



KUUMALÄMPÖPUMPPUJEN HYÖDYNTÄMINEN TEOLLISUUSLÄMMÖN- TUOTANNOSSA SUOMESSA

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiatekniikan kandidaatintyö

2023

Jere Rannikko

Tarkastaja: Tutkijaopettaja Antti Uusitalo

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Energiatekniikka

Jere Rannikko

Kuumalämpöpumppujen hyödyntäminen teollisuuslämmöntuotannossa Suomessa

Energiatekniikan kandidaatintyö

2023

34 sivua, 10 kuvaa, 3 taulukkoa ja 1 liite

Tarkastaja: Tutkijaopettaja Antti Uusitalo

Avainsanat: kuumalämpöpumppu, teollisuuslämpö, absorptio, kompressori, kylmäaine

Kandidaatintyössä selvitetään kuumalämpöpumppujen käyttömahdollisuuksia Suomen teollisuuslämmöntuotannossa. Työssä esitetyt kuumalämpöpumpputyypit ovat teollisuuteen tarkoitettuja ja niiden toiminnasta löytyy tietoja eri valmistajilta. Kandidaatintyössä on tarkasteltu kuumalämpöpumpuilla saavutettuja lämpötiloja sekä niiden merkitystä. Lisäksi käsitellään kuumalämpöpumpuissa käytettäviä kylmäaineita. Työssä on selvitetty myös teollisuuslämmöntuotannon tarvittavat lämpötilat sekä hiilidioksidipäästöt Suomessa. Lisäksi on selvitetty kuumalämpöpumppujen potentiaalia pienentää näitä päästöjä.

Kuumalämpöpumppujen osuus teollisuuslämmöntuotannosta Suomessa vuonna 2021 on marginaalisen pieni, vaikka potentiaalia on kattaa noin kolmasosa teollisuuslämmöntuotannosta. Kuumalämpöpumppujen otollinen lämpötila-alue on alle 200 °C ja vuonna 2022 suurin saavutettu lämpötila kuumalämpöpumpulla oli 280 °C. Vuonna 2021 teollisuudessa käytössä olevilla kuumalämpöpumpuilla saavutetaan 165 °C:n lämpötiloja ja samalla yli 3 COP-arvo. Teollisuuden tarpeisiin parhaiten soveltuva kuumalämpöpumppu on moniportainen kompressorikuumalämpöpumppu. Suomessa teollisuuslämmöntuotannosta 52 % tuotetaan mustalipeällä, jota saadaan metsäteollisuuden sivuvirtana. Tästä syystä kuumalämpöpumppujen potentiaali on muilla teollisuuden aloilla suurempi. Teollisuuden tavoite olla hiilineutraali vuoteen 2035 kiihdyttää kuitenkin myös kuumalämpöpumppujen käyttöönottoa teollisuuslämmöntuotannossa.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Energy Technology

Jere Rannikko

Utilization of high temperature heat pumps in industrial heat production in Finland

Bachelor's thesis

2023

34 pages, 10 figures, 3 tables and 1 appendix

Examiner: Associate Professor Antti Uusitalo

Keywords: high temperature heat pump, industrial heat, absorption, compressor, refrigerant

The bachelor's thesis examines the use of high temperature heat pumps in industrial heat production in Finland. The types of high temperature heat pumps presented are for industrial use only. Information about them can be found from different manufacturers. The bachelor's thesis examines the temperatures achieved by high temperature heat pumps and their significance, as well as the refrigerants used in heat pumps. The required temperatures for industrial heat production and carbon dioxide emissions in Finland are also explored. In addition, the potential of high temperature heat pumps to reduce these emissions has been considered.

The use of high temperature heat pumps in industrial heat production in Finland in 2021 is small, although there is potential to cover about a third of industrial heat production. The optimal temperature range for heat pumps is below 200°C and in 2022 the highest temperature achieved with a high temperature heat pump was 280°C. In 2021 industrial heat pumps achieve temperatures of 165°C with a COP value of over 3. The best heat pump for industrial needs is a multi-stage compressor heat pump. In Finland, 52% of industrial heat production is produced from black liquor, which is a side flow of the forest industry. Therefore, the potential for heat pumps is greater in other industries. The industry's goal of being carbon neutral by 2035, however, is also accelerating the use of heat pumps in industrial heat production.

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset

T	lämpötila	[°C, K]
Q	lämpömäärä	[J]

Alaindeksit

C	kylmä
H	kuuma
max	suurin

Lyhenteet

COP	tehokerroin (Coefficient of Performance)
GWP	ilmaston lämmitys potentiaali (Global Warming Potential)
HC	puhdas hiilivety (Hydro-Carbon)
HFC	yksisidoksinen osittain halogenoitu hiilivety (Hydrofluorocarbons)
HFO	kaksoissidonnainen osittain halogenoitu hiilivety (Hydrofluoroolefins)
IC	epäorgaaniset yhdisteet (Inorganic Compounds)
NBP	kiehumispiste (Normal Boiling Point)
ODP	otsonikerroksen vahingoitus potentiaali (Ozon Deployment Potential)
SC	turvallisuusluokka (Safety Classification)

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Symboli- ja lyhenneluettelo

1	Johdanto.....	7
2	Kuumalämpöpumput	8
2.1	Lämpöpumppujen jaottelu	8
2.2	Kompressorilämpöpumppu	9
2.2.1	Kompressorilämpöpumpun komponentit	11
2.2.2	Kaskadikuumalämpöpumppu	13
2.2.3	Välijäähdytettykuumalämpöpumppu	15
2.3	Absorptiolämpöpumppu ja lämpömuunnin.....	16
2.4	Kuumalämpöpumppujen tunnusluvut	18
2.5	Kylmäaineet kuumalämpöpumpuissa	20
2.5.1	R1234ze(E)	22
2.5.2	R410A	22
2.5.3	R717 Ammoniakki.....	22
2.5.4	R718 Vesi	23
2.5.5	R744 Hiilidioksidi.....	23
3	Kuumalämpöpumppuja Suomessa	24
4	Teollisuuslämmön tarve Suomessa	25
4.1	Teollisuuslämpö Suomessa	25
4.2	Teollisuuslämmön lämpötila.....	27
5	Kuumalämpöpumpun hyödyntäminen teollisuuslämmöntuotannossa	28
5.1	Kuumalämpöpumppujen edut	28
5.2	Kuumalämpöpumppujen haasteet	29
5.3	Päästöt	29
6	Johtopäätökset	30
	Lähteet	32

Liitteet

Liite 1. Kuumalämpöpumppujen tunnuslukuja

Kuvaluettelo

Kuva 1. Lämpöpumppujen jaottelu

Kuva 2. Kompressorilämpöpumpun toimintaperiaate

Kuva 3. Kompressorilämpöpumpun kiertoprosessi T,S-tasossa

Kuva 4. Kaksiportainen kaskadikuumalämpöpumpun kiertoprosessi

Kuva 5. Kaskadikuumalämpöpumpun kiertoprosessi T,S-tasossa

Kuva 6. Välijäähdytetty kuumalämpöpumpun kiertoprosessi

Kuva 7. Välijäähdytetty kuumalämpöpumppuprosessi T,S-tasossa

Kuva 8. Ammoniakki-vesiseoksen absorptiolämpöpumpun toimintaperiaate

Kuva 9. Eri valmistajien saavuttamia COP-arvoja lämpötilannoston funktiona

Kuva 10. Teollisuuslämmöntuotanto Suomessa polttoainetyypeittäin 2001–2021

Taulukkuuettelo

Taulukko 1. Kylmäaineiden ominaisuuksia

Taulukko 2. Teollisuuslämmöntuotannon CO₂ päästöt sekä käytetyt polttoainemäärät

Taulukko 3. Prosessien käyttämä lämpötila teollisuuden toimialoittain

1 Johdanto

Vuonna 2021 Suomen teollisuuden kuluttamasta energiasta yli 36 % kului teollisuuslämmöntuotantoon. Samana vuonna 21 % tästä lämmöstä tuotettiin uusiutumattomilla polttoaineilla. (Tilastokeskus 2022a.) Samalla Suomen tavoite on olla hiilineutraali vuoteen 2035 mennessä (Työ- ja elinkeinoministeriö 2022). Tässä kandidaatintyössä tutkittavat kuuma- lämpöpumput mahdollistavat teknologiana energiatehokkaamman ja ympäristöystävällisemmän keinon tuottaa teollisuuslämpöä.

Kuumalämpöpumppujen hyödyntämistä Euroopan teollisuudessa on tukittu esimerkiksi Norjalaisen SINTEF tutkimusorganisaation toimesta. Selvityksessä ei otettu kantaa yksittäisen valtion toimintaan, tästä syystä valtiokohtainen tarkastelu on tarpeen. (SINTEF 2020.) Suomen hiilineutraaliustavoitteiden takia, onkin mielekästä tutkia kuumalämpöpumppujen mahdollisuuksia Suomen teollisuudelle sekä niiden mahdollisuuksia vähentää hiilidioksidipäästöjä.

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on selvittää kuumalämpöpumppujen mahdollisuutta toimia teollisuuslämmöntuotannossa Suomessa. Tarkoituksena on selvittää miten eri kuuma- lämpöpumpputyypit toimivat sekä, millaisia erityyppisiä kuumalämpöpumppuja on. Lisäksi hyödyntämistä teollisuuslämmöntuotannossa tarkastellaan. Työssä selvitetään kuumalämpöpumpuissa käytettyjä kylmäaineita. Tarkoituksena on myös selvittää, kuinka paljon teollisuuslämpöä Suomessa käytetään ja millä se tuotetaan. Lisäksi pyritään selvittämään, kuinka paljon kuumalämpöpumpuilla voitaisiin vähentää teollisuuslämmöntuotannosta aiheutuvia hiilidioksidipäästöjä.

Työssä tarkastellaan vain teollisuuteen tarkoitettuja kuumalämpöpumppuja. Tarkastelu rajataan vain Suomen teollisuuteen. Tässä työssä ei tarkastella kuumalämpöpumppujen kannattavuutta investointina. Aluksi käsitellään yleisesti kuumalämpöpumput sekä niiden nykytilanne sekä niissä käytettävät kylmäaineet. Lisäksi käsitellään Suomen teollisuuslämmöntuotannontilanne sekä sen kehitys viime vuosina. Työn lopuksi pohditaan kuumalämpöpumppujen kannattavuutta teollisuuslämmöntuotannossa.

