa se luovuttaa lämpöä. Kylmäaine siirtyy paisuntaventtiilin kautta takaisin höyrystimelle ja liuotinaine palaa paisuntaventtiilin kautta takaisin imeyttimelle. (S. Wolf ym., 2012; Aittomäki ym., 2008, s. 93.)

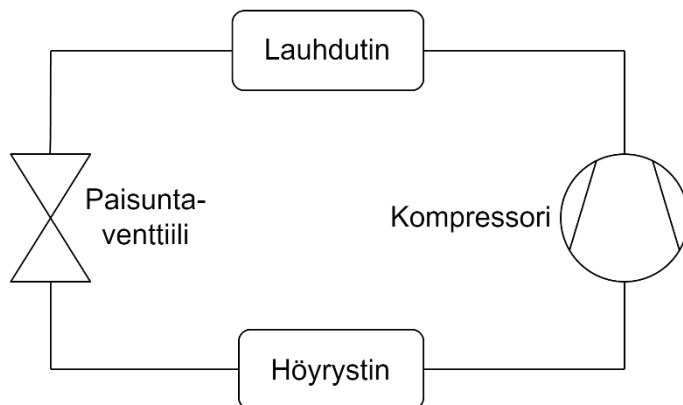
S. Wolfin (2017) mukaan tyyppin 1 absorptiolämpöpumput pystyvät tuottamaan korkeintaan 90 °C:n ja Motivan (2014) mukaan korkeintaan 95 °C:n lämpötiloja. Tämän takia ne eivät sovellu korkean lämpötilan sovelluksiin (Klute ym., 2024), eikä niitä voida hyödyntää teollisuuden korkeita lämpötiloja vaativissa prosesseissa korvaamaan fossiilisia polttoaineita.

Tyyppin 2 absorptiolämpöpumput eroavat tyyppistä 1 vain painetasoltaan (Rosenberg & Sotsil, 2017). Niillä voidaan saavuttaa jopa 230 °C:n lämpötiloja (Klute ym., 2024) ja 50 °C:n lämpötilanosto (Motiva, 2014). Ne eivät kuitenkaan ole Euroopassa yleisiä (Klute ym., 2024). Yksi absorptiolämpöpumppujen haasteista on sisäinen korroosioherkkyys (Motiva, 2014). Lisäksi käyttöä rajoittaa absorptiolämpöpumppujen vaatima korkean lämpötilatason hukkalämpö (Klute ym., 2024).

Adsorptiolämpöpumput toimivat samalla periaatteella, mutta höyrystymättömänä aineena käytetään kiinteää ainetta, jonka pintaan höyrystyvä aine sitoutuu (Aittomäki ym., 2008, s. 97–98). S. Wolfin (2017) mukaan adsorptiolämpöpumpuilla voidaan saavuttaa korkeintaan vain 55 °C:n lämpötiloja, joten ne eivät sovellu teollisuuden korkeita lämpötiloja vaativiin prosesseihin.

Kompressorilämpöpumppujen toimintaperiaate on samantyyppinen kuin MVR-lämmittimillä. Niitä voidaan kuitenkin käyttää joustavammin, koska lämmönlähteen ei tarvitse olla höyryä ja pumpun sisällä kiertää höyryn sijaan erillinen kylmäaine. Kuvassa 3 näkyvän kiertoprosessin mukaisesti kylmäaine absorboi isobaarisesti lämpöä höyrystimellä, jolloin se höyrystyy. Sähkö- tai polttomoottorisella kompressorilla se puristetaan korke-

ampaan paineeseen ja lämpötilaan. Lauhduttimella kylmäaine lauhtuu isobaarisesti nesteeksi luovuttaen lämpöä. Paisuntaventtiilillä kylmäaineen paine ja lämpötila putoavat, minkä jälkeen kylmäaine palaa takaisin höyrystimelle. (S. Wolf ym., 2012.)



Kuva 3. Kompressilämpöpumpun toimintaperiaate. Mukailten lähdettä (Sun ym., 2023).

Suurin osa valmistajista lupaa korkeintaan 160 °C:n lämpötilaista kompressorilämpöpumppua, mutta jotkut mallit pystyvät jo saavuttamaan korkeampiakin lämpötiloja (Klute ym., 2024). Esimerkiksi HoegTemp-lämpöpumpulla voidaan saavuttaa jopa 250 °C:n lämpötiloja (IEA Annex 58, 2023). Kompressorilämpöpumpulla voidaan saavuttaa korkea, jopa 90 °C:n lämpötilanosto yhden kompressorivaiheen aikana (Motiva, 2014). Kompressorilämpöpumput ovatkin hyödyllisiä, kun halutaan saavuttaa korkea lämpötilanosto (S. Wolf ym., 2012).

Lisäksi kompressorilämpöpumpun etuna on mahdollisuus sijoittaa se paikkaan, jossa lämmönlähde ja lämpönielu ovat eri sijainneissa. (S. Wolf ym., 2012.) Tämä laajentaa kompressorilämpöpumppujen mahdollisia sovelluskohteita ja tekee niistä potentiaalisia korvaamaan teollisuuden muita lämmitysjärjestelmiä. Kompressorilämpöpumpun haasteena ovat kuitenkin melko korkeat investointikustannukset (IEA Annex 35, 2014). Myös tarve riittävän suurelle ja tasaiselle hukkalämmön lähteelle voi olla esteenä kompressorilämpöpumpun hankinnalle (Motiva, 2019).

Vaikka TVR-laitteilla saadaan muita lämpöpumpputyyppejä korkeampia lämpötiloja ja MVR-lämmittimillä korkeampia hyötysuhteita, niiden sovelluskohteet teollisuudessa ovat rajalliset. Tämä johtuu niiden aiemmin mainituista lämmönlähdevaativuudesta. Niitä voidaan kuitenkin hyödyntää yhdessä muiden laitteiden kanssa tuottamaan höyryä, jota yleisesti käytetään prosessien lämmittämiseen. Etenkin MVR-lämmittintä voidaan käyttää yhdessä kompressorilämpöpumpun kanssa tuottamaan korkealämpöistä höyryä (Klute ym., 2024.)

Koska teollisuuden hukkalämpö on yleensä matalassa lämpötilassa, 30–70 °C:ssa (Arpagaus ym., 2018), sitä saadaan parhaiten hyödynnettyä kompressorilämpöpumpuilla. Lisäksi kompressorilämpöpumppuja sovelletaan huomattavasti muita lämpöpumpputyyppejä enemmän höyryn tuottamiseen. Myös tyypin 2 absorptiolämpöpumpuilla saadaan aikaiseksi korkeita lämpötiloja ja niillä voidaan tuottaa höyryä, mutta niiden markkina saatavuus Euroopassa on kompressorilämpöpumppuja huonompi. Tyypin 2 absorptiolämpöpumppujen käyttöä rajoittaa myös teollisuuden liian matalan lämpötilatason hukkalämpö. (Klute ym., 2024.)



Suomen sähköntuotanto on lähes päästötöntä (Energiateollisuus, 2024), joten käyttämällä sähköenergialla toimivaa kompressorilämpöpumppua voidaan vähentää fossiilisten polttoaineiden käyttöä ja kasvihuonepäästöjä. Tässä työssä keskitytään yli 90 °C:n lämpötiloja tuottaviin sähköenergialla toimiviin kompressorilämpöpumppuihin, joista käytetään jatkossa nimitystä korkean lämpötilan lämpöpumput.

## 2.3 Tehokkuus

Lämpöpumppujen tehokkuutta kuvaa COP-arvo (Coefficient of performance) eli lämpökerroin, joka lasketaan kaavalla:

$$COP = \frac{Q}{W}, \quad (1)$$

missä  $Q$  on lämpöpumpun tuottaman lämpöenergian määrä ja  $W$  lämpöpumpun kompressorin tekemä työ. Korkean lämpötilan lämpöpumppujen COP-arvot vaihtelevat 1,6 ja 7 välillä (Motiva, 2024). Mitä korkeampi COP-arvo on, sitä halvempaa lämpöä pystytään tuottamaan.

Ideaalinen COP-arvo lasketaan kaavalla:

$$COP_{Carnot} = \frac{T}{T-T_0}, \quad (2)$$

missä  $T_0$  on lämmönlähteen alkulämpötila ja  $T$  loppulämpötila. Todellinen COP-arvo on erilaisten arvioiden mukaan noin 35–70 % ideaalisesta COP-arvosta (Klute ym., 2024).

COP-arvoon vaikuttaa lämmönlähteen lämpötila, lämpötilanoston suuruus sekä kylmäaineen ja lämpöpumpun komponenttien ominaisuudet (Hundy ym., 2016). Mitä matalamassa lämpötilassa hukkalämpö on, sitä alemmassa paineessa kylmäaineen on oltava höyrystykseen höyrystimellä. Tämän seurauksena kompressorin on saatava aikaiseksi suurempi paine-ero, jolloin lämpöpumpun tekemä työ kasvaa, mikä pienentää COP-arvoa.

COP-arvon parantamiseen on useita menetelmiä, mutta suurin osa niistä nostaa lämpöpumpun investointikustannuksia. Lämpöpumpun tehokkuus ei olekaan tärkein kriteeri lämpöpumpun hankinnassa, vaan tärkeämpää on tuotetun lämmön kokonaishinnan suuruus. (Aittomäki ym., 2008, s. 350.) COP-arvon pitäisi kuitenkin olla suurempi kuin 1, koska muuten lämpöpumppu käyttää enemmän sähköenergiaa kuin tuottaa lämpöenergiaa. Tällöin se ei ole kilpailukykyinen verrattuna esimerkiksi sähkökattiloihin.

