

Opinnäytetyö (AMK)

Konetekniikka

2024

Jussi Välimäki

# Vahteruksen lämmönsiirtimillä varustettujen teollisten lämpöpumppujen lämmönlähteet

Opinnäytetyö (AMK) | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Konetekniikka

2024 | 44 sivua

Jussi Välimäki

## Vahteruksen lämmönsiirtimillä varustettujen teollisten lämpöpumppujen lämmönlähteet

Opinnäytetyössä tarkastellaan teollisten lämpöpumppujen lämmönlähteitä ja niiden soveltuvuutta Vahterus Oy:n valmistamien lämmönsiirtimien kanssa käytettäviin järjestelmiin. Työ tehtiin toimeksiantona Vahterus Oy:lle, ja sen tarkoituksena on antaa kattava kuvaus nykyisistä sovelluskohteista ja arvioida tulevaisuuden markkinapotentiaalia erityisesti energia- ja ympäristötehokkuuden näkökulmasta.

Työn tavoitteena on selvittää, kuinka tehokkaasti erilaisia lämmönlähteitä voidaan hyödyntää teollisissa lämpöpumpuissa, joissa käytetään Vahteruksen lämmönsiirtimiä. Lisäksi tutkittiin Vahteruksen lämmönsiirtimien erityispiirteitä, kuten korkean paineenkestävyyden ja kompaktin rakenteen vaikutusta lämpöpumppujen käyttömahdollisuuksiin.

Työn perusteella voidaan päätellä, että teollisten lämpöpumppujen ja niiden lämmönsiirtimien käyttömahdollisuudet tulevat todennäköisesti laajenemaan entisestään, kun teollisuuden energiatehokkuusvaatimukset ja ympäristöystävällisyys korostuvat. Tulosten perusteella voidaan kartoittaa uusia sovellusmahdollisuuksia sekä kehittää tulevia asiakasprojekteja Vahterukselle.

Asiasanat:

teollinen lämpöpumppu, lämmönsiirrin, lämmönlähde, uusiutuva energialähde, energiatehokkuus

Bachelor's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Mechanical Engineering

2024 | 44 pages

Jussi Välimäki

## Heat sources for industrial heat pumps equipped with Vahterus heat exchangers

The thesis was commissioned by Vahterus Oy, and the objective was to examine heat sources for industrial heat pumps and their suitability for systems utilizing heat exchangers manufactured by Vahterus Oy. The objective of this work was also to provide a comprehensive overview of the current applications and to assess the future market potential, particularly from the perspectives of energy and environmental efficiency.

The study aimed to determine how effectively various heat sources could be utilized in industrial heat pumps with Vahterus heat exchangers. Additionally, it investigates the specific characteristics of Vahterus heat exchangers, such as high pressure resistance and compact design, and their effect on the applicability of heat pumps.

Based on this study, it can be concluded that the potential applications of industrial heat pumps and these heat exchangers are likely to expand further as energy efficiency requirements and environmental sustainability become more emphasized in the industry. The results are valuable for Vahterus in identifying new application opportunities and in developing future customer projects.

Keywords:

industrial heat pump, heat exchanger, heat source, renewable energy source, energy efficiency