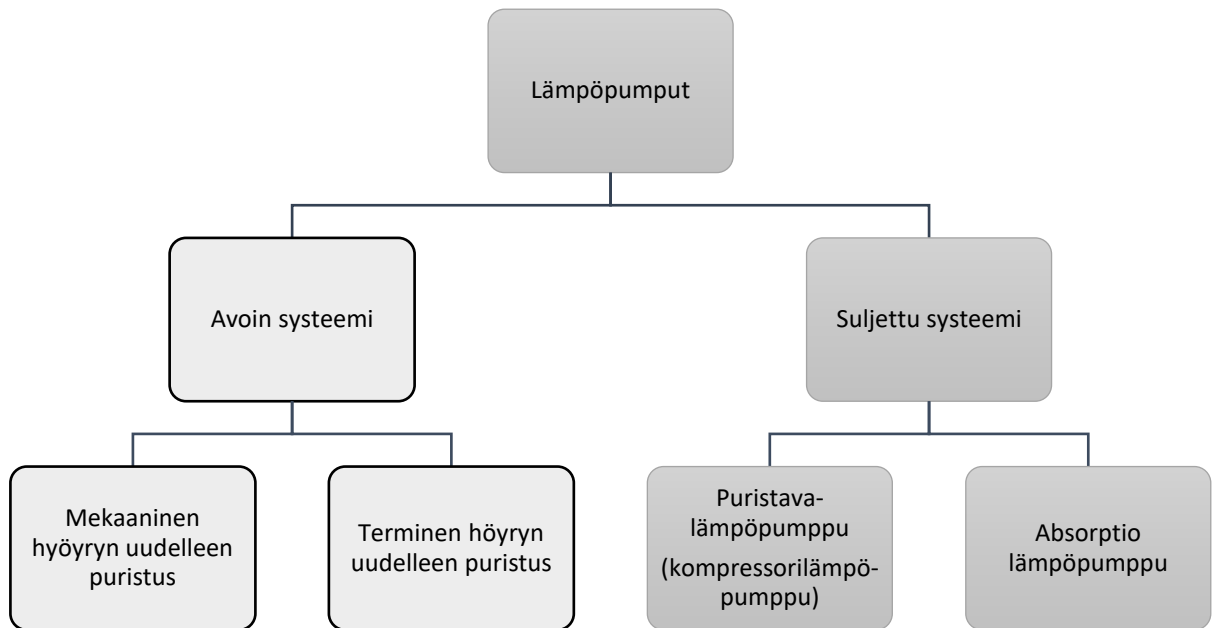
2 Kuumalämpöpumput

Termodynamiikan toinen pääsääntö kertoo, ettei lämpöenergia voi siirtyä kylmemmästä kuumempaan ilman työtä. Lämpöpumpusysteemi voidaan mieltää karkeasti systeeminä, jossa kylmäaine kiertää kylmemmästä kuumempaan lämpötilaan. Lämpöpumppu tekee työtä kylmäaineeseen ja mahdollistaa työllä kylmäaineen kiertämisen ja siten lämmön siirtymisen. Yksinkertaisissa kotitalouskäyttöisissä lämpöpumpuissa tämä tarkoittaa usein lämmön siirtämistä lämpöpumpun avulla ulkoilmasta sisäilmaan. Kuumalämpöpumppu perustuu samaan periaatteeseen, mutta lämmönlähteen ja lämmönpoiston välinen lämpötilaero on merkittävästi suurempi, johtuen korkeammasta lauhdelämpötilasta. Lisäksi lämmönlähteenä toimii usein hukkalämpö. (Dinçer I. & Kanoglu M. 2010.)

2.1 Lämpöpumppujen jaottelu

Kuumalämpöpumppu (engl. high temperature heat pump HTHP) on energianmuuntoon käytettävä laite. Tarkkaa rajausta kuumalämpöpumpun lauhdepuolen lämpötilasta ei kirjallisuudessa ole, mutta yleisenä rajauksena voidaan pitää, että kuumalämpöpumpun lauhdepuolen lämpötila on yli 80°C (Arpagaus C. et al. 2018). Kuumalämpöpumppuja on toimintaperiaatteeltaan erilaisia. Yleinen jako on jakaa kuumalämpöpumput avoimiin ja suljettuihin pumppusysteemeihin. Kuvassa 1 on lämpöpumppujen yleinen jaottelu. Kun tarkastellaan kuumalämpöpumppuja, on tarkastelu mielekästä rajata suljetun systeemin lämpöpumppuihin. (Arpagaus C. et al. 2018.)

Suljetun systeemin lämpöpumput voidaan jakaa kahteen eri periaatteella toimivaan lämpöpumpputyyppiin, puristaviin kompressorilämpöpumppuihin sekä absorptioon perustuviin lämpöpumppuihin. Kompressorilämpöpumput ovat yleisempiä niiden laajojen käyttöalueiden ja monien sovelluksien takia. Absorptiolämpöpumput ovat myös varteen otettava vaihtoehto teollisuuslämmöntuotantoon. Niiden lauhdepuolen lämpötila on kuitenkin usein matalampi verrattuna kompressiolämpöpumppuun. Lisäksi ne sisältävät useamman komponentin ja ovat siten rakenteeltaan monimutkaisempia. Rajoittavin tekijä on kuitenkin korkean lämpötilan omaavan hukkalämmönlähteen tarve. (Dinçer I. & Kanoglu M. 2010.)

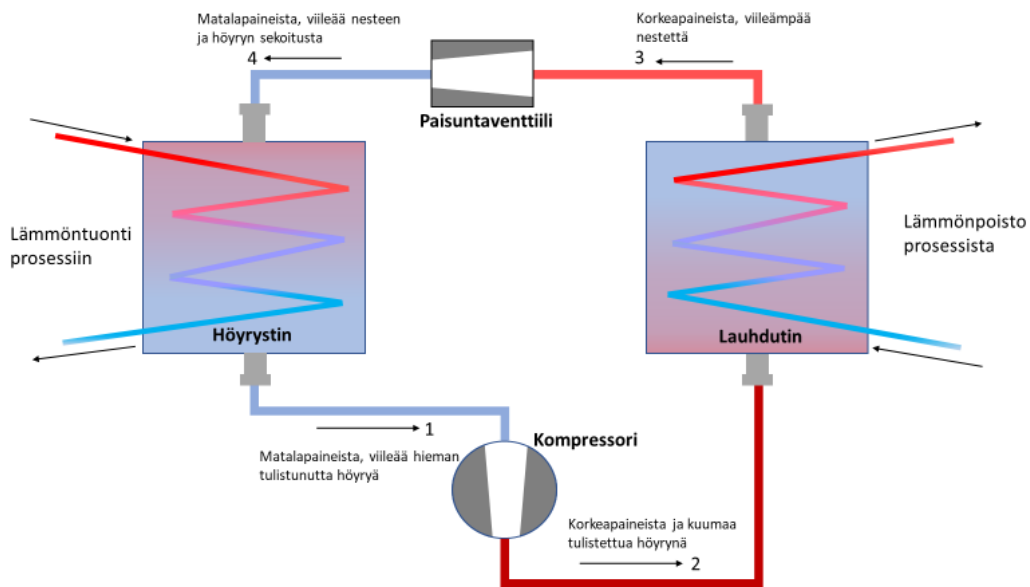


Kuva 1. Lämpöpumppujen jaottelu (muokattu lähteestä EHPA 2015.)

Johtuen absorptiolämpöpumppujen monista haasteista ja kompressorilämpöpumppujen suhteellisen pitkälle kehitetyistä sovelluksista sekä muista eduista, rajataan tässä työssä tarkastelu enimmäkseen kompressorilämpöpumppuihin. Yleisin absorptiolämpöpumppusovellus kylmäaineenaan veden ja ammoniakkin seos, käsitellään kuitenkin lyhyesti kappaleessa 2.3.

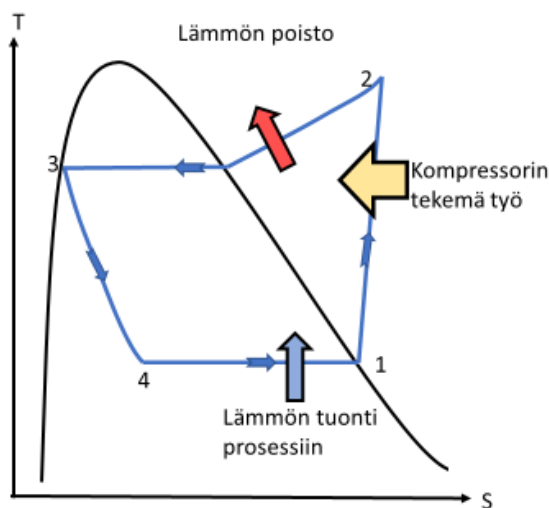
2.2 Kompressorilämpöpumppu

Kompressorilämpöpumppu on perusrakenteeltaan yksinkertainen puristukseen perustuva lämpöpumppu. Perinteisesti lämpöpumpun pääkomponentit ovat kompressorin, paisuntaventtiili sekä lämmönvaihtimet eli lauhdutin ja höyrystin. Kompressorilämpöpumppu on yleisin kuumalämpöpumpputyypin ja sen toimintaa on tutkittu paljon. Kompressorilämpöpumppuja on useita erilaisia, joten sen piirien ja järjestelmien monimutkaisuus vaihtelee eri valmistajien ja mallien välillä merkittävästi. (Arpagaus C. et al. 2018.) Yksinkertaisimmillaan kompressorin perustuva kuumalämpöpumppu toimii kuvan 2 mukaisesti.



Kuva 2. Kompressorilämpöpumpun toimintaperiaate

Kuvan 2 mukaisen kuumaalämpöpumpun prosessissa on neljä vaihetta. Ensin kylmäaine virtaa höyrystimeltä kompressorille. Kompressori tekee prosessiin työn $W_{\text{kompressori}}$ (1–2) ja nostaa kylmäaineen painetta sekä lämpötilaa. Tämän jälkeen kylmäaine virtaa lauhduttimelle, jossa kylmäaineen lämpö $Q_{\text{lauhdutin}}$ poistetaan prosessista (2–3). Jäähdyntynyt kylmäaine siirtyy seuraavaksi paisuntaventtiiliin läpi takaisin höyrystimelle (3–4). Paisuntaventtiili laskee kylmäaineen painetta. Lopuksi höyrystin tuo matalapaineiseen ja viileään kylmäaineeseen lämmön $Q_{\text{höyrystin}}$ viileämmästä lämmönlähteestä ja höyrystää sen (4–1). Koko prosessi voidaan piirtää kuvan 3 mukaiseen T,S-tasoon. T,S-taso kuvaa hyvin prosessin tekemään työtä ja sen lämpötiloja. Pystyakselilla lämpötila T ja vaaka-akselilla entropia S.



Kuva 3. Kompressorilämpöpumpun kiertoprosessi T,S-tasossa

Kuumalämpöpumppu voi toimia kuvan 2 mukaisella kytkennällä ja saavuttaa korkean poistolämpötilan. Kuitenkin usein korkean poistolämpötilan saavuttaminen vaatii useamman puristus vaiheen tai muita lisäkomponentteja kuten välijäähdyttimiä, mikäli lämpökerroin COP-arvo halutaan pitää korkeana. Tehokerroin COP kertoo, kuinka paljon lämpöä kuuma- lämpöpumppu pystyy yhdellä yksiköllä sähköä tuottamaan. Kun COP-arvoa halutaan nostaa, prosessi monimutkaistuu peruseriaatteen säilyessä kuitenkin samana. Arpagaus C. et al. käsitteli artikkelinsa taulukossa 2 eri valmistajien kytkentäkaavioita sekä niillä saavutettuja lämpötiloja. Taulukosta huomataan, että suuri osa käytössä olevista kuumalämpöpumpuista on kompressorilämpöpumppuja. (Arpagaus C. et al. 2018.)

Kuten jo todettiin, voi kuumalämpöpumppu toimia vain harvoin yksinkertaisella kytkennällä. Kuumalämpöpumpun kytkennässä on pääkomponenttien lisäksi ainakin erilaisia lämpötila-, paine- ja virtausmittauksia sekä venttiileitä. Kun tavoitellaan korkeampaa poistolämpötilaa ja parempaa lämpökerrointa lisätään usein myös muita komponentteja. Yleisimmät kuumalämpöpumput sisältävät esimerkiksi välijäähdyttimiä ja useampia kompressoreita ol- len huomattavasti monimutkaisempia kuin yksinkertainen kompressorilämpöpumppu. Ylei- simmät kuumalämpöpumppukytkennät ovat erilaiset portaittaiset kytkennät eli kaskadikytkennät sekä välijäähdytetyt kuumalämpöpumppukytkennät.

2.2.1 Kompressorilämpöpumpun komponentit

Kompressorilämpöpumpun ollessa yleisin kuumalämpöpumpputyyppejä, on mielekäästä tarkastella sen komponentteja tarkemmin. Kuten jo mainittiin ovat pääkomponentit aina vähintään kompressorin, paisuntaventtiilin, höyrystimen ja lauhduttimen.