### 3 Korkean lämpötilan lämpöpumput

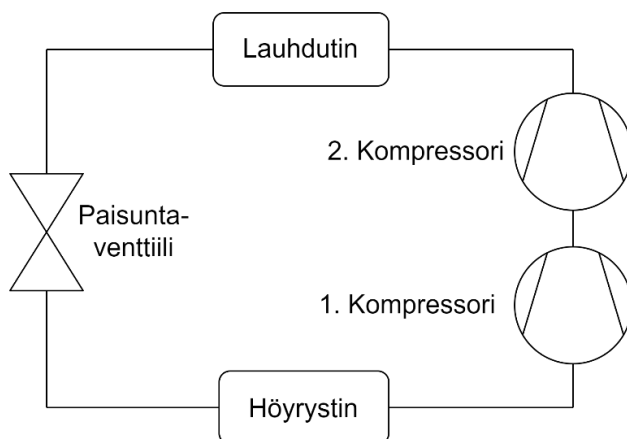
Tässä luvussa käsitellään korkean lämpötilan lämpöpumppuja ja korkean lämpötilan mahdollistavia tekijöitä. Lämpötilan nosto voidaan saavuttaa erilaisilla kiertoprosesseilla. Korkean lämpötilan saavuttamiseksi kylmäaineet ja komponentit ovat avainasemassa, koska kylmäaineen ominaisuudet määrittävät korkeimman mahdollisen lämpötilan ja lämpötilanostosta saadaan aikaiseksi kompressorin avulla. Koska useat teollisuuden prosessit vaativat höyryä (Klute ym., 2024), käsitellään myös höyryn tuotantoa korkean lämpötilan lämpöpumppujen avulla. Lisäksi kartoitetaan korkean lämpötilan lämpöpumppujen markkinatilannetta.

#### 3.1 Kiertoprosessit

Korkean lämpötilan lämpöpumput voivat toimia erilaisilla kiertoprosesseilla, joita ovat yksivaiheinen, kaksivaiheinen sekä kaskadikiertoprosessi. Näistä yksivaiheinen kierto-prosessi on yleisin, mutta kaksivaiheista sekä kaskadikiertoprosessia käytetään erityisesti suurempien lämpötilanostojen saavuttamiseksi (Jiang ym., 2022). Tämä johtuu siitä, että kompressorin paineen ja paine-eron kestoisuus vaikuttaa lämpöpumpulla saavutettavaan lämpötilaan (Aittomäki ym., 2008, s. 80).

Luvussa 2.2.2 kuvailtu yksivaiheinen kierto-prosessi on kaikista yksinkertaisin. Se ei kuitenkaan ole tehokas korkeissa lämpötilanostossa. COP-arvon parantamiseksi käytetään esimerkiksi sisäistä lämmönvaihdinta (Jiang ym., 2022.) Mateu-Royon ym. (2021) mukaan yksivaiheista kierto-prosessia on järkevä käyttää, kun lämpötilanostosta on enintään 50 °C.

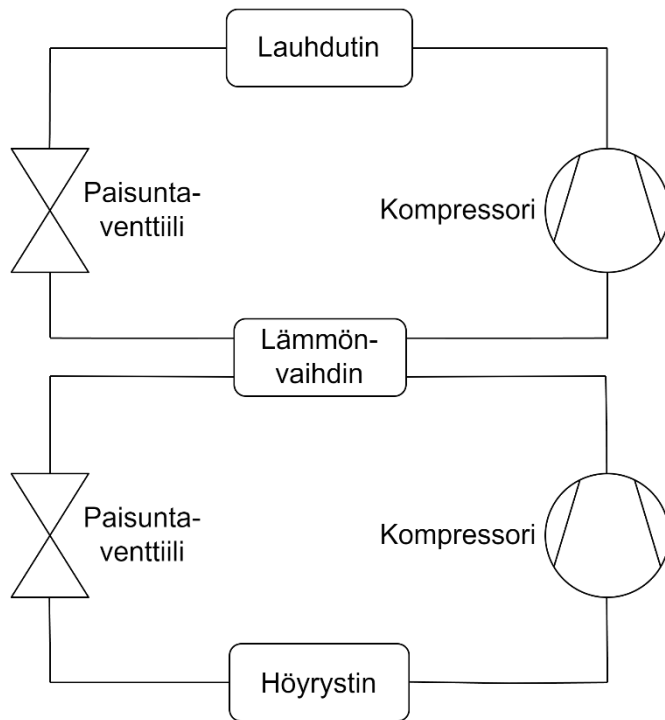
Kuvan 4 mukaisessa kaksivaiheisessa kierto-prosessissa kylmäainetta puristetaan kahdessa vaiheessa. Puristuksen ensimmäinen vaihe tehdään matalapainekompressorilla, minkä jälkeen korkeapainekompressorilla puristetaan kylmäaineen vaadittuun paineeseen. Kahden kompressorin ansiosta yhden kompressorin vaatima painesuhde pienenee, mikä parantaa lämpöpumpun COP-arvoa yksivaiheiseen kierto-prosessiin verrattuna. (Mateu-Royo ym., 2018.) Lisäksi COP-arvoa voidaan parantaa hyödyntämällä esimerkiksi sisäistä lämmönvaihdinta tai välijäähdytystä (Hundy ym., 2016).



Kuva 4. Kaksivaiheinen kierto-prosessi. Mukailten lähdettä (Sun ym., 2023).

Kaksivaiheinen kiertoprosessi soveltuu etenkin yli 60 °C:n lämpötilanostoihin (Mateu-Royo ym., 2021). Kaksivaiheisen kiertoprosessin lisäksi voidaan käyttää monivaiheista kiertoprosessia. (Hundy ym., 2016). Kaskadikiertoprosessin käyttö on kuitenkin kannattavampaa kuin monivaiheisen kiertoprosessin (Aittomäki ym., 2008, s. 81).

Kuvassa 5 näkyvää kaskadikiertoprosessia on kannattavaa käyttää, kun halutun lämpötilan saavuttamiseksi tarvitaan kolmevaiheista kiertoprosessia tai suurta kompressoria. Kaskadikiertoprosessissa on matala- ja korkealämpötilapiiri, joihin voidaan valita erilliset kylmäaineet. Lämpötilapiirit on erotettu lämmönvaihtimella, joka on korkealämpötilapiirin höyrystin ja matalalämpötilapiirin lauhdutin. (Aittomäki ym., 2008, s. 85.)



Kuva 5. Kaskadikiertoprosessi. Mukailten lähdettä (Sun ym., 2023).

Koska kaskadikiertoprosessissa yhden lämpötilapiirin täytyy saavuttaa pienempi paineen nosto, on sen COP-arvo etenkin suurissa lämpötilanostossa korkeampi kuin yksivaiheisen kiertoprosessin. Kaskadikiertoprosessin lämmöntuotto on kuitenkin pienempi verrattuna kaksivaiheiseen kiertoprosessiin, koska kaskadikiertoprosessin matalalämpötilapiiri toimii vain lämmönlähteenä korkealämpötilapiirille. (IEA Annex 58, 2023.) Sopivan kiertoprosessin valinta tulisikin tehdä tapauskohtaisesti.

Edellä mainitut prosessit voidaan suorittaa joko alikriittisesti tai transkriittisesti. Alikriittisessä prosessissa kylmäaineen paine ei ylitä kriittisen pisteen painetta. Transkriittisessä prosessissa paine ja lämpötila ylittävät kriittisen pisteen arvot. Kriittisen pisteen saavutettua kylmäaine ei voi enää lauhtua takaisin nesteeksi, vaan se jäähtyy lauhtuttimella kaasuna. Paisuntaventtiilissä paine pudotetaan kriittisen pisteen alapuolelle, jolloin osa höyrystä tiivistyy nesteeksi. (Aittomäki ym., 2008, s. 75.) Transkriittisen prosessin COP-arvo on kuitenkin matala. Usein kaksivaiheisen tai kaskadikiertoprosessin käyttäminen onkin välttämätöntä tehokkuuden parantamiseksi. (Hundy ym., 2016.)

## 3.2 Komponentit

Lämpöpumpun tärkeimmät komponentit ovat kompressori, lämmönvaihtimet sekä paisuntaventtiili. Turvallisuutta, kunnossapitoa ja säätämistä varten kuitenkin tarvitaan myös muita komponentteja, kuten erilaisia venttiileitä. (Hundy ym., 2016.) Tässä alaluvussa keskitytään kuitenkin kompressoreihin, koska ne ovat lämpöpumppujen pääkomponentti (IEA Annex 58, 2023).

Korkean lämpötilan lämpöpumpuissa käytetään tällä hetkellä pääasiassa mäntä-, kierukka-, ruuvi- ja turbokompressoria. Koska kompressori nostaa kylmäaineen painetta tekemällä työtä, sen valinnalla on merkittävä vaikutus lämpöpumpun tehokkuuteen. (IEA Annex 58, 2023.) Kompressorin valintaan vaikuttaa valittu kylmäaine, kierto-prosessi, toimintaparametrit ja lämpötilanoston suuruus. Myös lämpöpumpussa käytetyt materiaalit, voiteluaine, lämmitysteho ja apukomponentit vaikuttavat kompressorin valintaan. (El Samad ym., 2024.)

Mäntäkompressorin toiminta perustuu männän edestakaiseen liikkeeseen. Aluksi mäntä liikkuu sylinterin kannesta pois päin, jolloin sylinteriin syntyvä alipaine imee imukanavasta höyrymuodossa olevaa kylmäainetta sylinteriin. Kun höyryn virtaus sylinteriin päättyy, imuventtiilit sulkeutuvat, ja männän liike kääntyy päinvastaiseksi. Tällöin höyry puristuu pienempään tilavuuteen, jolloin sen paine ja lämpötila nousevat. Kun sylinterin paine on riittävän suuri, avautuvat paineventtiilit, ja mäntä työntää höyryn ulos. (Aittomäki ym., 2008, s. 136–137.)

Kierukkakompressorin toiminta perustuu paikallaan olevaan ja ympyräradalla liikkuvaan kierukkaan. Liikkuvan kierukan lähestyessä paikallaan olevaa, kylmäaine puristuu korkeampaan paineeseen ja lämpötilaan. (Aittomäki ym., 2008, s. 157.) Kierukkakompressorin käyttöä rajoittaa huono hyötysuhde korkeissa painesuhteissa. Tämä heikentää lämpöpumpun COP-arvoa lämpötilanoston ollessa yli 60 °C. (El Samad ym., 2024.)

Turbokompressorissa kylmäaineen painetta nostetaan lisäämällä kylmäaineen kineettistä energiaa ja muuntamalla se paineeksi. Kineettisen energian kasvattaminen tapahtuu kompressorin juoksupyörässä. Diffuusorissa kineettinen energia muutetaan paineeksi hidastamalla virtauksen nopeutta, mikä onnistuu diffuusorin virtauspoikkipinta-alaa kasvattamalla. (Aittomäki ym., 2008, s.162–164.)

Yleisimmin käytetty ruuvikompressori on kaksiroottorinen (Hundy ym., 2016). Siinä kahden rinnakkain pyörivän ruuvin ja kompressorin kuoren väliin jää puristustila, joka pienenee ruuvien pyöriessä (Aittomäki ym., 2008, s. 157). Tämä saa kylmäaineen paineen kasvamaan.