# Sisältö

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Käytetyt lyhenteet tai sanasto</b>                     | <b>6</b>  |
| <b>1 Johdanto</b>   | <b>7</b>  |
| <b>2 Vahterus Oy</b>                                      | <b>8</b>  |
| <b>3 Kylmäteknikka ja teolliset lämpöpumput</b>           | <b>9</b>  |
| 3.1 Kylmäaineet ja uusi F-kaasuasetus                     | 11        |
| 3.2 Teolliset lämpöpumput                                 | 12        |
| 3.2.1 Järjestelmät  | 14        |
| 3.2.2 Komponentit   | 15        |
| 3.2.3 COP   | 17        |
| 3.2.4 Lämpöpumppujen markkinapotentiaali                  | 20        |
| 3.3 Lämmön siirtyminen                                    | 21        |
| 3.3.1 Levylämmönsiirrin                                   | 22        |
| 3.3.2 Putkilämmönsiirrin                                  | 24        |
| 3.3.3 Vahterus Plate & Shell -lämmönsiirrin               | 25        |
| <b>4 Lämmönlähteet</b>                                    | <b>28</b> |
| 4.1 Käytetyimmät lämmönlähteet teollisilla lämpöpumpuilla | 28        |
| 4.1.1 Hukkalämmöt   | 29        |
| 4.1.2 Vesistölämmöt                                       | 30        |
| 4.1.3 Ulko- ja poistoilma                                 | 31        |
| 4.1.4 Maalämpö  | 31        |
| 4.1.5 Jätevesilämmöt                                      | 32        |
| 4.2 Lämmönlähteiden arviointi                             | 33        |
| <b>5 Sovellukset Vahteruksen lämmönsiirtimillä</b>        | <b>35</b> |
| 5.1 Vilter by Copeland                                    | 36        |
| 5.2 Malmön kaukolämpöhanke                                | 38        |
| 5.3 Queens Quay   | 39        |
| <b>6 Johtopäätökset</b>                                   | <b>41</b> |

|                |           |
|----------------|-----------|
| <b>Lähteet</b> | <b>42</b> |
|----------------|-----------|

## **Kuvat**

|   |    |
|---|----|
| Kuva 1. Vahteruksen levylämmönsiirtimet (Vahterus 2024).  | 8  |
| Kuva 2. Yksinkertainen kylmätekninen kiertoprosessi ja log p, h -piirros (Areacademy 2022).                     | 9  |
| Kuva 3. Ammoniakin log p, h -diagrammi (IndustrialHeatPumps.nl n.d.).   | 11 |
| Kuva 4. Lämpöpumpun tehokkuus (Sweco 2024).   | 18 |
| Kuva 5. Lämpöpumppujen ennustettu kasvu kaukolämpö- ja prosessilämmityssovelluksissa (McKinsey & Company 2024). | 21 |
| Kuva 6. Levyn muodon vaikutus rasituksen jakautumiseen (Vahterus 2024).   | 23 |
| Kuva 7. Putkilämmönsiirtimen rakenne (Mechanical Knowledge 2023).   | 24 |
| Kuva 8. Vahteruksen näyttelysiirrin kuvattuna Chillventa-messuilla 10/2024.                                     | 26 |
| Kuva 9. Lämmönlähteet ja niiden hyödyntäminen eri sovelluksissa (European Heat Pump Association 2022).          | 28 |
| Kuva 10. Lämmönlähde ja lämpönielu (International Energy Agency n.d.).  | 32 |
| Kuva 11. Vilterin VQ95-malli kuvattuna Chillventa-messuilla.  | 37 |
| Kuva 12. GEA:n Malmön lämpöpumppu (GEA n.d.).   | 38 |
| Kuva 13. Queens Quayn lämpöpumppu (Vahterus n.d.).  | 40 |

## **Taulukot**

|   |    |
|---|----|
| Taulukko 1. Lämpötilojen vaikutus COP-arvoon. | 19 |
|---|----|

## Käytetyt lyhenteet tai sanasto

|                 |   |
|-----------------|---|
| CFC             | Kloorifluorhiilivedyt                         |
| CO <sub>2</sub> | Hiilidioksidi                                 |
| COP             | Lämpö- ja kylmäkerroin                        |
| GWP             | Lämmityspotentiaali                           |
| HC              | Hiilivedyt                                    |
| HCFC            | Osittain halogenoidut kloorifluorihiiilivedyt |
| HCFO            | Hydrokloorifluorolefiini                      |
| HFC             | Fluorihiiilivedyt                             |
| HFO             | Hydrofluorolefiini                            |
| NH <sub>3</sub> | Ammoniakki                                    |
| ODP             | Otsonituhopotentiaali                         |
| PFC             | Perfluorihiiilivedyt                          |