Kompressorin tehtävä on pitää riittävän suuri paine-ero höyrystimen ja lauhduttimen välillä. Kompressorin siis nostaa kylmäaineen painetta ja täten sen sisältämää energiaa, joka sitten vapautuu lauhduttimessa. Ideaalitalanteessa suurempi paine-ero tarkoittaa korkeampaa lauhduttamisenergiaa ja siten korkeampaa poistolämpöä. (Aittomäki A. & Aalto E. 2012.) Kompressorin tyyppien on useita, mutta kuumalämpöpumpuissa yleisimmät kompressorityypit ovat mäntäkompressorit ja ruuvikompressorit (Grassi W. 2018).

Mäntäkompressori ja ruuvikompressori ovat molemmat puristukseen perustuvia kompressoreita. Mäntäkompressorissa mäntä pienentää imutilavuutta, joka puristaa kylmääainetta ja nostaa siten sen painetta. Mäntäkompressorin painesuhde on todella korkea ja lisäämällä vaiheita sitä voidaan nostaa entisestään. Ongelmana on sykkivä tuotanto, joka voidaan kuitenkin tasata painesäiliön avulla. (Aittomäki A. & Aalto E. 2012.)

Ruuvikompressori perustuu mäntäkompressorin tavoin tilavuuden pienentämiseen. Ruuvikompressori on usein kaksi roottorinen, jossa kaksi ruuvia pyörii vierekkäin. Ruuvien välinen tilavuus pienenee, joka pakottaa kylmääineen paineen nousuun. Ruuvikompressorin hyötynä on tasainen tuotto sekä korkea painesuhde. (Aittomäki A. & Aalto E. 2012.)

Lisäksi suuremman virtausnopeuden tarvitsevilla kuormalämpöpumpuissa turbokompressorien käyttö on yleistä. Turbokompressori on ilmavirtauksen nopeuden muuttamiseen perustuva kineettinen kompressori, jonka yhden vaiheen painesuhde on usein pieni. Turbokompressorin painesuhdetta voidaan kasvattaa lisäämällä siihen useampia vaiheita. (Aittomäki A. & Aalto E. 2012.)

Paisuntaventtiilissä kylmääineen paine tasaantuu höyrystimen tasolle. Paisuntaventtiilin malli ja toimintaperiaate tulee valita Aittomäen mukaan kylmääineen, höyrystymislämpötilan, lauhtumislämpötilan, kylmääineen alijäähtymisen ja käytettävissä olevan paine-eron mukaan. (Aittomäki A. & Aalto E. 2012.)

Höyrystin on tietyn tyyppinen lämmönvaihdin. Höyrystimessä kylmääine nimensä mukaisesti höyrystyy, joko kokonaan tai osittain. Paisuntaventtiililtä tullut matalapaineinen kylmääine höyrystetään matalan lämpötilan lämmönlähteen energialla kuormalämpöpumppu sovelluksissa kokonaan. Höyrystimessä käytettyjä lämmönvaihdin tyyppisiä on useita. Kuormalämpöpumppusovelluksissa on usein tavoite tulistaa höyryä, jotta vältetään nestepisaroiden päätyminen kompressorille. Tämä asettaa erityiskriteereitä höyrystimelle. Eri valmistajilla on käytössä erilaisia lämmönvaihtimia ja riippuen lämmönlähde tyypistä, voi käytössä olla esimerkiksi moniputkilämmönvaihtimia sekä levylämmönvaihtimia. (Hakala P. & Kaappola E. 2007.)

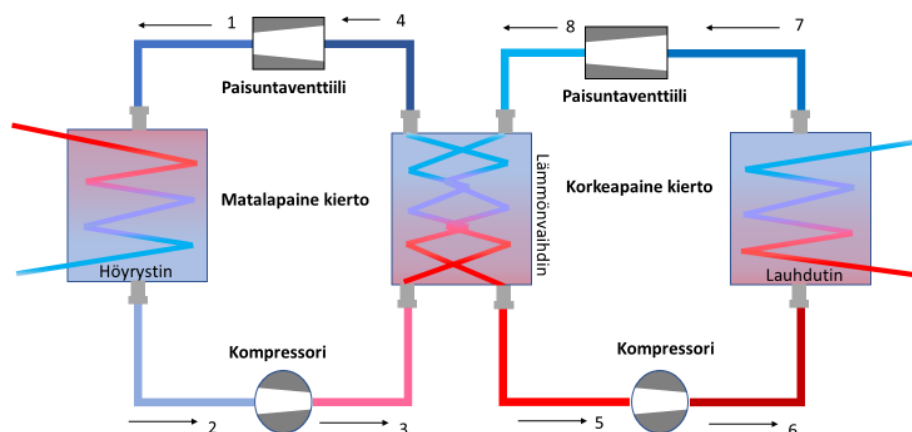
Lauhdutin on myös lämmönvaihdin, joka toimii ikään kuin käänteisesti verrattuna höyrystimeen. Lauhduttimessa kylmääine lauhtuu osittain tai kokonaan takaisin nesteeksi. Ensin korkeapaineisesta tulistetusta kylmääineestä poistetaan tulistus. Tämän jälkeen lauhduttimessa alkaa tapahtua faasimuutosta. Lauhtumisessa vapautunut energia siirretään haluttuun

käyttökohteeseen lämmönvaihtimen avulla (Grassi W. 2018). Vastaavasti kun höyrystimiä, myös lauhduttimia on useita erilaisia ja sen tyyppi tulee valita aina käyttöolosuhteiden mukaan. Kuumalämpöpumpuissa voidaan käyttää esimerkiksi levylämmönsiirtimiä lauhduttimina. (Hakala P. & Kaappola E. 2007.)

Kuumalämpöpumpun toimintaa rajoittavana tekijänä on liiallinen lämpötilannousu kompressorissa. Kompressori nostaa kylmäaineen lämpötilaa puristaessaan sitä. Mitä suurempi painesuhde on, sitä suurempi on myös lämpötilan nousu. Tämä on kuumalämpöpumppujen keskeinen ongelma, sillä kylmäaineen lämmitessä myös COP-arvo laskee. Ongelmaa on pyritty ratkomaan esimerkiksi useammalla puristusvaiheella sekä välijäähdytyksillä. Lisäksi kylmäaineen valinnalla on merkitystä. (Aittomäki A. & Aalto E. 2012.)

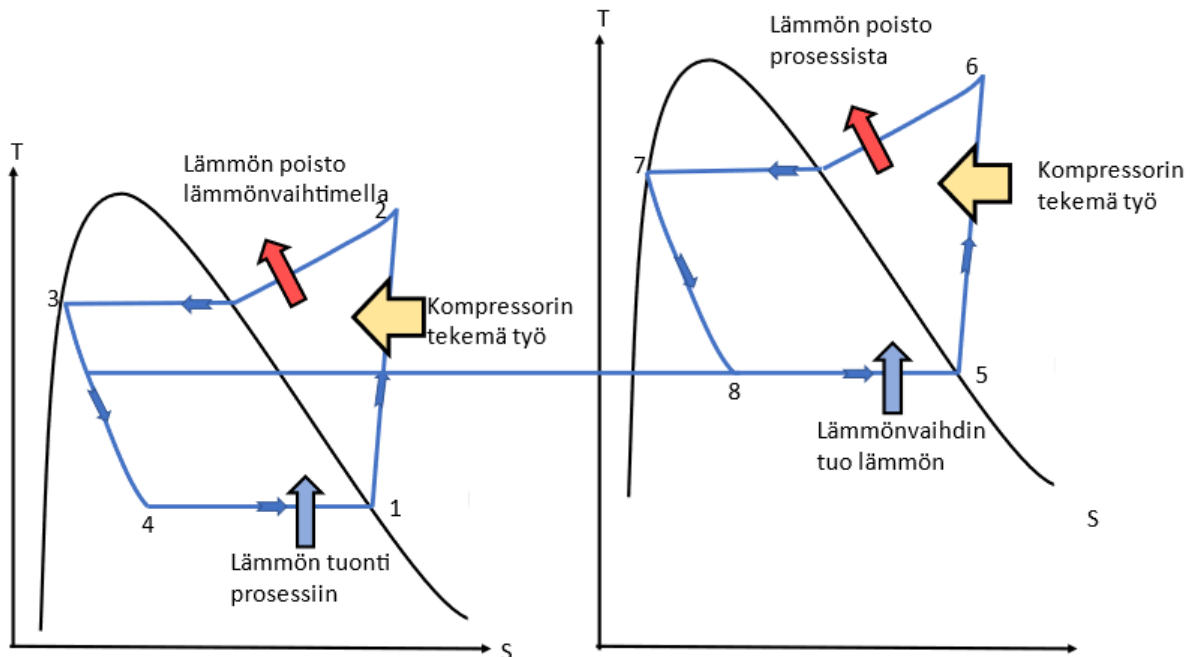
2.2.2 Kaskadikuumalämpöpumppu

Kaskadikuumalämpöpumppu tarkoittaa useamman portaan omaavaa kompressorikuumalämpöpumppuratkaisua. Tämä voi tarkoittaa esimerkiksi kahden peräkkäisen ruuvikompressorikierron lisäämistä prosessiin. Merkittävämpänä etuna kaskadikuumalämpöpumpuissa on se, että kylmäaine ei rajoita yhtä vahvasti toimintaa. Kuten myöhemmin kappaleessa 2.5 käydään läpi, on eri kylmäaineilla rajoitteita liittyen niillä saavutettaviin lämpötiloihin ja paineisiin. Kaskadikuumalämpöpumppu ratkaisee osittain tämän ongelman, sillä siinä voidaan käyttää kahdessa peräkkäisessä kierrossa eri kylmäaineita, jotka ovat kussakin tilanteessa optimaalisimmat. Kuvassa 4 on esitetty kaksiportainen kuumalämpöpumppu. Kuten kuvasta huomataan, on prosessissa käytännössä kaksi identtistä yksikiertoista prosessia. Nyt kuitenkin päästään korkeampaan poistolämpötilaan. (Dinçer I. & Kanoglu M. 2010.)



Kuva 4. Kaksiportainen kaskadikuumalämpöpumpun kierto-prosessi

Kuvassa 4 esitetty kaksiportainen kaskadikuumalämpöpumppu toimii vastaavasti kuin perinteinen yksivaiheinen lämpöpumppuprosessi. Ensimmäisessä vaiheessa kylmäaine virtaa kohti höyrystintä. Höyrystin höyrystää kylmäaineen (1–2) tuodulla lämmöllä $Q_{\text{höyrystin}}$. Höyrystynyt kylmäaine nostetaan korkeampaan paineeseen (2–3) kompressorilla. Kompressorin tekee työn $W_{\text{kompressorin 1}}$ prosessiin vastaavasti kuin yksiportaisessa prosessissa. Korkeapaineinen kylmäaine luovuttaa lämmön (3–4) $Q_{\text{lämmönvaihdin}}$ lämmönvaihtimessa toisen kierroksen kylmäaineeseen. Tämän jälkeen jäähtynyt matalapaineikierron kylmäaine virtaa paisuntaventtiilin kautta (4–1) takaisin höyrystimelle. Korkeapainepuolella kylmäaine, joka on jo lämmennyt lämmönvaihtimessa (8–5), puristetaan korkeampaan paineeseen kompressorilla (5–6). Kompressorin tekee jälleen työn $W_{\text{kompressorin 2}}$ prosessiin. Korkeapaineinen ja kuuma kylmäaine lauhtuu nyt lauhduttimessa (6–7) ja luovuttaa lämmön $Q_{\text{lauhduutin}}$ korkeassa lämpötilassa. Lauhtunut ja jäähtynyt kylmäaine paisuu paisuntaventtiilissä (7–8) ja jatkaa kiertoa lämmönvaihtimen kautta. Alla kuvassa 5 on esitetty kyseinen prosessi T,S-tasossa. Kuten huomataan, on lämmönpoisto lämpötila nyt korkeampi, kuin yksiportaisella.