Taulukossa 1 on listattu edellä mainittujen kompressorien ominaisuuksia. Kompressorin painesuhde kertoo, kuinka suuri on kompressorissa puristetun kylmäaineen paine verrattuna paineeseen höyrystimeltä tullessa. Luku siis kertoo, kuinka suuren lämpötilanoston kompressorilla voi saada aikaiseksi. Pienin painesuhde yksivaiheiselle kompressorille saadaan aikaiseksi turbokompressorilla ja suurin ruuvikompressorilla. Turbokompressori voi saavuttaa painesuhteen 5, mäntä- ja kierukkakompressorit 10 ja ruuvikompressori jopa yli 20. Turbokompressorilla on kuitenkin muita kompressorityyppejä suurempi läm-

mityskapasiteetti. (IEA Annex 58, 2023.) Lisäksi sillä voidaan saavuttaa muita kompressorityyppejä korkeampia hyötysuhteita. Toisaalta mäntäkompressorin on kaikista yleisin kompressorityyppi yksinkertaisuuden, edullisen hinnan sekä luotettavuuden vuoksi. (El Samad ym., 2024.) Kompressorin valinta tulisi aina tehdä tapauskohtaisesti.

Taulukko 1. Kompressoreiden ominaisuuksia. Mukailten lähdettä (IEA Annex 58, 2023).

Kompressorityyppi	Mäntä	Kierukka	Ruuvi	Turbo
Painesuhde	10	10	20	5
Lämmityskapasiteetti	800 kW	400 kW	80 kW – 8 MW	80 kW – 40 MW

Kompressorin lisäksi lämmönvaihtimet ovat tärkeä osa lämpöpumppua. Lämmönvaihdin on komponentti, jonka avulla voidaan siirtää lämpöä. Höyrystimellä lämmönvaihdin siirtää lämpöä kylmäaineeseen ja lauhduttimella kylmäaineesta kohteeseen. Lämmönvaihdin toimii termodynamiikan toisen lain perusteella, eli lämpöä siirtyy korkeammasta lämpötilasta matalampaan.

Korkean lämpötilan lämpöpumpuissa käytetyt lämmönvaihtimet eivät eroa tavallisissa lämpöpumpuissa käytetyistä. Lämmönvaihtimena käytetään tyypillisesti levy-, moniputki- ja koaksiaalista kaksoisputkilämmönvaihdinta, pystysuoraa putkihöyrystintä sekä lamellihöyrystintä. (M. Wolf, 2017.)

Kylmäaineen painetta höyrystimelle sopivaksi säädetään paisuntaventtiilillä. Yleensä paineen alentaminen saavutetaan muuttamalla virtausaukon kokoa. (Hundy ym., 2016.) Pienentämällä virtausaukon kokoa, kylmäaineen virtausnopeus kasvaa, minkä seurauksena paine putoaa.

Erityisesti kompressoreiden kehitys on tärkeä osa korkean lämpötilan lämpöpumppujen kehitystä. Kompressoreiden kehittyessä kestävämpiä suurempia lämpötilanostoja ja painesuhteita höyrystimen ja lauhduttimen välillä, voidaan korkean lämpötilan lämpöpumpuilla saavuttaa entistä korkeampia lämpötiloja. (IEA Annex 58, 2023.) Myös uusia kylmäaineita voidaan ottaa laajempaan käyttöön, kun kompressorin paineen ja painesuhteen kestoisuus eivät enää ole rajoite.

Samalla lämmönvaihtimien kehitys mahdollistaa korkean lämpötilan lämpöpumppujen pienemmän koon, tehostuneen lämmönsiirron sekä pienemmät käyttökustannukset. Edellä mainittujen tekijöiden ansiosta korkean lämpötilan lämpöpumppuja voidaan käyttää laajemmalla lämpötila-alueella. (IEA Annex 58, 2023.)

### 3.3 Kylmäaineet

Kylmäaineilla on merkittävä rooli korkean lämpötilan saavuttamisessa. Kylmäaineen kriittisen lämpötilan tulisi alikriittisessä kiertoprosessissa olla tarpeeksi korkea, jotta vaadittu lämpötila saadaan aikaiseksi. Lisäksi lämpötilan nostaminen liian lähelle kriittistä pistettä lisää häviöitä ja pienentää COP-arvoa (Aittomäki ym., 2008, s. 107). Lämpöpumpun tehokkuuden varmistamiseksi lauhduttimelle saapuvan kylmäaineen lämpötilan tulisi olla noin 15 °C kriittisen pisteen alapuolella (IEA Annex 58, 2023).

Korkean lämpötilan lämpöpumpun kylmäaineen valinnassa seuraavat ominaisuudet ovat tärkeitä:

- edullinen hinta ja hyvä saatavuus
- ympäristöystävällisyys
- myrkytön, syttymätön ja syövyttämätön
- hyvä kemiallinen stabiilisuus
- korkea höyrystymislämpö
- kriittinen lämpötila ja kolmoispiste työskentelyalueen ulkopuolella
- alikriittisissä kierroissa korkea kriittinen lämpötila ( $> 150\text{ °C}$ ) ja matala kriittinen paine ( $<30\text{ bar}$ )
- tarpeeksi matalat paineet höyrystymisessä ja lauhtumisessa
- matala painesuhde kompressorilla (Hundy ym., 2016; IEA Annex 58, 2023).

Valittaessa kylmäainetta, on otsonihaitallisuutta kuvaavan eli ODP-arvon (Ozone depletion potential) sekä kasvihuonevaikutuksia kuvaavan GWP-arvon (Global warming potential) oltava mahdollisimman matalat. ODP-arvoa verrataan R11-kylmäaineen otsonihaitallisuuteen ja GWP-arvoa hiilidioksidin eli R744:n kasvihuonevaikutukseen 100 vuoden ajalta (IEA Annex 58, 2023.) Korkeasta ODP- ja GWP-arvosta luopumisen lisäksi uusia kylmäaineita on täytynyt kehittää korkeiden lämpötilojen saavuttamiseksi. Uusien kylmäaineiden kehittäminen on kuitenkin suuritöistä ja kallista, koska aineet on testattava vaadittavien ominaisuuksien osalta sekä kehittää valmistusprosessit ja rakennettava tuotantokoneistot uusille aineille (Aittomäki ym., 2008, s. 115).

Kylmäaineen turvallisuusluokitus määritetään taulukon 2 mukaisesti. Myrkyllisyysluokassa A ovat aineet, joiden sallittu työpaikkapitoisuus on yli 400 ppm ja luokassa B 400 ppm asti (Aittomäki ym., 2008, s. 106). Teollisuudessa kylmäaineen ympäristöystävällisyys on kuitenkin turvallisuutta tärkeämpi kriteeri, koska kunnossapidon ansiosta voidaan ennaltaehkäistä turvallisuusongelmat. Kylmäaineen ODP-arvon onkin oltava 0 sekä GWP-arvon mielellään alle 10 (IEA Annex 58, 2023.)

Taulukko 2. Kylmäaineiden turvallisuusluokat. Mukailten lähdettä (Aittomäki ym., 2008, s. 107).

Palavuusluokka	Myrkyllisyysluokka	
	A	B
1	A1	B1
2	A2	B2
3	A3	B3

Korkean lämpötilan lämpöpumpuissa käytettyjä kylmäaineita on listattuna taulukossa 3. Korkean lämpötilan lämpöpumpuissa käytetään etenkin kylmäaineita R245fa ja R365mfc. Korkean GWP-arvon takia näistä kylmäaineista tullaan kuitenkin luopumaan lähitulevaisuudessa. Tämän myötä luonnollisten sekä GWP-arvoltaan matalien, synteettisten kylmäaineiden käyttö tulee lisääntymään (IEA Annex 58, 2023).

Taulukko 3. Korkean lämpötilan lämpöpumpuissa käytetyt kylmäaineet. Mukailten lähettä (IEA Annex 58, 2023).

Tyyppi	Kylmäaine	Kriittinen lämpötila (°C)	Kriittinen paine (bar)	ODP	GWP	Turvallisuusluokitus
Luonnollinen	R718	373,9	220,6	0	0	A1
	R717	132,3	113,3	0	0	B2L
	R744	31	73,8	0	1	A1
HC	R601	196,6	33,7	0	5	A3
	R601a	187,8	33,8	0	4	A3
	R600	152	38	0	4	A3
	R600a	134,7	36,3	0	3	A3
HFO	R1336mzz(Z)	171,3	29	0	2	A1
	R1234ze(Z)	150,1	35,3	0	<1	A2L
	R1336mzz(E)	130,4	27,8	0	18	A1
	R1234ze(E)	109,4	36,4	0	<1	A2L
HCFO	R1233zd(E)	166,5	36,2	0,00034	1	A1
	R1224yd(Z)	155,5	33,3	0,00012	<1	A1
HFC	R245fa	154	36,5	0	858	B1
	R365mfc	186,9	32,7	0	804	A2
	R134a	101,1	40,6	0	1300	A1

Aikaisemmin mainittujen kriteerien perusteella esimerkiksi R1336mzz(Z) soveltuu hyvin kylmäaineeksi korkean lämpötilan lämpöpumpujen alikriittisissä kiertoprosesseissa. Udriun ym. (2024) tutkimuksen mukaan kylmäaine R1336mzz(Z) sopii hyvin myös transkriittiseen kiertoprosessiin. Tuloksen perusteella kylmäaineen avulla voidaan saavuttaa 250 °C:n lämpötila 120 °C:n hukkalämmöstä COP-arvolla 3,3. Lämpötilan saavuttaminen vaatii kuitenkin korkean, 120 bar, paineen lauhdutuspuolella. Myös painesuhde on korkea (17), mutta sitä voidaan pienentää esimerkiksi asentamalla kompressoreita sarjaan. Hyödyntämällä transkriittisten CO<sub>2</sub>-kiertoprosessien kehittyntä teknologiaa, 250 °C:n lämpötilan tuotto voisi olla teknisesti mahdollista. Kylmäaineen hyödyntämiseen

transkriittisessä kiertoprosessissa liittyy kuitenkin vielä haasteita. Tulevaisuudessa kompressorien ja voiteluaineiden kehittyessä kylmäaineen hyödyntäminen voi olla mahdollista myös korkeammissa lämpötiloissa.