# 1 Johdanto

Teollisten lämpöpumppujen käyttö ja kysyntä ovat kasvaneet merkittävästi viime vuosina, kun yritykset ja yhteisöt pyrkivät vähentämään energiankulutustaan ja pienentämään hiilijalanjälkeään. Lämpöpumput tarjoavat mahdollisuuden hyödyntää uusiutuvia energianlähteitä sekä kierrättää teollisuudessa syntyvää hukkalämpöä. Tämä on arvokasta teollisessa mittakaavassa, jossa energiankulutus on suurta ja kestävien ratkaisujen vaikutukset merkittäviä niin ympäristön kuin kustannustenkin kannalta. Teollisten lämpöpumppujen avulla voidaan tuottaa korkeita lämpötiloja tehokkaasti, ja ne tarjoavat joustavia ratkaisuja monenlaisiin lämmönlähteisiin ja käyttökohteisiin, mikä tekee niistä keskeisen teknologian hiilineutraaleissa ja energiataloudellisissa prosesseissa.

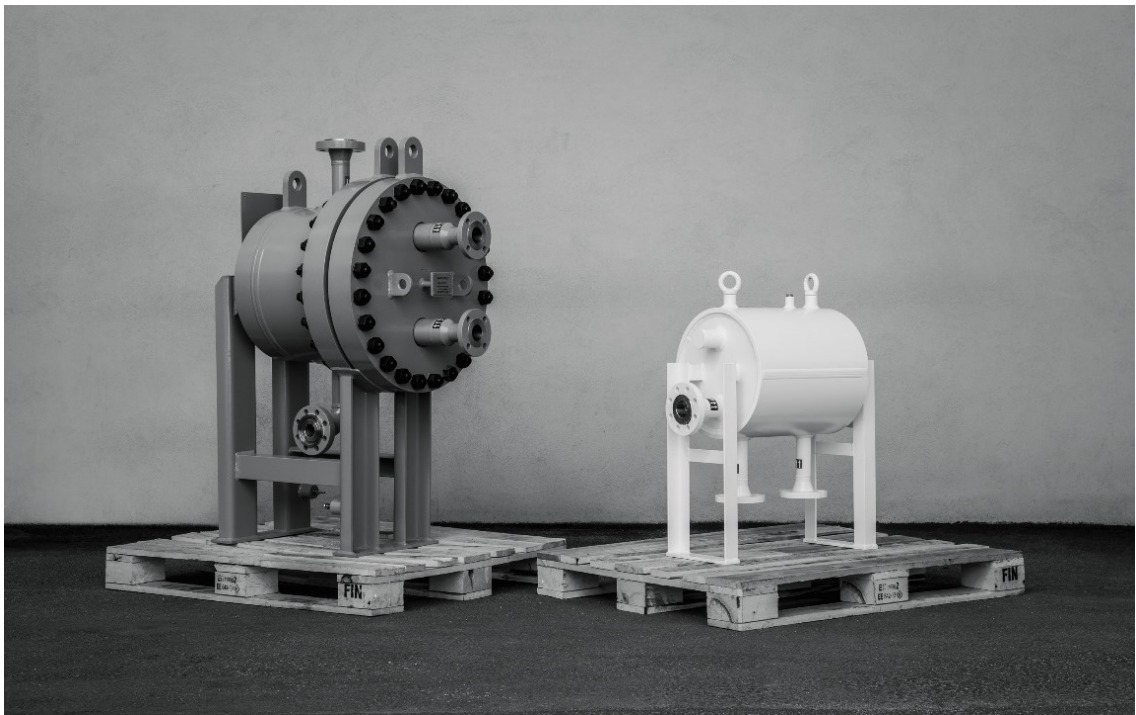
Tässä opinnäytetyössä, jonka toimeksiantajana toimii Vahterus Oy, perehdytään teollisten lämpöpumppujen lämmönlähteisiin ja niiden soveltuvuuteen Vahteruksen lämmönsiirtimillä varustetuissa järjestelmissä. Vahterus Oy on tunnettu innovatiivisista Plate & Shell -lämmönsiirtimistään, jotka yhdistävät levylämmönsiirtimien tehokkuuden ja kompaktin koon putkilämmönsiirtimien kestävyteen. Näiden siirtimien käyttömahdollisuuksien kartoitus teollisissa lämpöpumpuissa antaa kattavan kuvan siitä, miten tehokkaasti erilaisia lämmönlähteitä, kuten hukkalämpöä, vesistöjä ja jätevesiä, voidaan hyödyntää. Vahteruksen teknologia mahdollistaa lämpöpumppujen tehokkaan käytön vaativissa teollisuusympäristöissä, joissa korkea paineenkestävyys ja tehokas lämmönsiirto ovat ensiarvoisen tärkeitä.