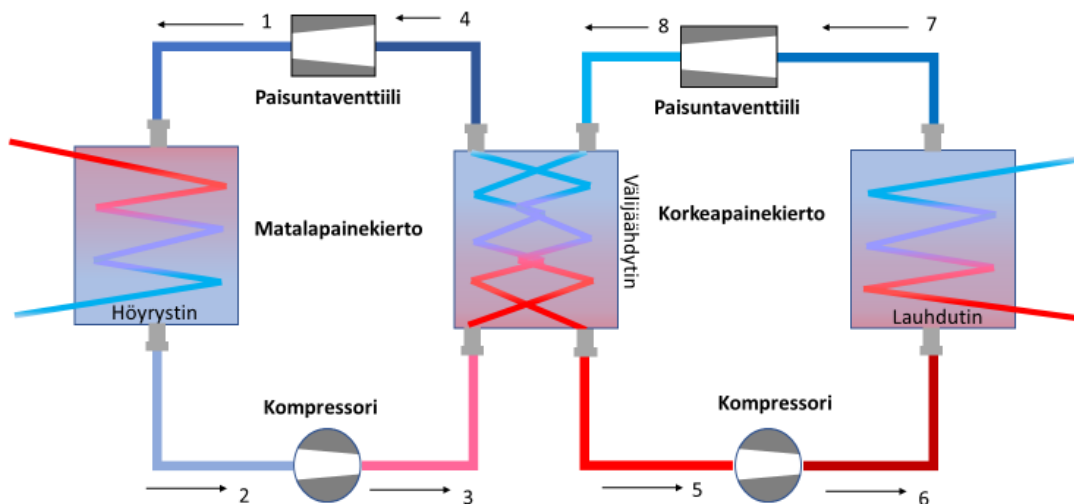


Kuva 5. Kaskadikuumalämpöpumpun kierto prosessi T,S-tasossa

Kuvassa 4 esitetty kaksiportainen kuumalämpöpumppu usein jo riittää riittävän suuren lopulämpötilan saavuttamiseen. Sovellusten kuitenkin kehittyessä ja tarpeen kasvaessa, tavoitellaan yhä suurempaa lämpötilan nosta sekä lämpökerrointa.

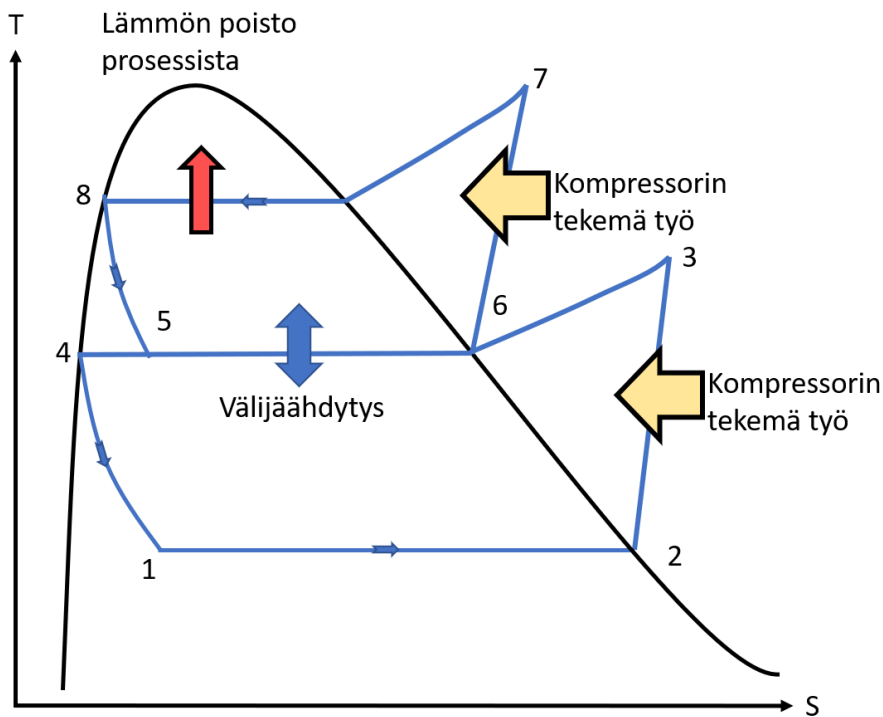
2.2.3 Välijäähdytettykuumalämpöpumppu

Kaskadikuumalämpöpumpun rinnalla toinen yleisesti käytetty sovellus on välijäähdytetty prosessi. Varsinainen ero kaskadikuumalämpöpumppuun on se, ettei välijäähdytetyssä prosessissa ole kuin yhtä kylmäainetta. Välijäähdytetyllä prosessilla tarkoitetaan kiertoprosessia, jossa kompressorinostaa paine-eroa kahdessa tai useammassa vaiheessa, välissä kylmäainetta jäähdytetään. Jäähdytys toteutetaan lauhduttimesta palaavalla nesteellä tavoitteena saavuttaa kylmäaineelle kylläinen tila myös puristuksen jälkeen. Kuten jo aiemmin todettiin, on yksi suurimmista haasteista kompressorikuumalämpöpumpuille liiallinen lämpötilan nousu puristusvaiheessa. Välijäähdytyksellä tätä lämpötilaa voidaan laskea, ja painesuhdetta näin nostaa. Suurin etu välijäähdytyksellä onkin puristuslämpötilan aleneminen. (Adamson K.-M. et al. 2022.) Kuvassa 6 on esitetty välijäähdytetty kuumalämpöpumppu.



Kuva 6. Välijäähdytetty kuumalämpöpumpun kiertoprosessi

Kuvassa 6 esitetty välijäähdytettyprosessi toimii vastaavasti kuin kaskadikuumalämpöpumppuprosessi poikkeuksena välijäähdytyn lämmönvaihtimen tilalla. Välijäähdytyn jäähdyttää korkeapainepuolen kompressorille virtaavan kylmäaineen (3–5) samalla tehden siitä kylläistä hyödyntämällä lauhduttimelta tulevaa viileämpää kiertoainetta (8–5). Tällöin kompressorin vaatima teho pienenee. Tämä pystytään huomaamaan hyvin kuvan 7 avulla. Kuvassa 7 on esitetty välijäähdytetty kuumalämpöpumppuprosessi T,S-tasossa.

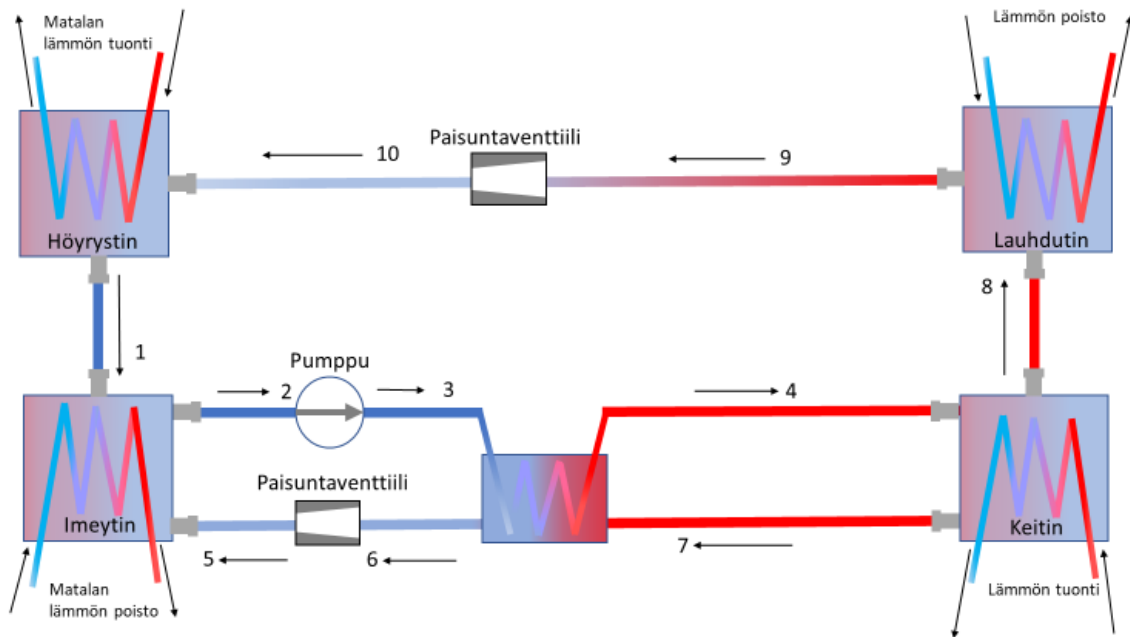


Kuva 7. Välijähdytetty kuumalämpöpumpppu prosessi T,S-tasossa

2.3 Absorptiolämpöpumppu ja lämpömuunnin

Absorptio saa nimityksensä kaasun ja nesteen sekoittumisesta. Kun kaasu sekoittuu nesteeseen eli lauhtuu, vapautuu siitä sidosenergiaa sekä lauhtumislämpöä. Tätä vapautunutta lämpöä voidaan nimetä liukenemislämmöksi. Absorptiolämpöpumppu perustuu juuri tähän lämmön vapautumiseen. (Aittomäki A. & Aalto E. 2012.)

Absorptiolämpöpumput voidaan jakaa kahteen eri tyyppiin riippuen toimintaperiaatteesta. Ensimmäinen tyyppi on todellinen lämpöpumppu, jossa pumppu tekee työtä prosessiin nostatakseen kylmäaineen painetta. Toinen tyyppi on kuumalämpöpumppujen kannalta merkityksellisempi, eräänlainen lämpömuunnin lämpöpumppu (eng. heat transformer heat pump). Molemmissa tyypeissä suurimman työn prosessissa tekee kuitenkin hukkalämpö. Lämpömuuntimessa hyödynnetään välilämpötilassa olevaa lämpövarastoa esimerkiksi hukkalämpöä ja nostetaan sitä korkeampaan lämpötilaan. Absorptiolämpöpumpussa kylmäaineena toimii aina kahden eri höyrystymispisteen omaavan kylmäaineen seos. Ammoniakki-vesi ja vesi-litiumbromidi ovat yleiset kylmäaineseokset, tässä kappaleessa tutkitaan tarkemmin ammoniakki-vesiseosta. Kuvassa 8 on välilämpötilasta kuumempaan lämpötilaan lämpöä siirtävä absorptiolämpöpumpun toimintaperiaate. (Dinçer I. & Kanoglu M. 2010.)



Kuva 8. Ammoniakki-vesiseoksen absorptiolämpöpumpun toimintaperiaate

Kuten kuvasta 8 nähdään, on absorptiolämpöpumpun rakenne monimutkaisempi kuin kompressorilämpöpumpun. Yksinkertaisimman kompressorilämpöpumpusysteemin neljän vaiheen sijaan, vaiheita on nyt kymmenen. Ammoniakkivesi-seos tuodaan höyrystimeltä imeytimelle. Ammoniakki on tässä kohdassa höyryä ja vesi nestettä. Ammoniakki sekoittuu takaisin veteen imeyttimessä, jossa imeytimen lämpö Q_{imeytin} tuodaan systeemiin ja liuos muuttuu vahvaksi liuokseksi (1–2). Imeyttimen liuos pumpataan korkeaan painetasoon kohti lämmönvaihdinta (2–3). Lämmönvaihtimessa osa seoksen lämmöstä siirtyy kylmempään kylmäaineeseen (3–4). Lämmönvaihtimessa kylmäaineen kylmemmän puolen poistovirta kuljetetaan keittimelle missä systeemiin tuodaan lämpö Q_{keitin} (4–8). Nyt ammoniakki luovuttaa osan sen lämmöstä kiertoaineelle, joka kulkee lauhtuttimelle ja osa jatkaa kiertoa kohti imeytintä (4–7). Heikentynyt imeyttimelle menevä kylmäaineliuos luovuttaa lämpöä lämmönvaihtimessa (7–6) ja paisuu matalapaineiseksi paisuntaventtiilissä ennen imeytintä (6–5). Keittimestä kohti lauhdutinta mennyt vahventunut kylmäaineseos lauhtuu lauhtuttimessa takaisin kylmäainenesteeksi. Lauhdutin poistaa ympäristöön ammoniakin lauhtumisessa syntyvän lämmön $Q_{\text{lauhdutin}}$ (8–9). Ammoniakki-vesiseos paisuu alhaiselle painetasolle ennen höyrystintä, joka tuo lämmön $Q_{\text{höyrystin}}$ prosessiin (10–1). Ammoniakki höyrystyy jälleen ja vesi pysyy nesteenä ja kierto alkaa alusta. (Dinçer I. & Kanoglu M. 2010.)