### 3.4 Höyryntuotanto

Teollisuuden prosessien lämmittämiseen lämpötila-alueella 100–250 °C käytetään pääasiassa höyryä (Klute ym., 2024). Höyryn korkea lämpö- sekä lämmönsiirtokerroin tekevät höyrystä hyvän aineen lämmitystarkoitukseen. Nestemäiseen veteen verrattuna höyryllä on suurempi ominaisenergia, ja korkean lämpötilan saavuttamiseen vaaditaan pienempää painetta. Lisäksi höyryn lämpötila pysyy lauhtumisen aikana vakiona ja lämpötilaa on mahdollista säätää painetta muuttamalla, mikä helpottaa lämpötilan kontrollointia. (Bless ym., 2017.)

Perinteisesti höyryn tuottamiseen on käytetty maakaasua ja öljyä (Motiva, 2024). Blessin ym. (2017) toteuttamassa tutkimuksessa korkean lämpötilan lämpöpumpun energiankäyttö olisi kuitenkin muita lämmitysjärjestelmiä huomattavasti pienempää. Tutkimuksessa arvioitiin eri lämmitysjärjestelmien energiankulutusta tuottaessa 1 kg 133 °C:ssa ja 3 bar:ssa olevaa höyryä 25 °C:ssa ja 1 bar:ssa olevasta vedestä. Tulosten perusteella fossiilisia polttoaineita käyttävän kattilan energiankulutus olisi 2758 kJ ja sähköisen lämmitysjärjestelmän 2620 kJ. Kylmäaineena R601a:ta käyttävän korkean lämpötilan lämpöpumpun käyttäessä lämmönlähteenä 20 °C:sta ilmaa, energiankulutus olisi vain 1849 kJ. Lämpöpumpun kuluttama energia on kuitenkin vahvasti riippuvainen hukkalämmön lämpötilasta sekä lämpöpumpun mallista. Esimerkiksi 80 °C:sta hukkalämpöä käyttämällä korkean lämpötilan lämpöpumpun COP-arvo nousee ja energiakulutus laskee 731 kJ:een.

Lisäämällä korkean lämpötilan lämpöpumppujen käyttöä höyryntuotannossa, voidaan siis saavuttaa huomattavasti sekä energiasäästöjä että kasvihuonepäästöjen vähenemistä. Merkittävä haaste lämmitysjärjestelmän päivittämisessä on kuitenkin ollut lämpöpumppujen saavuttama liian matala lämpötila ja suppea valikoima. Korkeiden lämpötilan lämpöpumppujen kehitys on kuitenkin ollut nopeaa, ja nykyään markkinoilla on saatavilla useita erilaisia, yli 90 °C:n lämpötiloja saavuttavia lämpöpumppuja (IEA Annex 58, 2023; Motiva, 2024). Tämän hetken markkinasaatavuutta käsitellään lisää luvussa 3.5.

Vain muutamat saatavilla olevat korkean lämpötilan lämpöpumput on suunniteltu höyryn tuottamiseen. Höyryn tuottamiseen tarvitaankin usein apuvälineitä tai erilaisten teknologioiden yhdistämistä. Esimerkiksi yksi tapa tuottaa höyryä on aluksi tuottaa matalapaineista höyryä korkean lämpötilan lämpöpumpulla ja nostaa sen painetta MVR-lämmittimen avulla. (Klute ym., 2024.) Tässä alaluvussa keskitytään kuitenkin korkean lämpötilan lämpöpumppujen höyryntuototeknologioihin. Tärkeimpiä teknologioita ovat suoraan höyryä tuottavat korkean lämpötilan lämpöpumput, korkean lämpötilan lämpöpumput flash-tankilla ja korkean lämpötilan lämpöpumput höyrykompressorilla (IEA Annex 58, 2024).

Yleisin teknologioista on korkean lämpötilan lämpöpumppu, jolla höyryä tuotetaan suoraan lauhtuttimella. Höyryn laadun varmistamiseksi voidaan käyttää höyryn erotinta jäljelle jääneiden vesipisaroiden poistamiseksi. (Klute ym., 2024.) Erityisesti alikriittiset kiertoprosessit ovat tällaisissa lämpöpumpuissa sopivia. Suoraan höyryä tuottavat kor-



kean lämpötilan lämpöpumput ovat muita edullisempia ja tehokkaampia lämmönsiirrossa. Lisäksi laitteen hiilijalanjälki sekä koko ovat pienemmät kuin muissa korkean lämpötilan lämpöpumpun höyryntuottoteknologioissa. (IEA Annex 58, 2024.)

Flash-tankilla höyryä tuottavassa korkean lämpötilan lämpöpumpussa paineistettu kuuma vesi johdetaan flash-venttiilin kautta flash-tankkiin, jossa paineen pudotus saa osan vedestä höyrystymään. Höyrystyvän veden osuus on yleensä 10 % ja sen määrä riippuu paineistetun veden lämpötilasta ja flash-venttiilin jälkeisestä paineesta. Veden höyrystyttyä höyry kerätään flash-tankilta prosessin käyttöön. Tämän jälkeen nestemäinen vesi pumpataan takaisin lauhduttimelle, jossa sitä lämmitetään uudelleen. Flash-tankilla höyryä tuottavan korkean lämpötilan lämpöpumpun suurimpana etuna on, että lämpöpumpuna voidaan käyttää mitä vain kuumaa vettä tuottavaa lämpöpumppua, ja flash-tankki voidaan asentaa lämpöpumppuun jälkikäteen. Haasteena on kuitenkin suurempi hiilijalanjälki, korkeammat investointikustannukset sekä matalampi COP-arvo. (IEA Annex 58, 2024.)

Höyrykompressoria hyödyntävät korkean lämpötilan lämpöpumput nostavat höyryn painetta ja lämpötilaa höyrykompressorilla. Höyrykompressorissa voidaan käyttää vesi-injektiomenetelmää, jotta höyry pysyy kylläisenä. Höyrykompressori voidaan yhdistää kumpaan tahansa aikaisemmin mainituista höyryntuottoteknologioista. Höyrykompressorin avulla on mahdollista saavuttaa korkeampipaineista höyryä ja parempi COP-arvo kuin muilla teknologioilla. Höyrykompressorin mallista riippuen höyryn lämpötilaa voidaan yksivaiheisessa kiertoprosessissa nostaa enintään 10–60 °C. Ongelmana on kuitenkin käytetystä teknologiasta riippuva korkeampi hiilijalanjälki. (IEA Annex 58, 2024.)

### 3.5 Markkinatilanne

Korkean lämpötilan lämpöpumpuilla on useita eri valmistajia. Valikoimassa tai kehitteillä on lukuisia korkean lämpötilan lämpöpumppuja erilaisilla kylmäaineilla, kompresso-reilla, kapasiteeteilla sekä maksimilämpötiloilla. Saatavilla olevien korkean lämpötilan lämpöpumppujen kapasiteetit vaihtelevat välillä 30 kW–70 MW ja korkein saavutettu lämpötila on 250 °C kylmäaineella R704 eli heliumilla. Investointikustannusten arvioidaan olevan 150–1200 €/kW ja suuruuteen vaikuttaa lämpöpumpun kapasiteetti sekä käyttökohde. Taulukossa 4 on listattuna markkinoilla saatavilla olevista korkean lämpötilan lämpöpumpuista korkeimmat lämpötilat saavuttavat lämpöpumput. Myös höyryntuotanto on näillä mahdollista. (IEA Annex 58, 2023.) Taulukosta nähdään, että mäntäkompressorin käyttö on yleisintä korkeissa lämpötiloissa. Vaikka turbokompressorilla saavutettava painesuhde on muita kompressoreita pienempi, myös turbokompressorilla käytävällä lämpöpumpulla voidaan saavuttaa korkea, jopa 200 °C:n lämpötila.

Taulukko 4. Kaupallisesti saatavissa olevat korkeimmat lämpötilat saavuttavat korkean lämpötilan lämpöpumput. Mukaillen lähdettä (IEA Annex 58, 2023).

Valmistaja (tuote)	Kompressorit	Kylmäaine	Maksimi-lämpötila (°C)	Kapasiteetti (MW)	Hinta (€/kW)
Enerin (HoegTemp)	Mäntä	R704	250	0,3–10,0	600–800
Olvondo	Mäntä	R704	200	5,0	1200
Heaten (HeatBooster)	Mäntä, kustomoitu	HFO, HC	200	1,0–6,0	250–350
Turboden	Turbo	Sovelluskohteen mukaan, esim. HC	200	3,0–30,0	300–700
Kobelco (SGH 165)	Ruuvi	R245fa + R134a	175	0,624	-
Sustainable Process Heat (ThermBooster)	Mäntä	R1234ze, R1233zd, R1224yd, R1336mzz(E), R1336mzz(Z)	165, tulevaisuudessa 200	0,3–5,0	150–1 000

Korkean lämpötilan lämpöpumppujen valikoiman odotetaan laajenevan tulevina vuosina. Arvioiden mukaan markkinoille saapuu vuosina 2024–2025 useita korkean lämpötilan lämpöpumppuja, joilla voidaan tuottaa lämpöä 120 °C asti ja vuosina 2025–2026 160 °C asti. Vuosina 2026–2027 tätäkin korkeammat lämpötilat yleistyvät. (IEA Annex 58, 2023.)

## 4 Sovelluskohteet teollisuudessa

Korkean lämpötilan lämpöpumpuilla voidaan saavuttaa energiasäästöjä ja päästövähennyksiä useissa eri sovelluskohteissa. Vähentyneen energiankulutuksen myötä prosessien lämmittämisessä voidaan saavuttaa merkittäviä taloudellisia säästöjä. Pienentyneet kasvihuonepäästöt pienentävät tuotteen hiilijalanjälkeä, mikä voi myös lisätä asiakkaiden kiinnostusta tuotteesta.

Tässä luvussa käsitellään korkean lämpötilan lämpöpumppujen mahdollisia sovelluskohteita Suomen teollisuudessa sekä selvitetään, miten lämpöpumppu kannattaa sijoittaa järjestelmään saavuttaakseen mahdollisimman suuren energiansäästöpotentiaalin. Lisäksi pohditaan korkean lämpötilan lämpöpumpun hankintaan liittyviä haasteita.