Työn tavoitteena on laatia Vahterukselle selvitys, joka käsittelee heidän levylämmönsiirtimillään varustettujen teollisten lämpöpumppujen erilaisia lämmönlähteratkaisuja. Selvityksen kautta saadaan selkeä kuva tämänhetkisistä käyttökohteista ja teollisten lämpöpumppujen markkinapotentiaalista eri sovelluksissa. Lisäksi työ antaa näkymiä markkinan tulevaisuudesta, kun siirrytään kohti hiilineutraaleja ratkaisuja. Työ tarjoaa kattavan pohjan ymmärtää ja ennakoida alan kehitystä sekä tunnistaa kasvumahdollisuudet niin kotimaisilla kuin kansainvälisilläkin markkinoilla.

## 2 Vahterus Oy

Vahterus on vuonna 1990 perustettu kalantilainen perheyrittys, joka työllistää noin 600 ihmistä Suomessa ja ulkomailla. Vahterus valmistaa hitsattuja levylämmönsiirtimiä erilaisiin energia-, prosessi- ja kemianteollisuuden sekä kylmätekniikan sovelluksiin. Vahterus on vakiinnuttanut asemansa yhtenä levylämmönsiirron johtavana toimijana sekä saanut tunnustusta innovatiivisista ja ympäristöystävällisistä tuotteistaan maailmanlaajuisin patentein ja palkinnoin. Yritys panostaakin jatkuvasti tuotekehitykseensä sekä kehittää toimintaansa automatisoidun tuotantoteknologian sekä vahvan sovellusosaamisen avulla.

Vahteruksella on Suomessa sijaitsevan pääkonttorin ja tuotantolaitoksen lisäksi tytäryhtiöt Saksassa, Iso-Britanniassa, Yhdysvalloissa ja Kiinassa, jossa sillä on myös erillinen kokoonpanotehdas. (Vahterus 2024)