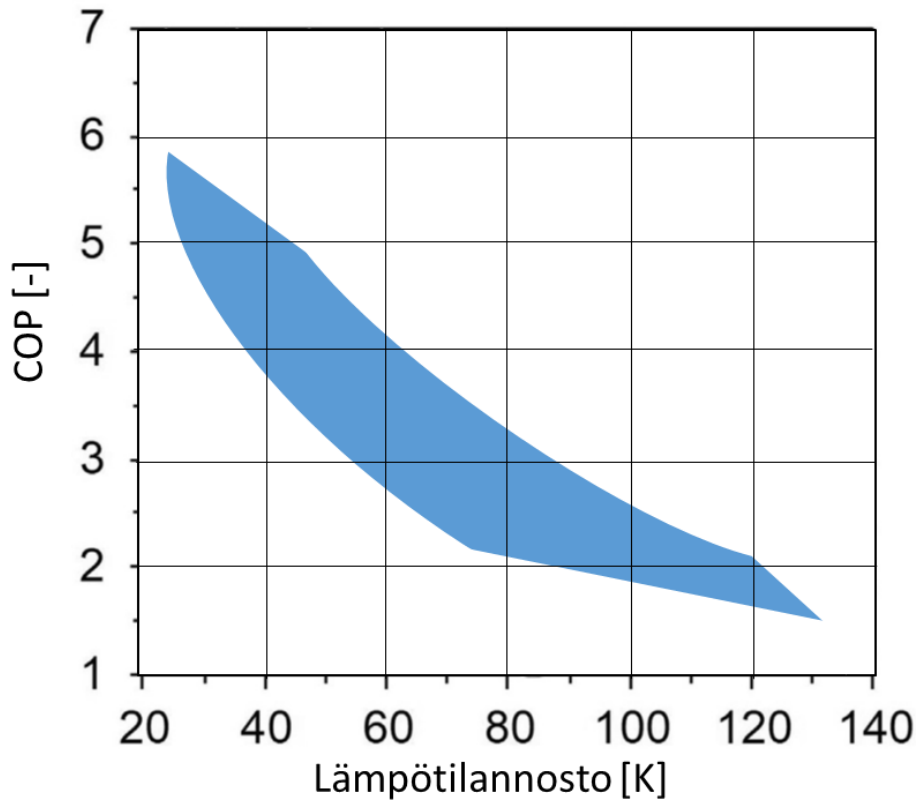
Johtuen absorptiolämpöpumpun toiminnasta, on sen kannattavalle käytölle edellytyksenä riittävän korkea lämmönlähde eli korkean lämpötilan omaava hukkalämmönlähde. Korkeampi lämmönlähde mahdollistaa myös korkean COP-arvon. Käytännössä tämä voisi tarkoittaa teollisuuslaitoksen hukkalämpövirtaa esimerkiksi kuumaa vettä tai höyryä. Absorptiolämpöpumpulla voidaan saavuttaa jopa 180°C:n lämpötila ja samalla toimia usean megawatin teholla. Kuitenkin absorptiolämpöpumpun COP-arvo jää usein alle kahteen (Dinçer I. & Kanoglu M. 2010.) Tämä rajaa jo useasti absorptiolämpöpumpun pois vaihtoehtoista. Tämä on yksi niistä syistä, miksi kompressorikuumalämpöpumppu on tarkastelun keskiössä.

2.4 Kuumalämpöpumppujen tunnusluvut

Suurimmat saavutetut lämpötilannostot kuumalämpöpumpuilla kasvavat jatkuvasti. Yli 200°C:n lämpötiloja on saavutettu jo useammilla valmistajilla. Samalla kuitenkin suurimmat lämpötilannostot ovat vain hieman yli 100°C. Yli 200°C:n lämpötiloihin pääsevät ainakin kuumalämpöpumppuvalmistajat Piller, Spilling, Olvondo sekä Enerin. Vuoden 2022 lopussa korkein saavutettu lämpötila 280°C saavutettiin Spillingin mäntäkompressori kuumalämpöpumpulla kylmäaineena R718 eli vesi. (IEA 2022.).

Jiang J. käsitteli artikkelissaan kuumalämpöpumpputyypeillä saavutettuja lämpötiloja ja niiden kylmäaineita. Jiang J. artikkelin portaittaiset (eng. cascade) eli kaskadikuumalämpöpumppuratkaisut ovat erityisen kiinnostavia, sillä niillä päästään korkeisiin lämpötiloihin, vaikka lämmönlähde onkin alhainen. Edistyneimmät teollisuuskäytössä olevat kuumalämpöpumput pystyvät jopa 120°C:n lämpötilannostoon. Liitteeseen 1 on koottuna teollisuuden lämmöntuotannon kannalta mielenkiintoisimmat ratkaisut saavutetun lämpötilan sekä mahdollisen tehon perusteella. (Jiang, J. et al. 2022.)

Myös Arpagaus C. käsitteli artikkelissaan saavutettavia maksimilämpötiloja eri kuumalämpöpumpputyypeillä. Kuvassa 9 on esitettyä eri valmistajien saavuttamia COP-arvoja lämpötilannoston funktiona. Kuten kuvasta huomataan, laskee saavutettava COP-arvo merkittävästi, mikäli lämpötilannosto kasvaa.



Kuva 9. Eri valmistajien saavuttamia COP-arvoja lämpötilannoston funktiona (muokattu lähteestä Arpagaus C. et al. 2018.)

On huomattavissa, että lämpötilannoston määrällä on suora merkitys saavutettaviin COP-arvoihin. Tämä on selitettävissä helposti yhtälön 1 avulla. Kuten yhtälöstä huomataan, mikäli poistolämpötila nousee ja lämmönlähteen lämpötila pysyy samana, heikkenee COP-arvo. Tyypillisesti COP-arvot vaihtelevat 2 ja 5 välillä kuumalämpöpumpuissa (SINTEF 2020). Tästä syystä, korkeamman lämpötilan saavuttaminen hyvällä COP-arvolla on vaikeaa. Lisäksi kylmäaineella on suuri merkitys lämpöpumpun toiminta-arvoihin, myös lämpökertoimeen. Kylmäaineisiin keskitytään vielä tarkemmin luvussa 2.5. (Arpagaus C. et al. 2018.)

$$\text{COP} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_C} \Rightarrow \text{COP}_{\text{max}} = \frac{T_H}{T_H - T_C} \quad (1)$$

jossa COP on lämpökerroin, Q on lämpömäärä [J], T on lämpötila [K], H on kuuma ja C on kylmä.

2.5 Kylmäaineet kuuma-ämpöpumpuissa

Kylmäaineen valintaan vaikuttaa useat tekijät. Erityisesti lämmönlähteen lämpötila sekä haluttu lämpötilannosto vaikuttavat valintaan. Lisäksi kylmäaineen valinnassa on otettava huomioon kylmäaineen ympäristövaikutukset sekä turvallisuustekijät. (Hakala P. & Kaappola E. 2007.) Liitteen 1 perusteella nähdään, että kuuma-ämpöpumpujen mahdollisia prosessikytkentöjä on useita. Samoissa kytkennöissä voidaan myös käyttää useita eri kylmäaineita, joilla voidaan saavuttaa useita eri lämpötiloja ja tehoja.

Kylmäaineilla on pitkä historia ja niiden kehitysohjelmaan on investoitu paljon. Ensimmäiset kylmäaineet otettiin käyttöön jo 1800-luvun lopulla. Turvallisuus oli ainoa kriteeri kylmäaineille aina 1990-luvulle asti ja vasta 2000-luvun taitteessa kylmäaineiden ympäristöystävällisyydestä alettiin puhua. Nykyään 2020-luvulla myös kylmäaineen fysikaaliskemialliset ominaisuudet ovat yhä merkittävämmässä roolissa. Lisäksi viime vuosina on kiinnitetty erityistä huomiota kylmäaineen ympäristöystävällisyyteen. Ilmastonlämmityspotentiaali (engl. global warming potential GWP) kertoo kylmäaineen vaikutuksista kasvihuonekaasujen muodostumiseen. GWP-luku on määritetty siten, että hiilidioksidin luku on yksi sadan vuoden käytön aikana. Kylmäaineen valinnassa tulee siis tavoitella pientä GWP-lukua. Lisäksi käytössä on otsoninvahingoittamispotentiaali (engl. ozone depletion potential ODP), joka kertoo kuinka vaarallista, kylmäaine on otsonikerrokselle. ODP-luku on sidottu kylmäaineen R11 ODP-lukuun, joka on 1. R11 ollessa otsonille vaarallisinta asteikko on 0–1. (Jiang J. et al. 2022.)

Lisäksi kylmäaineiden valinnassa erityisen tärkeää on sopivat termodynaamiset aineominaisuudet. Kylmäaineen tulee soveltua prosessin käyttölämpötiloille niin, että höyrystymisestä ja lauhtumispaineet ovat sopivat. Kylmäaineen tulee olla pysyvää eikä se saa aiheuttaa korroosiota. Taulukossa 1 on esitettyinä potentiaalisimpien kuuma-ämpöpumpujen sovelluksissa useimmin käytettyjä kylmäaineita. Lisäksi käsitellään tarkemmin vesi, ammoniakki, hiilidioksidi, R410A ja R1234ze(E), sillä näiden käytöstä löytyy näyttöä eri valmistajilta. Taulukossa T_c tarkoittaa kriittistä lämpötilaa, jolloin kylmäaine höyrystyy paineesta huolimatta. Vastaavasti p_c tarkoittaa kriittistä painetta. Safety Classification (SC) kertoo kylmäaineen turvallisuusluokasta. B tarkoittaa, että kylmäaine on myrkyllinen ja A on vastaavasti myrkytön. Numero kirjaimen perässä merkitsee syttymisherkkyyttä 1 ollessa palamaton. Normal Boiling Point (NBP) on aineen kiehumispiste normaalipaineessa. (ASHAE 2020.)

Taulukko 1. Kylmäaineiden ominaisuuksia (muokattu lähteestä Jiang, J. et al. 2022.)