### 4.1 Mahdolliset sovelluskohteet

Korkean lämpötilan lämpöpumput soveltuvat parhaiten energiaintensiivisiin prosesseihin, jotka vaativat suurta lämpö määrää alle 200 °C:n lämpötilassa (Marina ym., 2021). Suomessa suurimmat energian kuluttajat ovat metsä-, kemian- ja metalliteollisuus. Metalliteollisuudessa korkean lämpötilan lämpöpumppuja voidaan kuitenkin hyödyntää vain rajallisesti (Motiva, 2024).

Eniten käyttökohteita korkean lämpötilan lämpöpumpuille on metsä-, kemian- ja elintarviketeollisuudessa. Näillä sektoreilla on arvioitu korkean lämpötilan lämpöpumppujen soveltuvan korvaamaan yhteensä 1 650 GWh fossiilienergiaa vuodessa. (Motiva, 2024.) Korkean lämpötilan lämpöpumppujen potentiaalisesti hyödynnettävissä olevaa hukkalämpöä syntyi vuonna 2017 metsäteollisuudessa 7 TWh, kemianteollisuudessa 4 TWh, metallinjalostuksessa 2,5 TWh ja elintarviketeollisuudessa 2,5 TWh (Motiva, 2019). Vaikka metalliteollisuuden sovelluskohteet ovat vähäiset, voidaan hukkalämpöä hyödyntää esimerkiksi kaukolämmön tuottamiseen tai tilojen ja veden lämmittämiseen. Tässä luvussa keskitytään metsä-, kemian- ja elintarviketeollisuuden prosesseihin lämpötila-alueella >90 °C, joissa syntyy lämpöpumpun hyödyntämisen kannalta välttämätöntä hukkalämpöä.

On kuitenkin huomioitavaa, että korkean lämpötilan lämpöpumpuilla on sovelluskohteita myös monilla muilla teollisuudenaloilla. Esimerkiksi tiilien kuivatuksessa Wienerbergerissä tiilien kosteuspiitoisuutta alennetaan 30 %:sta 2–4 %:iin, mitä varten tarvitaan 110–160 °C:n lämpötiloja. Korvaamalla prosessissa käytetty maakaasulla toimiva kattila korkean lämpötilan lämpöpumpulla, tehdas onnistui saavuttamaan jopa 84 %:n energiansäästön sekä vähentämään hiilidioksidipäästöjä noin 80 %. (EHPA, 2020.)

Luvussa esitetään joitakin case-esimerkkejä. Energian hinta on noussut sekä korkean lämpötilan lämpöpumput kehittyneet case-esimerkkien toteutusvuosista, joten nykypäivän energiansäästö sekä lämpöpumppuinvestoinnin kannattavuus on todennäköisesti muuttunut. Lisäksi Suomen energiahinnat eroavat esimerkkitapauksien maiden hinnoista, joten tuloksia ei voida täysin soveltaa, kun harkitaan lämpöpumppuinvestointia suomalaisessa teollisuudessa. Myös muut tekijät, kuten tehtaan käyttöaika ja prosessin vaatima lämpötila vaihtelevat prosessikohtaisesti ja vaikuttavat lämpöpumppuinvestoinnin taloudelliseen kannattavuuteen. Ratkaisun soveltuvuudesta pitäisikin aina tehdä tarkempi prosessikohtainen selvitys.

### 4.1.1 Metsäteollisuus

Metsäteollisuus muodostuu sellu-, paperi-, kartonki-, pakkaus- ja puutuoteteollisuudesta (Metsäteollisuus ry, 2024). Metsäteollisuudessa korkean lämpötilan lämpöpumppuja voidaan käyttää kuivaukseen, keittoon, valkaisuun, liimaukseen, prässäykseen, höyrytykseen ja lakkaukseen. Nämä prosessit voidaan toteuttaa lämpötilavälillä 90–250 °C. (Arpagaus ym., 2018.) Etenkin kuivausprosesseissa on suurta potentiaalia korkean lämpötilan lämpöpuille prosessin energiantensiivisyyden vuoksi. Tässä alaluvussa esitetään korkean lämpötilan lämpöpumppujen soveltamismahdollisuuksia sahatavaran, muotoonpuristetun kuidun ja paperin kuivauksessa.

Diplomityössään Lähtenaro (2019) arvioi korkean lämpötilan lämpöpumppujen soveltuvuutta erilaisissa sahatavaran kuivausprosesseissa, joiden vaatimat lämpötilat ovat yleensä 110–120 °C. Kamarikuivaamosta ja kanavakuivaamosta korkean lämpötilan lämpöpumppu soveltuu parhaiten kanavakuivaamoon sen yleisyyden sekä tasalaatuisen lämmönlähteen ansiosta. Laskelmien mukaan lämpöpumppuinvestoinnin takaisinmaksuaika vuoden 2019 energiahinnoilla biomassaa korvatta olisi kuitenkin korkea, noin 12 vuotta, mikä olisi este lämpöpumppuinvestoinnille.

UPM Korkeakosken sahalla on kuitenkin jo otettu korkean lämpötilan lämpöpumput käyttöön sahatavaran kuivausprosessissa vuonna 2023. Aikaisemmin hyödyntämättömissä oleva hukkalämpö saadaan nostettua 55 °C:sta 90–100 °C:n lämpötilaan. Energiatehokkuuden parantamisen lisäksi lämpöpumppujen tuottaman energian ansiosta talvella voidaan lisätä tuotantoa, koska energianriittävyys ei ole enää ongelma. Lisäksi sahan käyttämää biomassaa voidaan kesäisin myydä tai hyödyntää muussa tuotannossa, sillä lämpöpumpun tuottamalla energialla voidaan vähentää biomassan tarvetta. (Remes, 2022.)

Muovipakkauksia ympäristöystävällisempiä muotoonpuristettuja kuitupakkauksia käytetään esimerkiksi elintarvikkeiden pakkaamiseen ja erilaisten tuotteiden kuljettamiseen. Muotoonpuristetun kuidun kuivaamisessa käytetään lämmönsiirtoon perustuvaa konvektiivista kuivausta, jossa kuumennettu kaasu (yleensä ilma) höyrystää kosteuden pois määstä tuotteesta. Höyry poistuu kaasun virtauksen mukana. Korkean lämpötilan lämpöpumpulla voidaan hyödyntää tuotteesta poistuva kostea ilma ja käyttää sitä ilman lämmittämiseen konvektiiviseen kuivaukseen vaadittuun lämpötilaan. Haasteena on kuitenkin lämmönlähteen ja -nielun ollessa ilmaa, esiintyy suurta lämpötilaliukua, mikä johtaa pienempään COP-arvoon korkeamman lämpötilanoston takia. (IEA Annex 58, 2024.)

Paperikoneen kuivauskoneessa kulutetaan noin 69 % koneen tarvitsemasta lämmöstä ja 100 % höyrystä. Yleisin kuivaustekniikka on sylinterikuivaus. Kuivauksessa käytetty höyry on matalassa, 2–5 bar:n paineessa ja 120–130 °C:n lämpötilassa. Prosessissa syntyy paljon hukkalämpöä, josta noin 40 % jätetään hyödyntämättä. Hukkalämpö on kostea ilmaa, noin 50–90 °C:n lämpötilassa. Kuivauksessa käytetty matalapaineinen höyry sekä korkea hukkalämmön lämpötila mahdollistavat korkean lämpötilan lämpöpumpun soveltamisen prosessin höyryntuotantoon. Laskujen mukaan tehtaan tehon ollessa välillä 3,0–10,6 MW ja sähkön hinnan vaihdellessa välillä 45–80 €/MWh, takaisinmaksuaika haketta korvatta on pienimmillään 4,3 vuotta ja korkeimmillaan ei toteudu. Maakaasua korvatta takaisinmaksuaika on pieni, 1,5–3,6 vuotta. (Lähtenaro, 2019.) Korkean lämpötilan

lämpöpumppua voidaan käyttää myös muissa samantyyppisissä prosesseissa, kuten kartonkikoneen kuivausosassa.

### 4.1.2 Kemianteollisuus

Suomessa kemianteollisuuteen kuuluu öljy-, kaasu- ja petrokemian teollisuus, kemian perusteollisuus sekä lääketieteollisuus, muovi- ja kumiteollisuus, kosmetiikka, pesuaineet ja maaliteollisuus (Kemianteollisuus ry, 2024). Kemianteollisuudessa korkean lämpötilan lämpöpumppuja voidaan käyttää tislaukseen, kompressioon, lämpömuotoiluun, konsentroiintiin, keittoon, ruiskuvaluun sekä kuivaukseen. Edellä mainitut prosessit vaativat lämpöä 90–300 °C:n lämpötilassa. (Arpagaus ym., 2018.) Tässä aluvuossa käsitellään korkean lämpötilan lämpöpumppujen soveltuvuutta tislauksprosesseissa.

Yleensä alle 200 °C:n lämpötilassa tapahtuva tislauks on kemianteollisuuden yleisin sekä energiantensiivisin prosessi. Koska hukkalämmönlähde sekä prosessin lämpövirrat sijaitsevat lähietäisyydellä toisistaan, on lämpöpumpun sijoittaminen prosessiin kannattavaa. (Marina ym., 2021.) Tyypillisesti tislauksprosessissa käytetään höyryä, joka on tuotettu maakaasulla. MVR-lämmittimiä on kuitenkin käytetty tislauksessa jo vuodesta 1986. Korkean lämpötilan lämpöpumput korvaavat MVR-lämmittimet etenkin tilanteissa, joissa korroosio ja räjähdysriski ovat mahdollisia. (IEA Annex 58, 2024.)

Selluloosasta valmistetun bioetanolin tislauks vaatii 130 °C:n lämpötilan, ja prosessissa on paljon lämmitystä sekä jäädytystä vaativia virtauksia, mikä tekee korkean lämpötilan lämpöpumppujen hyödyntämisestä mahdollista. Jos prosessiin tarvittava lämpö on aikaisemmin tuotettu hakkeella, olisi lämpöpumppuinvestoinnin takaisinmaksuaika 6,5 vuodesta toteutumattomaan sähkönhinnan vaihdellessa 45–80 €/MWh. Kevyttä polttoöljyä tai maakaasua korvatta takaisinmaksuaika olisi välillä 0,7–3,8 vuotta, mikä tekee lämpöpumppuinvestoinnista todennäköisesti kannattavan. (Lähteenaro, 2019.)