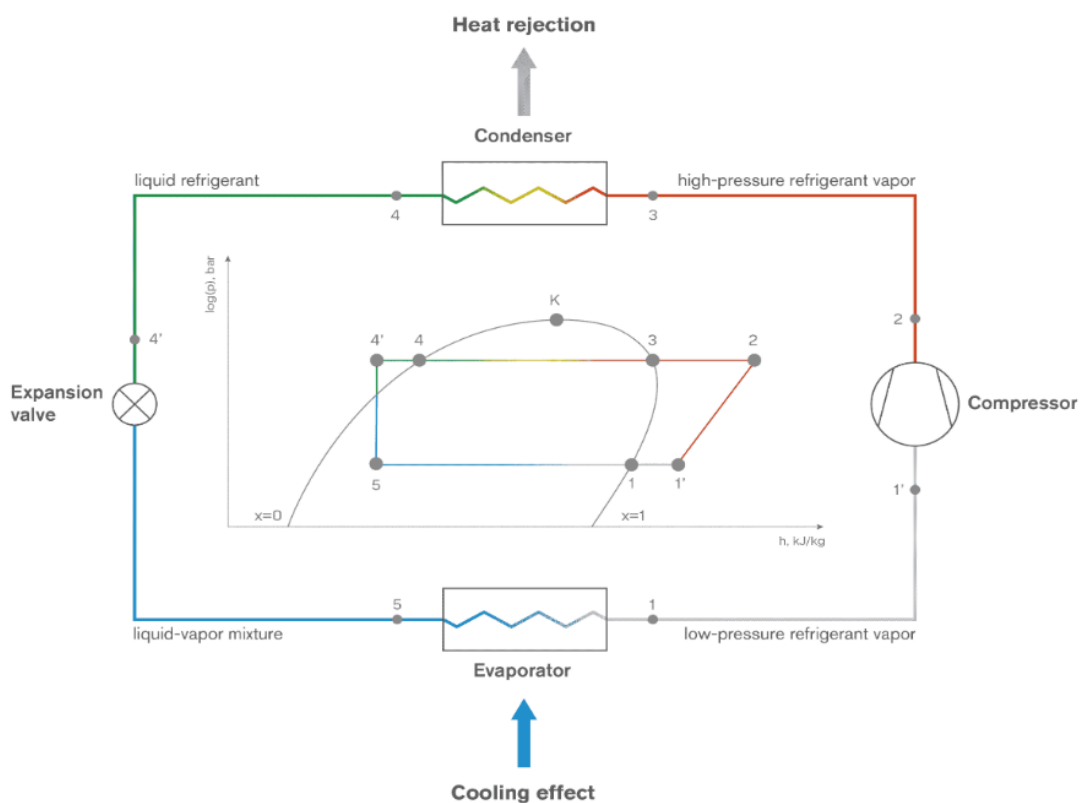


Kuva 1. Vahteruksen levylämmönsiirtimet (Vahterus 2024).



### 3 Kylmätekniikka ja teolliset lämpöpumput

Kylmätekniinen kiertoprosessi perustuu kylmäaineen höyrystämiseen ja lauhduttamiseen, jotka tapahtuvat eri painetasoilla. Niiden avulla voidaan sitoa lämpöä yhdestä kohteesta ja luovuttaa se haluttuun käyttökohteeseen kylmäainetta hyödyntämällä. Kuvassa 2 on esitetty yksinkertainen kylmäprosessi sekä log p, h -kaavio eli paine-entalpia-tilapiirros, jolla voidaan esittää kylmäaineen eri olomuodot rajakäyrällä. (Kaappola ym. 2011, 17.)