Tyyppi	Kylmäaine	Kemiallinen kaava	T _c [°C]	p _c [bar]	ODP	GWP	SC	NBP [°C]
IC	R717	NH ₃	132.2	113.3	0	0	B2L	-33
	R718	H ₂ O	373.9	220.6	0	0	A1	100
	R744	CO ₂	31.0	73.8	0	1	A1	-78.5
HFC	R245fa	CHF ₂ CH ₂ CF ₃	154.0	36.5	0	858	B1	14.9
	R410A	CG ₂ F ₂ CHF ₂ CF ₃	72.8	13.8	0	2088	B1	-48.5
HFO	R1234ze(E)	CHF(E)	109.4	36.4	0	<1	A2L	-19
	R1336mzz(Z)	CHCF ₃ (E)	137.7	31.5	0	18	A1	7.5
HC	R600	CH ₃ CH ₂ CH ₂ CH ₃	152.0	38	0	4	A3	-0.5
	R290	CH ₃ CH ₂ CH ₃	96.7	42.5	0	3	A3	-42
	R601	CH ₃ CH ₂ CH ₂ CH ₂ CH ₃	196.6	33.7	0	5	A3	36.1

Kylmäaineita voidaan yllä olevan taulukon mukaisesti jaotella usealla eri tavalla. Yleistä on kuitenkin käyttää jaottelussa apuna kylmäaineen tyyppiä, eli sitä minkälainen aine on kyseessä. Luonnonmukaiset kylmäaineet eivät sisällä halogeenimolekyylejä eli ne ovat luonnollisia. Halogeenimolekyylejä sisältävät kylmäaineet ovat kemiallisesti muuteltuja ja siten epäluonnollisia. Epäorgaaniset yhdisteet IC (engl. inorganic compounds) tarkoittavat luonnollisia kylmäaineita. IC kylmäaineet ovat haitattomia otsonikerrokselle. Niiden GWP-luku on lähes nolla. HFC kylmäaineet ovat käytöstä hiljalleen poistuva kylmäaine tyyppi. HFC (engl. hydrofluorocarbons) kylmäaineet ovat yksisidoksisia osittain halogenisoituja hiilivetyjä. HFC kylmäaineiden GWP luku on poikkeuksetta korkea. (Aittomäki A. & Aalto E. 2012.)

HFC kylmäaineiden pohjalta on kehitetty HFO (engl. hydrofluoroolefins) tyyppin kylmäaineet, jotka ovat kaksoissidonnaisia osittain halogenoituja hiilivetyjä. Niiden GWP- ja ODP-luvut ovat merkittävästi HFC kylmäaineita pienemmät ja siten ympäristölle vähemmän haitallisia. (Aittomäki A. & Aalto E. 2012.)

HFC ja HFO kylmäaineiden lisäksi on vielä puhtaisiin hiilivetyihin perustuvia kylmäaineita (engl. hydro-carbon). HC kylmäaineet ovat myös luonnollisia kylmäaineita. Ne ovat puhtaita hiilivetyjä ja niiden GWP- ja ODP-luvut ovat matalat, ongelmana on kuitenkin yleinen syttymisherkyys. (Aittomäki A. & Aalto E. 2012.)

2.5.1 R1234ze(E)

R1234ze(E) on HFO kylmäaine eli se muodostuu kaksoissidonnaisista osittain halogenoiduista hiilivedyistä. Sen ympäristövaikutukset on minimoitu GWP ja ODP arvojen ollessa 7 ja 0. Sen kriittinen lämpötila on kuuma-ämpöpumpujen kylmäaineille ominaisen korkea, sen toimiessa hyvin korkealämpötilaisissa sovelluksissa. Vaikka R1234ze(E) onkin myrkytön ja ympäristöystävällinen on se syttyvä kylmäaine. Tämä aiheuttaa tietynlaisia turvallisuusongelmia kylmäainekäytössä. Kylmäaineen syttymisherkyys aiheuttaa haasteita prosessin turvallisuuden varmistamisessa. (Arpagaus C. et al. 2018.)

2.5.2 R410A

R410A on HFC kylmäaine sen ollessa muodostunut yksisidonnaisesta osittain halogenoiduista hiilivedystä. Se ei sisällä otsonia tuhoavia aineita sen ODP luvun ollessa 0. Lisäksi sen GWP luku on pyritty minimoimaan sen ollessa kuitenkin taulukon 1 suurin. R410A kestää korkeaa lämpötilaa ja omaa hyvät fysikaaliset ominaisuudet. R410A on myrkyllinen, mutta syttymätön kylmäaine. (Aittomäki A. & Aalto E. 2012.)

2.5.3 R717 Ammoniakki

Ammoniakki on erityisesti absorptioprosesseissa käytetty kylmäaine. Se on ympäristövaikutuksiltaan erinomaista sen GWP ja ODP arvojen ollessa 0. Se on kuitenkin hengitettäessä myrkyllistä sekä lisäksi syttyvää, josta johtuu sen muita taulukon 1 kylmäaineita matalampi turvaluokitus B2L. Ammoniakkia voidaan käyttää laajasti erilämpötila-alueilla ja sen merkittävin etu muihin kylmäaineisiin nähden onkin sen suuri höyrystymislämpö. (Bamigbetan O. et al. 2017.)

2.5.4 R718 Vesi

Vettä voidaan pitää tulevaisuuden kylmäaineena. Sen fysikaaliset ominaisuudet ovat kylmäaineelle loistavat. Sen latenttilämpö on todella suuri verrattuna muihin kylmäaineisiin. Lisäksi se on todella edullista, sekä ympäristökannalta haitatonta. Se on syttymätöntä ja myrkytöntä. Sen kriittinen lämpötila on riittävän suuri. Lisäksi sen lämmönsiirtomaisuudet ovat hyvät. Veden ongelma on sen kemialliset ominaisuudet, erityisesti pieni tiheys vesihöyryinä sekä korkea höyrystymislämpötila. Arpagaus C. et al. kertoo artikkelissaan, että mikäli 0.1 bar paineista ja 50°C vettä halutaan höyrystää ja saavuttaa 5 bar paine sekä 150°C lämpötila pitäisi kompressorin painesuhde olla 50. Tämä vaatii useampaa kompressorin puristusvaihetta. Lisäksi ongelmana on veden ja öljyn reagointi kompressorin laakeroinnissa. Käytännössä kompressorin laakerointi tulee toteuttaa öljyttömästi. (Arpagaus C. et al. 2018.)

2.5.5 R744 Hiilidioksidi

Hiilidioksidi on myös varteenotettava kylmäaine kuuma- ja kylmalämpöpumpuissa. Hiilidioksidilla voidaan saavuttaa jopa 120°C lämpötiloja transkriittisellä prosessilla. Korkeilla lämpötiloilla hiilidioksidin painetta on kuitenkin kasvatettava todella suureksi. Suuri paine vaatii vastaavasti kuin vedelle useampivaiheisia kompressoreita. Hiilidioksidin kriittinen lämpötila on kuitenkin suhteellisen matala, joka estää hiilidioksidin käytön kylmäaineena, kun lämmönlähteen lämpötila lähentelee kriittistä lämpötilaa, ellei kyseessä ole transkriittinen lämpöpumppuprosessi. Hiilidioksidi on ympäristöominaisuuksiltaan hyvä kylmäaine sekä lisäksi syttymätön ja myrkytön. (Bamigbetan O. et al. 2017.)

3 Kuumalämpöpumppuja Suomessa

Vaikka kuumalämpöpumppujen hyödyntäminen teollisuudessa on vielä vähäistä, löytyy käytännön esimerkkejä useita myös Suomesta. Suomessa kuumalämpöpumppuihin on keskittynyt erityisesti kaksi yritystä Calefa sekä Oilon. Molemmilla yrityksillä on omat lämpöpumpputyypinsä, tavoitteena tuottaa lämpöä teollisuuteen sekä kiinteistöille.

Oilon on valmistanut yrityksenä jo pitkään lämpöpumppuja sekä polttimia. Kuumalämpöpumpputyyppejä Oilonilla on useita erityyppisiin kohteisiin. ChillHeat sarjan kuumalämpöpumppuja on 30 kW:n ja 50 MW:n väliltä samalla lämpötilan noston ollessa jopa 120 °C. Oilon lupaa lämpöpumpuilleen korkeaa COP-arvoa, mutta ei anna suoraa lukuarvoja. Kylmäaineina Oilonin ChillHeat sarjan pumpuissa kiertää erityyppiset HFC ja HFO yhdisteet. (Oilon 2022a.)

ChillHeat kuumalämpöpumpusta on käytännönesimerkkejä ympärimaailmaa. Suomessa ChillHeat sarjan kuumalämpöpumppua on hyödynnetty esimerkiksi eristetehtaalla Muurlalla. Eristeiden valmistus vaatii paljon hieman alle 100 °C:sta lämpöä esimerkiksi tasaantumisuneissa. Lisäksi esimerkiksi raaka-aineiden kyllästyksessä käytetään 100 °C:sta vettä. Oilonin ChillHeat sarjan kuumalämpöpumpulla pystyttiin korvaamaan aiemmin käytössä olleet öljykattilat. Asennetun järjestelmän teho on 372 kW ja COP-arvo 3.2 Hiilidioksidi päästöjä pystyttiin vähentämään merkittävästi, lisäksi laitteisto on huomattavasti pienempi ja toimintavarmempi kuin aikaisempi öljykattila. (Oilon 2020b.)

Calefa on Oilonin rinnalla merkittävä kuumalämpöpumppuja valmistava suomalainen yritys. Calefan kuumalämpöpumppuvalikoima on Oilonia hieman suppeampi, mutta tarjoaa korkeamaa lauhdelämpötilaa keskittyen kuitenkin erityisesti lämmitysratkaisuihin. Calefan AmbiHeat-sarjan kuumalämpöpumppu saavuttaa jopa 130 °C:n lämpötilan ja voi toimia siten useissa teollisuuslämmöntuotannon sovelluksissa. AmbiHeat lämpöpumpuilla tehoalue on 100 kW ja 3 MW välillä. COP-arvoksi Calefa lupaa jopa 7, mutta yleisesti suurilla tehoilla Calefan kuumalämpöpumpun COP-arvo on noin 3. (KylmäExtra 2020.)

4 Teollisuuslämmön tarve Suomessa

Suomen kokonaisenergiasta teollisuus kuluttaa merkittävimmän osuuden. Vuonna 2021 energiankulutus Suomessa oli yli 375 000 GWh. (Tilastokeskus 2022a) Vastaavasti samana vuonna teollisuuden energiankulutus oli yli 143 144 GWh eli lähes 40 % kokonaiskulutuksesta. (Tilastokeskus 2022b.) Teollisuuden energiankulutus on siis merkittävä osa Suomen koko energiankulutuksesta.

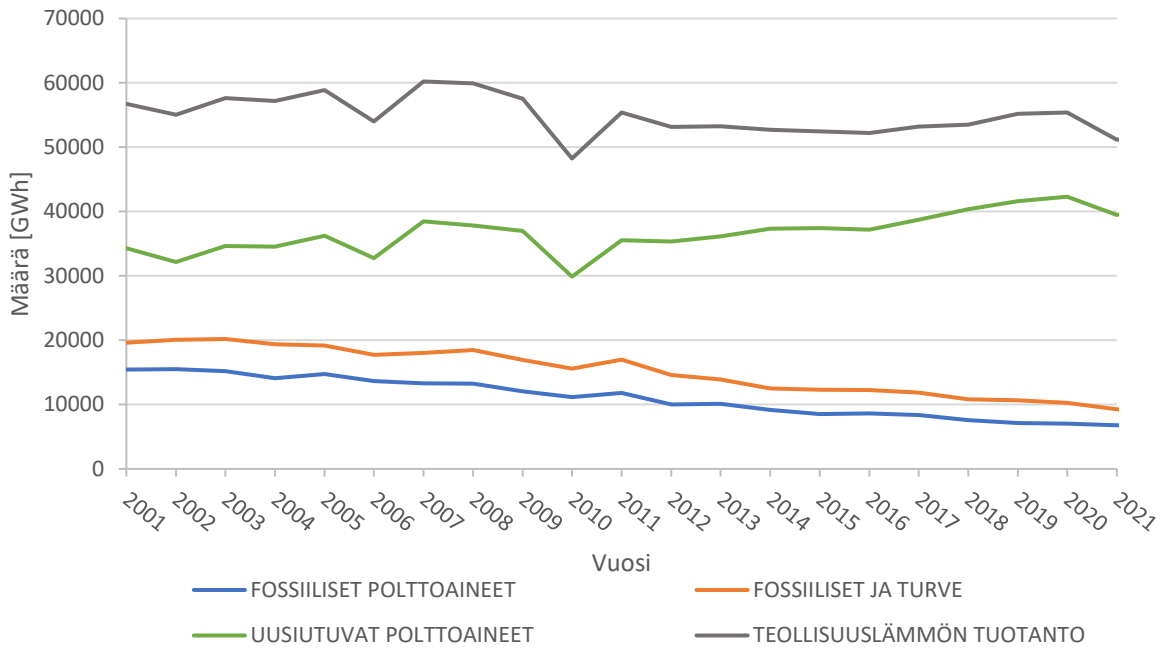
4.1 Teollisuuslämpö Suomessa

Vuonna 2021 teollisuuden energiankulutuksesta 52 222 GWh käytettiin teollisuuslämmöntuotantoon. Teollisuuslämmöllä tarkoitetaan teollisten prosessien itse käyttämää lämpöä ja höyryä esimerkiksi kuivaus ja erotus prosesseissa. Vaikka uusiutuvien energialähteiden osuus teollisuuslämmöntuotannosta on 79 %, jää myös fossiilisilla polttoaineilla tuotetun teollisuuslämmön osuus melko suureksi Suomen kokonaisenergiankulutuksesta. (Tilastokeskus 2022b.) Taulukossa 2 on ilmoitettu eri polttoaineiden aiheuttamat CO₂ päästöt sekä käyttömäärät teollisuuslämmöntuotannosta.