Japanissa Hokkaido Bioethanolin tehtaalla valmistetaan bioetanolia muun muassa vehnänstä, maissista, sokerijuuresta ja riisistä. Aikaisemmin höyry tuotettiin tislauks varten raskasöljykäyttöisellä kattilalla, ja prosessissa syntyvä hukkalämpö viilennettiin jäädytystornilla. Vuonna 2013 tehdas asensi viisi Kobelcon SGH120-lämpöpumppua sekä yhden flash-tankin, joiden avulla 65 °C:ssa olevasta hukkalämmöstä tuotetaan 110–120 °C:n lämpötilassa olevaa höyryä. Lämpöpumput kattavat 70 % tislauksprosessin höyryntarpeesta, ja loput höyrystä tuotetaan kattilalla. Lämpöpumppujen COP-arvon ollessa 3,5, tehtaalla energiankulutus väheni 40 %, CO<sub>2</sub>-päästöt 43 % ja energiakustannukset 54 %. Lämpöpumppuinvestoinnin takaisinmaksuaika oli noin 3 vuotta. (IEA Annex 58, 2022; Heat Pump & Thermal Storage Technology Center of Japan, 2015.) Ratkaisu voisi todennäköisesti soveltua myös Suomeen, sillä Suomen energiahinnat tukevat lämpöpumppuinvestoinnin kannattavuutta.

### 4.1.3 Elintarviketeollisuus

Elintarviketeollisuudessa on muita teollisuuden aloja monipuolisemmin erilaisia prosesseja (Marina ym., 2021). Korkean lämpötilan lämpöpumput soveltuvat kuivatukseen, haihdutukseen, pastöroiintiin, steriloiintiin, keittoon ja tislaukseen. Nämä prosessit vaativat lämpöä välillä 90–250 °C. (Arpagaus ym., 2018.) Kuivausprosessit käyttävät yleensä

suuria määriä energiaa (Marina ym., 2021). Tässä alaluvussa käsitellään korkean lämpötilan lämpöpumppujen soveltuvuutta sumukuivauksessa, steriloinnissa ja makkaran kypsennys/savustusprosessissa.

Yksi elintarviketeollisuuden kuivausprosesseista on sumukuivaus, ja sitä käytetään usein etenkin nestemäisten ruokien ja juomien kuivaukseen (Singh & Heldman, 2014). Korkean lämpötilan lämpöpumpuilla on prosessissa paljon potentiaalia, koska se tapahtuu korkeassa lämpötilassa ja aiheuttaa ison osan elintarviketeollisuuden energiankulutuksesta tarviten yleensä useiden megawattien kapasiteetin (Zühlsdorf ym., 2019).

Zühlsdorf ym. (2017) tutki erilaisten kylmäaineseosten soveltuvuutta korkean lämpötilan lämpöpumpuissa sumukuivauksessa syntyvän hukkalämmön hyödyntämiseen. Case-esimerkin tanskalaisessa maitotehtaassa maito kuivatetaan maitojauheeksi lämmittämällä ilmaa 210 °C:seen höyryä tuottavan maakaasukattilan avulla. Mikäli kattila korvataan korkean lämpötilan lämpöpumpulla, prosessissa syntyvä hukkalämpö saadaan paremmin hyödynnettyä. Korkean lämpötilan lämpöpumpulla 75 °C:n hukkalämpö viilennetään 45 °C:seen ja 1,55 MW hukkalämpöä hyödynnetään prosessin esilämmittämiseen 120 °C:seen. Käyttämällä 50/50 propaani–iso-pentaani-liuosta, korkean lämpötilan lämpöpumpulla voidaan saavuttaa COP-arvo 3,08 ja vähentää maakaasun käyttöä jopa 36 %. Samalla lämpöpumpun 20 vuoden elinkaaren aikana lämmityskuluissa säästetään arvon mukaan noin 921 000 €. Nykyään korkean lämpötilan lämpöpumpuilla voidaan kuitenkin saavuttaa korkeampia lämpötiloja, joten vastaavassa prosessissa voidaan todennäköisesti saavuttaa entistä suurempi energiasäästö. Energiasäästön kasvaessa myös lämmityskustannuksissa voitaisiin todennäköisesti saavuttaa suurempi säästö, varsinkin Suomen sähkön ja kaasun välisen hintasuhteen ollessa matala.

Steriloinnissa mikro-organismien deaktivoimiseen tarvitaan vähintään 104–130 °C:n lämpötilassa olevaa höyryä. Tarvittava lämpötila riippuu tuotteesta sekä sterilaattorista. Tämän jälkeen steriloitu tuote jäädytetään alle 40 °C:n lämpötilaan, jolloin syntyy hukkalämpönä vettä noin 80 °C:n lämpötilassa. Prosessin epäjatkuvuuden vuoksi korkean lämpötilan lämpöpumpun hyödyntämisen mahdollistamiseksi prosessiin vaaditaan myös lämmönvarasto, sillä lämmitys- ja jäädytystarvetta vaativat vaiheet tehdään eri aikoihin. (IEA Annex 58, 2024.) Hukkalämmön korkean lämpötilan ansiosta korkean lämpötilan lämpöpumpulla voidaan saavuttaa korkea COP-arvo, mikä lisää energiasäästöjä entiseen lämmitysjärjestelmään verrattuna.

Sveitsissä Gustav Spiess AG käyttää makkaran pastöinti- ja kypsennyskammion lämmittämiseen kaasukäyttöisellä kattilalla tuotettua 6–8 bar höyryä, joka alennetaan 1,5 bar paineeseen ja 115 °C lämpötilaan, jotta kammion tarvitsema 85–90 °C:n lämpötila ja makkaran noin 72 °C:n sisälämpötila saadaan saavutettua. Tehdas harkitsee 550 kW:n höyryä tuottavan korkean lämpötilan lämpöpumpun hankintaa makkaroiden kypsennys/savustusprosessin höyryntuotantoon. Lämmönlähteenä lämpöpumppu käyttäisi NH<sub>3</sub>-jäädyttimistä syntyvää 40–50 °C:ssa olevaa hukkalämpöä. Tehtaan käyttöaika vuodessa on 3 000 tuntia. Case-esimerkissä sähkön ja kaasun hintasuhte on 1,47 ja sähkö tuotetaan ydinvoimalla. Arvion perusteella lämpöpumpun COP-arvo on 2,7 ja investointikustannukset 455 000 €. Tutkimuksen perusteella CO<sub>2</sub>-päästöjen määrä vähenisi 98 % ja energiaa säästettäisiin 66 %. Lämpöpumppuinvestoinnin takaisinmaksuaika olisi 3,3 vuotta ja vuodessa säästettäisiin 139 000 €. (Arpagaus ym., 2023.) Teollisuus vaatii kui-

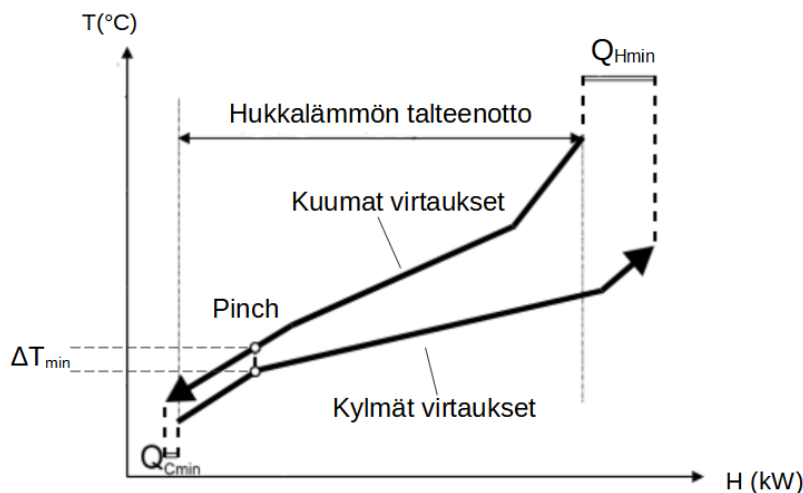
tenkin yleensä alle 2–3 vuoden takaisinmaksuaikaa (IEA Annex 58, 2023), joten ratkaisun soveltuvuutta suomalaisessa makkaratehtaassa on vaikea arvioida. Investoinnin kannattavuutta tukee matala sähkön ja kaasun välinen hintasuhde, mutta kannattavuuteen vaikuttaa myös muun muassa tehtaan käyttöaika sekä prosessin vaatima lämmityskapasiteetti ja lämpötila.

## 4.2 Integrointi järjestelmään

Lämpöpumpun optimaalinen sijoittaminen järjestelmään on tärkeää energiankulutuksen vähentämiseksi ja investoinnin kannattavuuden parantamiseksi. Hukkalämpöä kannattaa käyttää mahdollisimman sen syntyapaikkaa, koska investointikustannukset kasvavat lämpöä siirrettäessä (Motiva, 2019). Lisäksi lämmön siirtäminen aiheuttaa lämpöhäviöitä. Lämpöpumpun optimaalista integraatiota prosessiin voidaan arvioida pinch-analyysin avulla (IEA Annex 35, 2014).

Pinch-analyysillä voidaan selvittää lämpöpumpulle sijainti, jossa sen energiankulutus on mahdollisimman pieni. Tällöin prosessissa syntyvä hukkalämpö saadaan mahdollisimman hyvin hyödynnettyä. Tätä varten tarvitaan tieto prosessin lämmitys- ja jäähdytystarpeesta. Jäähdytystä vaativista kuumista virtauksista sekä lämmitystä vaativista kylmistä virtauksista muodostetaan summakäyrät. Käyrien perusteella piirretään lämpötila-entalpia-kuvaaja, jonka avulla voidaan määrittää lämpöpumpun pienin mahdollinen energiankulutus. (Linnhoff March, 1998.)

Kuvassa 6 olevan kuvaajan avulla voidaan löytää prosessin pinch-piste, joka on kuumien ja kylmien virtausten summakäyrien pienin lämpötilaero. Käyrien päällekkäisyydestä nähdään suurin mahdollinen hyödynnettävissä olevan hukkalämmön määrä sekä jäljelle jäävät pienimmät mahdolliset jäähdytys- ja lämmitystarpeet. (Linnhoff March, 1998.)



Kuva 6. Lämpötila-entalpia-kuvaaja prosessin lämmöntarpeesta. Muokattu lähteestä (Linnhoff March, 1998).