Taulukko 2. Teollisuuslämmöntuotannon CO₂ päästöt sekä käytetyt polttoainemäärät (Tilastokeskus 2022c, Tilastokeskus 2022d)

Polttoaine	Määrä [GWh]	CO ₂ [milj. t]
Öljy	1 598	1.0
Kivihiili	536	3.1
Maakaasu	3 781	2.8
Turve	1 968	3.9
Mustalipeä	27 364	15.8
Muut puupohjaiset polttoaineet	12 890	18.1
Polttoaineet yhteensä	52 222	44.6

Vastaavasti kuvassa 10 on esitettyä teollisuuslämmöntuotanto polttoainetyypeittäin. Kuvasta voidaan huomata, että vaikka uusiutuvien polttoaineiden kasvu on ollut merkittävää, ei fossiilisten polttoaineiden poistuminen ole riittävän nopeaa. (Tilastokeskus 2022c.)



Kuva 10. Teollisuuslämmöntuotanto Suomessa polttoainetyypeittäin 2001–2021 (Tilastokeskus 2022c)

Kuvasta 10 huomataan myös, että teollisuuslämmöntuotanto on pysynyt melko vakaana. Fossiilisten polttoaineiden osuus on vähentynyt samassa suhteessa, kuin uusiutuvien polttoaineiden osuus on kasvanut. Uusiutuvat polttoaineet eivät kuitenkaan välttämättä ole hiili-neutraaleita. Tästä syystä lämpöpumppujen potentiaali on suurempi, kuin mitä pelkkien fossiilisten polttoaineiden korvaaminen osoittaa. Tämä kuitenkin vaatii sen, että kuumaenergia pumpun käyttämä energia eli sähkö on tuotettu hiili-neutraalisti esimerkiksi tuulivoimalla.

Kun tarkastellaan tilannetta taulukon 2 avulla huomataan, että suurin yksittäinen hiilidioksidipäästöjen lähde on mustalipeän polttaminen. Vastaavasti vuonna 2021 Suomessa teollisuuslämmöstä 52 % tuotettiin mustalipeällä. (Tilastokeskus 2022c.) Tämä selittyy metsäteollisuuden suurella osalla koko Suomen teollisuussektorista. Tuotannosta 25 % tuotettiin muilla puupolttoaineilla. Lisäksi käytetään noin 17 % edestä fossiilisia polttoaineita. Nämä kaikki ovat polttoaineita, joiden lämmöntuottomenetelmät perustuvat polttamiseen. Teollisuuslämmöntuotannosta siis noin 95 % tuotettiin polttamalla. Vain 4.4 % teollisuuslämmöstä

tuotettiin muilla menetelmillä kuten lämpöpumpuilla ja sähkökattiloilla. (Tilastokeskus 2022c.)

4.2 Teollisuuslämmön lämpötila

Teollisuuslämmön lämpötila vaihtelee teollisuuden alojen ja prosessien mukaan. Kuuma-
lämpöpumpuille teknisesti soveltuva lämpötila alue on alle 200°C. Alle 200°C:nen teolli-
suuslämmön tarve voi olla höyryä tai lämpöä ja sen osuus kokonaislämmöntarpeesta on tyy-
pillisesti noin kolmasosa kokonaislämmöntarpeesta (SINTEF 2020). Taulukossa 3 on esitet-
tynä eräiden teollisuudenalan prosessien käyttämiä lämpötiloja. Kuten taulukosta huoma-
taan, on merkittävä osa kyseisten teollisuuden alojen tarvelämpötiloista alle 200 celsiusas-
teista. (Brückner S. et al. 2015.)

Taulukko 3. Prosessien käyttämä lämpötila teollisuuden toimialoittain (muokattu lähteestä
Brückner S. et al. 2015.)

Teollisuudenala	Prosessi	Lämpötila [°C]
Elintarviketeollisuus	Pastörinti	65
	Valkaisu	85
	Kypsennys	95–115
	Kuivaus	30–90
	Sterilisointi	140–150
Tekstiiliteollisuus	Kuivaus	75–250
	Höyrytys	100–130
	Peseminen	40–90
Kemianteollisuus	Keittäminen	95–105
	Tislaaminen	110–300
Paperiteollisuus	Paperimassan kuivaus	95–120
	Paperin kuivaus	95–120
Puuteollisuus	Kuivaus	70–90

Vastaavasti teollisuuden hukkalämpövirtojen lämpötila vaihtelee myös suuresti. Hukka-
lämpö on lämpöä, jonka lämpötilataso on liian matala käytettäväksi sellaisenaan kohde pro-
sessissa. Esimerkiksi elintarviketeollisuudessa hukkalämpövirrat voivat vaihdella 10:n ja 60
°C:n välillä, kun taas kemian teollisuudessa hukkalämmön lämpötila voi olla jopa yli 100°C.
(Brückner S. et al. 2015.)

5 Kuumalämpöpumpun hyödyntäminen teollisuuslämmöntuotannossa

Kuumalämpöpumpuilla on selkeää potentiaalia toimia prosessilämmöntuottajina Suomessa. Kuumalämpöpumppujen yhä kehittyessä on lähes kaikkien alle 200°C:ten prosessien vaatiman lämmöntuotto mahdollista tehdä erityyppisillä kuumalämpöpumpuilla. Prosessilämmöntuotannossa kuumalämpöpumppujen hyödyntämisen kannattavuus riippuu monista asioista. Merkittävimpänä rajaavana tekijänä teknisestä näkökulmasta on vaadittava lämpötilannosto. Kuten jo aikaisemmin mainittiin, heikkenee COP-arvo merkittävästi, mikäli yritetään päästä todella suuriin lämpötilannostoihin.

5.1 Kuumalämpöpumppujen edut

Etuina kuumalämpöpumpuille verrattuna polttomenetelmiin voidaan laskea ainakin sen suhteellisen helppo säädettävyyys. Varsinkin kompressorikumalämpöpumppua voidaan säädellä helposti esimerkiksi taajuusmuuttajalla. Tällöin kompressorin hyötysuhde kuitenkin heikkenee. Osakuormalla kompressorin vaatima teho on kuitenkin vähäisempi, joten osakuorma-ajo kannattaa. (Aittomäki A. & Aalto E. 2012).

Kuumalämpöpumppu voi olla todella kompakti ratkaisu ja mahtua pieneenkin tilaan. Kuumalämpöpumpun voi sijoittaa tehtaassa lähes mihin tahansa, eikä se vaadi esimerkiksi savukaasujen tai tuhkan poistoa. (Oilon 2022a.)

Merkittävimmät edut kuitenkin liittyvät kuumalämpöpumppujen päästöttömyyteen sekä niiden vähentämiin hukkalämpövirtoihin. Kuumalämpöpumppu toimii lähes poikkeuksetta sähköllä, joka voidaan tuottaa esimerkiksi tuulivoimalla tai aurinkoenergialla. Tällöin itse kuumalämpöpumppua voidaan pitää täysin hiilidioksidipäästövapaana. Hukkalämpövirrat saadaan taas minimoitua, sillä kuumalämpöpumppu voi nostaa muuten hukkaan menevän lämmön lämpötilaa siten, että se voidaan taas hyödyntää suoraan prosessissa. (Motiva 2014.)

5.2 Kuumalämpöpumppujen haasteet

Suurimpana haasteena kuumalämpöpumppujen käyttämisessä on riittämätön lämpötilannosto tai sen yrittämisestä johtuva liian alhainen COP-arvo. Kuten jo mainittiin, suurin osa teollisuuslämmöstä on yli 200°C:sta. Kuumalämpöpumpuilla korkeiden lämpötilojen tavoittelu vaatii aina myös korkean lämmönlähteen. Haasteena onkin riittävän korkean hukkalämmönlähteen löytäminen sekä komponentti kestävyys.

Haasteena voidaan pitää myös sähkön saatavuutta. Korkealla COP-arvolla sähkön tarve on pienempi, mutta samalla myös lämpötilannosto jää pienemmäksi. Teollisuuslämmöntuotannon sähköistyessä, sähkön kulutus tulee kasvamaan. Kulutuksen kasvaessa voi saatavuudessa ilmetä ongelmia.

Merkittävänä haasteena voidaan pitää investoinnin hintaa, sekä sitä kautta muodostuvaa takaisinmaksuaikaa. Kuumalämpöpumput ovat vielä uutta teknologiaa ja niiden investoinnin arvo on usein korkea. Lisäksi haasteena SINTEFin artikkelin mukaan voidaan pitää ostajien tiedon puutetta sekä valmistajien vähäisyyttä. Lisäksi kuumalämpöpumppujen asennus- ja huoltotoimista ei ole riittävästi tietotaitoa. (SINTEF 2020.)

5.3 Päästöt

Kuumalämpöpumpuilla voidaan vähentää hiilidioksidipäästöjä. Kuumalämpöpumpulla tuotettua teollisuuslämpöä voidaan pitää täysin hiilidioksidivapaana. Teoriassa kaikki alle 200°C:n teollisuuslämmöntuotanto voitaisiin korvata kuumalämpöpumpulla. Tämä tarkoittaisi noin kolmasosaa koko teollisuuslämmöntuotannosta aiheutuvista hiilidioksidipäästöistä eli taulukon 2 perusteella noin 15 miljoonaa tonnia hiilidioksidia. Hiilidioksidipäästöjen vähennyspotentiaali on merkittävä. Lisäksi päästöjä vähenee, kun polttoainetta ei tarvitse enää kuljettaa valmistuspaikalta käyttöpaikalle.

6 Johtopäätökset

Tässä työssä pyrittiin selvittämään kuumalämpöpumppujen mahdollisuuksia toimia teollisuuslämmön tuottajina Suomen teollisuudessa. Työssä selvisi, että kuumalämpöpumpuilla on mahdollisuus toimia teollisuuslämmöntuottajana noin 200°C:n lämpötilatasoon asti. Lisäksi huomattiin, että kuumalämpöpumppujen kehitys on vielä kesken ja kehitystyötä tehdään jatkuvasti. Suomen teollisuudelle parhaiten soveltuva kuumalämpöpumpputyyppe on työn perusteella kompressorikuumalämpöpumppu.

Vaikka kuumalämpöpumppujen kehitystyö on vielä kesken, löytyy toimivista kuumalämpöpumppu sovelluksista jo näyttöä. Kuumalämpöpumppujen laajempaa käyttöönottoa ajatellen valmistajia on kuitenkin todella rajallisesti. Lisäksi kuumalämpöpumppujen lämpötilannosto vaikuttaa vielä suuresti COP-arvoon. Tällä hetkellä parhaiten teollisuuslämmöntuotantoon soveltuu erityyppiset kompressorikuumalämpöpumput. Ympäristöystävällisyyteen keskittyminen on johtanut kuumalämpöpumpuissa luonnollisiin kylmäaineisiin. Niiden käyttö vaatii vielä lisää tutkimus- ja kehitystyötä, mutta näyttöä esimerkiksi hiilidioksidista, vedestä ja ammoniakista kylmäaineina on jo. Tulevaisuudessa, valmistajien lisääntyessä ja teknologian kehittyessä, voidaan kuumalämpöpumppuja pitää potentiaalisena vaihtoehtona teollisuuslämmöntuotannossa.

Teollisuuslämmöntuotanto Suomessa tapahtuu pitkälti mustalipeällä. Mustalipeä on metsäteollisuuden sivuvirta, joten sen polttaminen hyödyksi on kannattavaa. Teollisuuslämmöntuotannosta kuumalämpöpumpuilla korvattava osuus on lähinnä fossiilistenpolttoaineiden ja muiden, ei sivuvirtojen, osuus lämmöntuotannosta. Myös metsäteollisuudessa kuumalämpöpumpuilla voidaan vähentää hukkalämpövirtoja, mutta suurin potentiaali on muilla teollisuuden aloilla.

Eri teollisuudenalat vaativat erilaisia käyttölämpötiloja. Kuumalämpöpumpuille potentiaalista lämpötila-aluetta voidaan pitää alle 200°C:ssa. Kuumalämpöpumpulla saavutettu suurin lämpötila on tällä hetkellä 280°C. Kuumalämpöpumpuille otollisimmat teollisuudenalat ovat tästä syystä elintarviketeollisuus, tekstiiliteollisuus ja kemianteollisuus. Erityisesti elintarviketeollisuudessa käytetään paljon noin 100 celsiusasteista vettä ja höyryä, joka voitaisiin tuottaa helposti kuumalämpöpumpulla.

Kuumalämpöpumppujen mahdollisuus vähentää hiilidioksidipäästöjä Suomen teollisuudessa on olemassa. Päästövähennysten arvioiminen olemassa olevalla tiedolla on hyvin suppeaa ja rajallista. Tarkempi hiilidioksidipäästöjen vähentymisen arvioiminen vaatisi laajempaa tutkimusta. Johtuen mustalipeän laajasta käytöstä ja fossiilisten polttoaineiden pienestä osuudesta ei kuumalämpöpumppujen mahdollistama hiilidioksidipäästöjen vähentäminen ole yhtä suurta Suomessa kuin esimerkiksi keski-Euroopassa. Kuumalämpöpumppujen lämmöntuottopotentiaalin silti säilyessä suurena.

Työssä tehty selvitys kuumalämpöpumppujen soveltuvuudesta teollisuuslämmöntuotannossa tulisi tehdä uudestaan, mikäli kuumalämpöpumppujen kehityksessä tapahtuisi merkittäviä muutoksia. Mikäli Suomen teollisuuslämmöntuotannossa tapahtuisi merkittävää muutosta olisi mielekästä tarkastella soveltuvuutta uudelleen. Tässä työssä päästöjen laskenta oli rajallista niukasti saatavissa olevan tiedon takia. Jatkotutkimuksena voisi selvittää tarkemmin eri teollisuusalojen aiheuttamia päästöjä sekä niihin käytettyjä polttoaineita, jotta voitaisiin selvittää tarkasti kuumalämpöpumppujen hiilidioksidipäästöjen vähennyspotentiaali. Lisäksi jatkotutkimuksessa olisi mielekästä arvioida kuumalämpöpumppujen takaisinmaksuaikoja eri teollisuudenprosesseissa. Toinen hyvä jatkotutkimusaihe liittyy teollisuuslämmön käyttölämpötiloihin. Kuumalämpöpumppujen kannalta olisi mielekästä selvittää todelliset käyttölämpötilat eri teollisuuden aloilla ja prosesseissa.

Lähteet

Adamson Keri-Marie; Walmsley Timothy Gordon; Carson James K.; Chen Qun; Schlosser Florian; Kong Lana; Cleland Donald John. 2022. High-temperature and transcritical heat pump cycles and advancements: A review. *Renewable & sustainable energy reviews*.

Aittomäki Aapo & Aalto Esa 2012. *Kylmäteknikka*. 4. p. Helsinki: Suomen kylmähdistys.

Arpagaus Cordin; Bless Frédéric; Uhlmann Michael; Schiffmann Jürg; Bertsch Stefan S. 2018. High temperature heat pumps: Market overview, state of the art, research status, refrigerants, and application potentials. *Energy*, Volume 152, s. 985–1010

ASHAE 2020. Update on New Refrigerants Designations and Safety Classifications. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 15.1.2023]. Saatavilla: <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/29025>

Bamigbetan Opeyemi ; Eikevik Trygve M. ; Nekså Petter ; Bantle Michael. 2017. Review of vapour compression heat pumps for high temperature heating using natural working fluids. *International journal of refrigeration*.

Brückner Sarah; Liu Selina; Miró Laia; Radspieler Michael; Cabeza Luisa F.; Lävemann Eberhard. 2015. Industrial waste heat recovery technologies: An economic analysis of heat transformation technologies. *Applied energy*.

Dinçer Ibrahim & Kanoglu Mehmet 2010. *Refrigeration systems and applications*. 2nd ed. Chichester, West Sussex, U.K.: Wiley.

EHPA 2015. Energy Efficiency in industrial processes - the role of heat pumps. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 24.10.2022]. Saatavilla: https://www.ehpa.org/index.php?id=94&L=0&tx_news_pi1%5Bnews%5D=1073&tx_news_pi1%5Bcontroller%5D=News&tx_news_pi1%5Baction%5D=detail&cHash=8fb65a812101c275381163e6458004f9

EHPA 2019. Large scale heat pumps in Europe vol 1 & 2. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 24.10.2022]. Saatavilla: <https://www.ehpa.org/technology/heat-pump-applications/industrial-applications/>

Grassi Walter 2018. Heat Pumps Fundamentals and Applications. Springer International Publishing.

Hakala Pertti & Kaappola Esko 2007. Kylmälaitoksen suunnittelu. 2. p. Jyväskylä: Opetushallitus.

IEA 2022. Task 1: Technologies – State of the art and ongoing developments for systems and components. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 18.2.2023]. Saatavilla: <https://heatpumping-technologies.org/annex58/task1/>

Jiang Jiatong; Hu Bin; Wang R.Z.; Deng Na; Cao Feng; Wang Chi-Chuan. 2022. A review and perspective on industry high-temperature heat pumps. Renewable & sustainable energy reviews.

KylmäExtra 2020. Suomi suuntaa lämpöpumppuihin. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 1.2.2023]. Saatavilla: https://www.kylmaextra.fi/lehdet/kylmaextra_1_2020/suomi_suuntaa_lampopumppuihin

Motiva 2013. Tuotannon hukkalämpö hyödyksi. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 29.10.2022]. Saatavilla: https://www.motiva.fi/ajankohtaista/julkaisut/teollisuus/tuotannon_hukkalampo_hyodyksi.10766.shtml

Motiva 2014. Ylijäämälämmön taloudellinen hyödyntäminen. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 10.1.2023]. Saatavilla: https://www.motiva.fi/yritykset/ohjeita_ja_vinkkeja_tehokkaaseen_energian-_ja_materiaalien_kayttoon/tuotannon_ylijaamalampo_hyodyksi

Oilon 2020a. ChillHeat, Teollisuuslämpöpumput ja vedenjäähdyttimet. [Tuote esite] [viitattu 4.2.2023]. Saatavilla: <https://oilon.com/fi/tuotteet/teollisuuslampopumput/>

Oilon 2020b. Jackon-tehdas, Muurla. [Verkkojulkaisu] [Viitattu 5.2.2023]. Saatavilla: <https://oilon.com/fi/references/jackon-tehdas-muurla/>

Schlosser Florian.; Jesper Mateo.; Vogelsang J.; Walmsley Timothy Gordon.; Arpagaus Cordin.; Hesselbach Jens. 2020 Large-scale heat pumps: Applications, performance, economic feasibility and industrial integration. Renewable & sustainable energy reviews.

SINTEF 2020. Strengthening Industrial Heat Pump Innovation. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 25.10.2022]. Saatavilla: <https://sintef.brage.unit.no/sintef-xmlui/handle/11250/2764774>

SINTEF 2021. Developing the world's 'hottest' heat pump ever. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 3.1.2023]. Saatavilla: <https://www.sintef.no/en/latest-news/2021/developing-the-worlds-hottest-heat-pump-ever/>

Tilastokeskus 2022a. Teollisuuden energiankäyttö. Tietokantataulukko 11wy. Teollisuuden energiankäyttö toimialoittain. Helsinki. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu: 3.11.2022]. ISSN=1798-775X. 2020. Saatavilla: <https://stat.fi/tilasto/tene>

Tilastokeskus 2022b. Energian hankinta ja kulutus. Liitetaulukko 1. Energian kokonaiskulutus energialähteittäin 2021. Helsinki. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu: 30.11.2022]. ISSN=1799-795X. Saatavilla: <https://stat.fi/tilasto/ehk>

Tilastokeskus 2022c. Sähkön ja lämmön tuotanto. Liitetaulukko 2. Sähkön ja lämmön tuotanto tuotantomuodoittain ja polttoaineittain 2021. Helsinki. [Verkkajulkaisu] [Viitattu: 30.11.2022]. ISSN=1798-5072. Saatavilla: <https://stat.fi/julkaisu/cku28dfkw805d0b9922uxoyep>

Tilastokeskus 2022d. Polttoaineluokitus 2022. Helsinki. [Verkkajulkaisu] [Viitattu: 5.1.2023]. Saatavilla: https://www.stat.fi/tup/khkinv/khkaasut_polttoaineluokitus.html

Työ- ja elinkeinoministeriö 2022. Hiilineutraali Suomi 2035 – kansallinen ilmasto- ja energiastrategia. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 25.10.2022]. Saatavilla: <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/164321>

Liitteet

Liite 1. Kuumalämpöpumppujen tunnuslukuja (muokattu lähteestä Jiang, J. et al. 2022)

	Kierto	Kylmäaine	Kompressori	Lämmön- lähde [°C]	Saavutettu lämpötila [°C]	Lämmitysteho max. [kW]
1	Yksivaihei- nen puristus	R601	Ruuvi	40–90	90–130	400
2		R1336mzz(Z)	Mäntä	50–105	70–160	12
3		H ₂ O	Keskipako	65–90	90–110	500
4		R245fa	Ruuvi	25–45	70–120	12
5	Yksivaihei- nen puristus ja nesteruiskutus	H ₂ O	Tuplaruuvi	80–100	110–120	380
6		H ₂ O	Tuplaruuvi	70–85	105–130	230
7	Yksivaihei- nen puristus ja välijäähdytys	R1336mzz(Z)	Mäntä	45–90	65–160	12
8		CO ₂	Mäntä	0–10	70–90	60
9	Kaskivaihei- nen puristus eri sovelluk- silla	R1234ze(E)	Turbo	10–30	70–95	20 000
10		H ₂ O	Keskipako	85–90	110–130	700
11		NH ₃	Tuplaruuvi	81–85	111–131	1618
12	Portaittainen	R245fa/ H ₂ O	-	58–62	110–130	40
13		R290/R600	Mäntä	18–80	90–110	30
			Tuplaruuvi	-1–1	90–110	20
14	R410A/R245fa/ H ₂ O	Tuplaruuvi	2–38	121–125	470	
15	Absorptio	NH ₃ -H ₂ O	Keskipako	45–50	85–90	79
16		NH ₃ -H ₂ O	-	-	110–130	10