Pinch-pisteen määrittämisen jälkeen prosessi voidaan jakaa systeemiin pinch-pisteen alapuolella sekä yläpuolella. Pisteen yläpuolelle jäävää osaa kutsutaan lämpönieluksi ja alapuolella olevaa osaa lämmönlähteeksi. Lämpöpumppu kannattaa sijoittaa prosessiin pinch-pisteen päälle siten, että lämpöpumppu siirtää lämpöä lämmönlähteestä lämpönieluun. Tämä pienentää prosessin lämmitys- sekä jäähdytystarpeita. Jos lämpöpumppua ei

voida sijoittaa pinch-pisteen päälle, investointia ei kannata tehdä. (Linnhoff March, 1998.)

### **4.3 Haasteet**

Lämpöpumpun hankintaan liittyy paljon haasteita. Korkean lämpötilan lämpöpumpuilla on kaasu- ja öljykäyttöisiä kattiloita korkeammat investointikustannukset, jolloin yritysten vaatima alle 2–3 vuoden takaisinmaksuaika ei usein toteudu. Myös tiedon puute on ongelma, sillä lämpöpumppujen optimaalinen integraatio järjestelmään vaatii osaamista sekä lämpöpumpun toiminnasta että prosessista. Monissa yrityksissä ei myöskään tiedetä prosessien vaatimasta lämmitys- ja jäähdytystarpeesta, jolloin lämpöpumpun sovellusmahdollisuuden arvioiminen on aikaa vievää ja hintavaa. (IEA Annex 58, 2023.) Lisäksi vähäinen tieto korkean lämpötilan lämpöpumppujen teknisistä mahdollisuuksista ja taloudellisesti toteuttamiskelpoisesta sovelluspotentiaalista käyttäjien, konsulttien, sijoittajien, laitossuunnittelijoiden, valmistajien sekä asentajien kesken rajoittaa korkean lämpötilan lämpöpumpun hankintaa. (Arpagaus ym., 2018). Lämpöpumput ovat myös alttiita sähkön hinnan vaihtelulle (Motiva, 2019). Lisäksi korkean lämpötilan lämpöpumpulla saavutettava maksimilämpötila sekä hukkalämmön lämpötila, määrä ja laatu rajoittavat sen soveltuvuutta eri prosesseihin. Myös esimerkkitapausten puute rajoittaa korkean lämpötilan lämpöpumppujen soveltamista uusissa prosesseissa.



## 5 Johtopäätökset

Korkean lämpötilan lämpöpumpuilla on merkittävä rooli teollisuuden energiankäytön ja kasvihuonepäästöjen vähentämisessä sekä Suomen ilmastopoliittisten tavoitteiden saavuttamisessa. Tämän työn tavoitteena oli tarjota Suomen teollisuudelle tietoa keinosta energiankäytön ja kasvihuonepäästöjen vähentämiseksi sekä antaa ratkaisu hukkalämmön tehokkaampaan hyödyntämiseen. Työ suoritettiin kirjallisuustutkimuksena ja rajattiin käsittelemään erilaisia korkean lämpötilan lämpöpumpputeknologioita, korkean lämpötilan mahdollistavia tekijöitä sekä mahdollisia sovelluskohteita Suomen teollisuudessa.

Erilaisista korkeita lämpötiloja tuottavista lämpöpumpputeknologioista kompressorilämpöpumput soveltuvat parhaiten teollisuuteen niiden yleisyyden, kyvystä hyödyntää erilaisia lämmönlähteitä sekä korkean lämpötilanoston vuoksi. Verrattuna MVR-lämmittimiin ja TVR-laitteisiin, kompressorilämpöpumput eivät tarvitse lämmönlähteeksi höyryä. Tyypin 2 absorptiolämpöpumppuun verrattuna kompressorilämpöpumppu voi hyödyntää huomattavasti matalammassa lämpötilassa olevaa hukkalämpöä. Lisäksi kompressorilämpöpumpulla saadaan muita lämpöpumpputyyppejä huomattavasti korkeampi lämpötilanosto aikaiseksi.

Tällä hetkellä markkinoilla on jo useita yli 90 °C:n lämpöä tuottavia korkean lämpötilan lämpöpumppuja, ja muutamilla niistä voidaan saavuttaa yli 150 °C:n lämpötiloja. Lämpöpumppujen kehitys on kuitenkin nopeaa, ja siihen on vaikuttanut etenkin kylmäainesten ja kompressoreiden kehittyminen. Lämpöpumpun tuottaman lämmön lämpötilaa on rajoittanut aikaisemmin käytössä olleiden kylmäainesten matala kriittinen piste. Uudet kylmäaineet ovat mahdollistaneet entistä korkeammat lämpötilat, ja esimerkiksi kylmäaineilla R1336mzz(Z) sekä heliumilla on potentiaalia korkeiden lämpötilojen tuottamisessa. Myös kompressorin tuottama painesuhte määrittää lämpöpumpulla saavutettavan maksimilämpötilan. Korkean lämpötilan lämpöpumppuihin sopivatkin erityisen hyvin ruuvikompressorit korkean painesuhteen vuoksi, ja turbokompressorit korkean kapasiteetin ja hyötysuhteen vuoksi. Lämpöpumpun kaksivaiheiset ja kaskadikiertoprosessit mahdollistavat korkean lämpötilanoston.

Korkean lämpötilan lämpöpumppuja voidaan Suomen teollisuuden aloista parhaiten hyödyntää metsä-, kemian- ja elintarviketeollisuudessa. Näillä aloilla syntyy merkittävä määrä hukkalämpöä, ja monien prosessien vaatima lämpötila on mahdollista tuottaa korkean lämpötilan lämpöpumpulla. Metsäteollisuudessa korkean lämpötilan lämpöpumput sopivat etenkin kuivausprosesseihin, kuten sahatavaran, muotoonpuristetun kuidun ja paperin kuivatukseen sekä muihin vastaaviin prosesseihin. Kemianteollisuudessa etenkin tislauksprosesseihin, kuten sahatavarasta tai elintarvikkeista tuotetun bioetanolin tislauksprosessiin voidaan integroida korkean lämpötilan lämpöpumppu. Elintarviketeollisuudessa korkean lämpötilan lämpöpumppu soveltuu esimerkiksi sumukuivaukseen, sterilointiin ja makkaran kypsennys/savustusprosessiin.

Etenkin metsä- ja kemianteollisuuden ollessa Suomen suurimpia energiankäyttäjiä, voidaan korkean lämpötilan lämpöpumpuilla saavuttaa suuria energiansäästöjä ja päästövähennyksiä. Korkean lämpötilan lämpöpumpuilla on kuitenkin mahdollisia sovelluskohteita myös muissa prosesseissa ja muilla teollisuudenaloilla, ja sovelluskohteiden määrä laajenee korkean lämpötilan lämpöpumppujen kehittyessä tulevana vuosina. Lämpöpumppun

soveltavuuteen tiettyyn prosessiin vaikuttaa esimerkiksi prosessissa syntyvän hukkalämmön määrä ja laatu, aikaisempi lämmitysjärjestelmä, takaisinmaksuajan pituus sekä lämpöpumpun integroitavuus. Soveltavuuden arvioimiseksi tiettyyn prosessiin, on tehtävä tarkempi tutkimus ja selvitys muun muassa prosessin lämpövirroista ja muista prosessin parametreista. Vaikka korkean lämpötilan lämpöpumppu voitaisiin integroida prosessiin, voi investoinnin esteenä oli pitkä takaisinmaksuaika. Mikäli lämpö on aikaisemmin tuotettu fossiilienergialla, voidaan lyhyt takaisinmaksuaika todennäköisemmin saavuttaa. Lämpöpumppuinvestoinnin kannattavuutta on kuitenkin vaikeaa arvioida, koska siihen vaikuttaa energian hinta, jonka kehitystä on haastavaa ennustaa.

## Lähdeluettelo

Aittomäki, A. & Aalto, E. & Alijoki, T. & Hakala, P. & Hirvelä, A. & Kaappola, E. & Mentula, J. & Seinelä, A. 2008. Kylmäteknikka. 3. painos. Helsinki: Suomen Kylmäyhdistys. 406 s. ISBN 978-951-96449-6-7.

Arpagaus, C. & Bless, F. & Uhlmann, M. & Schiffmann, J. & Bertsch, S. 2018. High temperature heat pumps: Market overview, state of the art, research status, refrigerants, and application potentials. *Energy*. Vol. 152. S. 985–1010. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.166>.

Arpagaus, C. & Bless, F. & Bertsch, S. & Krummenacher, P. & Flórez-Orrego, D.A. & Pina, E.A. & Maréchal, F. & Calame Darbellay, N. & Rognon, F. & Vesin, S. & Achermann, P. & Jansen, C. 2023. Integration of High-Temperature Heat Pumps in Swiss Industrial Processes (HTHP-CH). Chicago: 14th IEA Heat Pump Conference. 13 s. Saatavissa: [https://www.hpc2023.org/wp-content/uploads/gravity\\_forms/3-7075ba8a16c5f78b321724d090fb2a34/2023/05/0494\\_HPC2023\\_Full\\_Paper\\_Arpagaus\\_v02.pdf](https://www.hpc2023.org/wp-content/uploads/gravity_forms/3-7075ba8a16c5f78b321724d090fb2a34/2023/05/0494_HPC2023_Full_Paper_Arpagaus_v02.pdf).

Bless, F. & Arpagaus, C. & Bertsch, S. & Schiffmann, J. 2017. Theoretical analysis of steam generation methods - Energy, CO<sub>2</sub> emission, and cost analysis. *Energy*. Vol. 129. S. 114–121. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.088>.

EHPA. 2020. Large heat pumps in Europe and industrial uses. 44 s. Saatavissa: [https://www.ehpa.org/wp-content/uploads/2022/11/Large-heat-pumps-in-Europe-and-industrial-uses\\_2020.pdf](https://www.ehpa.org/wp-content/uploads/2022/11/Large-heat-pumps-in-Europe-and-industrial-uses_2020.pdf).

El Samad, T. & Żabnieńska-Góra, A. & Jouhara, H. & Sayma, A. 2024. A review of compressors for high temperature heat pumps. *Thermal Science and Engineering Progress*. Vol. 51. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.102603>.

Energiateollisuus. 2024. Sähkövuosi 2023: Puhdas sähköntuotanto kasvoi, päästöt ja hinnat romahtivat. [Viitattu 8.6.2024]. Saatavissa: <https://energia.fi/tiedotteet/sahkovuosi-2023-puhdas-sahkontuotanto-kasvoi-paastot-ja-hinnat-romahtivat/>.

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2023/1791. Direktiivi energiatehokkuudesta ja asetuksen (EU) 2023/955 muuttamisesta. 111 s. Saatavissa: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023L1791>.

Heat Pump & Thermal Storage Technology Center of Japan. 2015. Leading the Future of Heat Pump and Thermal Storage Technology: Hokkaido Region. 2 s. Saatavissa: <https://www.hptcj.or.jp/Portals/0/english/Learning/HOKKAIDO.pdf>.

Hundy, G. & Trott, A. & Welch, T. 2016. Refrigeration, air conditioning and heat pumps. 5. painos. Amsterdam: Butterworth-Heinemann. 585 s. ISBN: 978-0-08-100647-4. Saatavissa: <https://app.knovel.com/kn/resources/kpRACHPE04/toc?cid=kpRACHPE04>.

IEA Annex 35. 2014. Application of Industrial Heat Pumps Final Report – Part 1. Borås: Heat Pump Centre. 405 s. ISBN: 978-91-88001-92-4. Saatavissa: <https://heatpumping-technologies.org/publications/application-of-industrial-heat-pumps-part-1/>.

IEA Annex 58. 2022. Steam supply heat pump for distillation process at Hokkaido Bioethanol. 2 s. Saatavissa: <https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/wp-content/uploads/sites/70/2022/07/casehokkaido-bioethanol.pdf>.

IEA Annex 58. 2023. High-Temperature Heat Pumps Task 1 – Technologies. Borås: Heat Pump Centre. 173 s. ISBN: 978-91-89821-34-7. Saatavissa: <https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/wp-content/uploads/sites/70/2023/09/annex-58-task-1-technologies-task-report.pdf>.

IEA Annex 58. 2024. High-Temperature Heat Pumps Task 2 – Integration Concepts. Borås: Heat Pump Centre. 92 s. ISBN: 978-91-89896 79-6. Saatavissa: <https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/wp-content/uploads/sites/70/2024/04/annex-58-task-2-integration-concepts-report.pdf>.

Jiang, J. & Hu, B. & Wang, R. & Deng, N. & Cao, F. & Wang, C. 2022. A review and perspective on industry high-temperature heat pumps. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 161. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112106>.

Kemianteollisuus ry. 2024. Tietoa alasta. [Viitattu 16.7.2024]. Saatavissa: <https://www.kemianteollisuus.fi/tietoa-alasta/>.

Klute, S. & Budt, M. & Doetsch, C. & van Beek, M. 2024. Steam generating heat pumps – Overview, classification, economics, and basic modeling principles, Energy Conversion and Management. Vol. 299. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117882>.

Linnhoff March. 1998. Introduction to Pinch Technology. Northwich: Linnhoff March. 63 s. <https://www.ou.edu/class/che-design/a-design/Introduction%20to%20Pinch%20Technology-LinhoffMarch.pdf>.

Lähteenaro, P. 2019. Kuumalämpöpumppujen sovelluskohteet ja potentiaali metsäteollisuudessa. Diplomityö. LUT-yliopisto. Lappeenranta. 70 s. Saatavissa: <https://lut-pub.lut.fi/bitstream/handle/10024/159906/Kuumal%C3%A4mp%C3%B6pum-pun%20sovelluskohteet%20mets%C3%A4teollisuudessa.pdf?sequence=1&isAllo-wed=y>.

Marina, A. & Spoelstra, S. & Zondag, H. & Wemmers, A. 2021. An estimation of the European industrial heat pump market potential. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 139. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110545>.

Mateu-Royo, C. & Navarro-Esbrí, J. & Mota-Babiloni, A. & Amat-Albuixech, M. & Molés, F. 2018. Theoretical evaluation of different high-temperature heat pump configurations for low-grade waste heat recovery. International Journal of Refrigeration. Vol. 90. S. 229–237. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2018.04.017>.

Mateu-Royo, C. & Arpagaus, C. & Mota-Babiloni, A. & Navarro-Esbrí, J. & Bertsch, S. 2021. Advanced high temperature heat pump configurations using low GWP refrigerants for industrial waste heat recovery: A comprehensive study. Energy Conversion and Management. Vol. 229. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113752>.

Metsäteollisuus ry. 2024. Metsäteollisuus ry. [Viitattu 16.7.2024]. Saatavissa: <https://www.metsateollisuus.fi/metsateollisuus-ry>.

Motiva. 2014. Ylijäämälämmön taloudellinen hyödyntäminen – Lämpöpumppuja ORC-sovellukset. 68 s. Saatavissa: [https://www.motiva.fi/files/13513/Ylijaamalammon\\_taloudellinen\\_hyodyntaminen\\_Lampopumppu- ja\\_ORC-sovellukset.pdf#page=1](https://www.motiva.fi/files/13513/Ylijaamalammon_taloudellinen_hyodyntaminen_Lampopumppu- ja_ORC-sovellukset.pdf#page=1).

Motiva. 2019. Esiselvitys – Ylijäämälämmön potentiaali teollisuudessa. 36 s. Saatavissa: [https://www.motiva.fi/files/16214/Esiselvitys\\_-\\_Ylijaamalammon\\_potentiaali\\_teollisuudessa.pdf](https://www.motiva.fi/files/16214/Esiselvitys_-_Ylijaamalammon_potentiaali_teollisuudessa.pdf).

Motiva. 2024. Sähköistämällä energiatehokkuutta teollisuudessa. 45 s. Saatavissa: [https://www.motiva.fi/files/22074/Sahkoistamalla\\_energiatehokkuutta\\_teollisuudessa\\_kirjallisuusselvitys\\_2024.pdf](https://www.motiva.fi/files/22074/Sahkoistamalla_energiatehokkuutta_teollisuudessa_kirjallisuusselvitys_2024.pdf).

Remes, M. 2022. UPM: Lämpöpumpulla lisää tehoa sahan energiankäyttöön. Energiatehokkuussopimukset. [Viitattu 16.7.2024]. Saatavissa: <https://energiatehokkuussopimukset2017-2025.fi/upm-lampopumpulla-lisaa-tehoa-sahan-energiankayttoon/>.

Rosenberg, J. & Sotsil, S. 2017. Energy evaluation of the use of an absorption heat pump in water distillation process, Distillation: Innovative Applications and Modeling. Vol. 8. S. 185–201. Saatavissa: <http://dx.doi.org/10.5772/67094>.

Singh, R. & Hederman, D. 2014. Introduction to Food Engineering. 5. painos. Amsterdam: Elsevier. 867 s. ISBN: 978-0-12-398530-9. Saatavissa: <https://app-knovel.com.libproxy.aalto.fi/kn/resources/kpIFEE0013/toc?cid=kpIFEE001>.

Sun, J. & Wang, Y. & Qin, Y. & Wang, G. & Liu, R. & Yang, Y., 2023. A review of super-high-temperature heat pumps over 100 °C. Energies. Vol. 16. Saatavissa: <https://doi.org/10.3390/en16124591>.

Tilastokeskus. 2023. Vuoden 2022 kasvihuonekaasupäästöt vähenivät – maankäyttösektori oli nettopäästölähde. [Viitattu 31.5.2024]. Saatavissa: <https://stat.fi/julkaisu/cl8a4c4tivtd00bvyvo6fy0sv>.

Tilastokeskus. 2024. Energian hankinta ja kulutus. [Viitattu: 31.5.2024]. Saatavissa: [https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin\\_ehk/statfin\\_ehk\\_pxt\\_12vk.px/](https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin_ehk/statfin_ehk_pxt_12vk.px/).

Udroiu, C-M. & Navarro-Esbrí, J. & Giménez-Prades, P. & Mota-Babiloni, A. 2024. Towards sustainable process heating at 250°C: Modeling and optimization of an R1336mzz(Z) transcritical High-Temperature heat pump. Applied Thermal Engineering. Vol. 242. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.122521>.

Wolf, M. 2017. Application potential and optimization of high temperature heat pump systems for process heat supply. Väitöskirja. BOKU-yliopisto, materiaalitieteiden ja prosessitekniikan laitos. Wien. 135 s. Saatavissa: [https://abstracts.boku.ac.at/download.php?dataset\\_id=12081&property\\_id=107](https://abstracts.boku.ac.at/download.php?dataset_id=12081&property_id=107).

Wolf, S. & Lambauer, J. & Blesl, M. & Fahl, U. Voss, A. 2012. Industrial heat pumps in Germany: Potentials, technological development and market barriers. Saatavissa:

[https://www.researchgate.net/publication/303863369\\_Industrial\\_heat\\_pumps\\_in\\_Germany\\_Potentials\\_technological\\_development\\_and\\_market\\_barriers](https://www.researchgate.net/publication/303863369_Industrial_heat_pumps_in_Germany_Potentials_technological_development_and_market_barriers).

Wolf, S. 2017. Integration von Wärmepumpen in industrielle Produktionssysteme: Potenziale und Instrumente zur Potenzialerschließung. Väitöskirja. Stuttgartin yliopisto, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung. Stuttgart. 226 s. Saatavissa: [https://elib.uni-stuttgart.de/bitstream/11682/9610/7/Dissertation\\_Integration\\_von\\_Waermepumpen\\_in\\_industrielle\\_Produktionssysteme\\_von\\_Stefan\\_Wolf.pdf](https://elib.uni-stuttgart.de/bitstream/11682/9610/7/Dissertation_Integration_von_Waermepumpen_in_industrielle_Produktionssysteme_von_Stefan_Wolf.pdf).

Ympäristöministeriö. 2024. Suomen kansallinen ilmastopolitiikka. [Viitattu 31.5.2024]. Saatavissa: <https://ym.fi/suomen-kansallinen-ilmastopolitiikka>.

Zühlsdorf, B. & Bühler, F. & Mancini, R. & Cignitti, S. & Elmegaard, B. 2017. High Temperature Heat Pump Integration using Zeotropic Working Fluids for Spray Drying Facilities. 12th IEA Heat Pump Conference. Rotterdam. 11 s. ISBN: 978-90-9030412-0. Saatavissa: <https://heatpumpingtechnologies.org/archive/hpc2017/wp-content/uploads/2017/06/O.3.6.4-High-Temperature-Heat-Pump-Integration-using-Zeotropic-Working-Fluids-for-Spray-Drying-Facilities.pdf>.

Zühlsdorf, B. & Bühler, F. & Bantle, M. & Elmegaard, B. 2019. Analysis of technologies and potentials for heat pump-based process heat supply above 150°C. Energy Conversion and Management: X. Vol. 2. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2019.100011>.