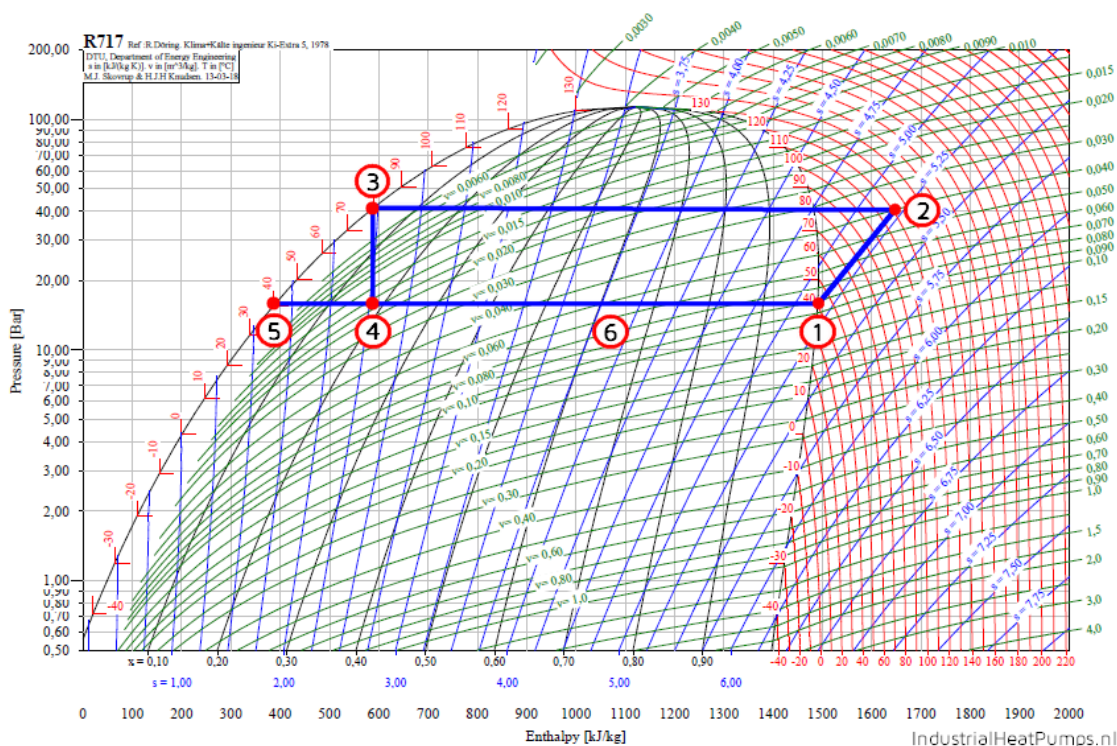


Kuva 2. Yksinkertainen kylmätekniinen kiertoprosessi ja log p, h -piirros (Areacademy 2022).

Kylmätekniinen kierto alkaa vaiheesta yksi, eli höyrystimestä, jossa matalapaineinen ja -lämpötilainen kylmäaine sitoo lämpöä ympäristöstään ja höyrystyy. Vaiheessa kaksi höyrystynyt kylmäaine imetään kompressoriin, jossa se puristuu korkeaan paineeseen sekä tulistuu korkeaan lämpötilaan. Tulistunut

höyry johdetaan vaiheessa 3 lauhduttimeen, jossa kylmäaine lauhtuu ja prosessiin tehdyllä työllä saavutettu lämpö luovutetaan haluttuun kohteeseen. Lauhduttimessa kylmäaine muuttuu jälleen olomuotoaan tiivistymällä nesteeksi. Neljännessä vaiheessa tiivistynyt neste johdetaan paisuntalaitteelle, joka laskee nesteen lämpötilaa ja painetta ennen sen palaamista höyrystimelle. Osa nesteestä höyrystyy jo tässä vaiheessa. Viimeisessä vaiheessa neste-höyryseos palaa höyrystimelle ja kiertoprosessi alkaa jälleen alusta. (Kaappola ym. 2011, 17–18.)

Lämpöpumpun toimintaperiaatteen ymmärtämiseksi voidaan käyttää tukena log p, h -diagrammia, jolla voidaan tutkia tarkemmin kriittisiä pisteitä, kuten höyrystymis- ja lauhdumislämpötiloja tietyssä paineessa. Kuvassa 3 on esitetty luonnollisen kylmäaineen, ammoniakkin, jonka nimityksinä käytetään myös R717 tai NH<sub>3</sub>, tilamuuttajat. Pystyakselilla on esitetty paine logaritmisella asteikolla ja vaaka-akselilla taas kylmäaineen entalpia, joka ilmaisee aineen sisäistä energiaa. Entropiaksi, kuvattuna sinisellä, kutsutaan saatua lämpö määrää jaettuna absoluuttisella lämpötilalla. Kuvan mustalla käyrällä osoitetaan kylmäaineen faasimuodot. Käyrän vasemmassa reunassa aine on saavuttanut kylläisen nesteen olomuodon, kun taas oikeassa reunassa olomuoto on kylläinen höyry. Keskellä faasimuoto on jotain näiden kahden väliltä. Mitä lähempänä ollaan vasenta puolta, sitä enemmän aineen olomuoto on nestefaasissa, ja toisaalta jos mennään oikealle päin, aine saavuttaa enemmän höyryfaasin. (Hakala & Kaappola 2007, 11–14.)



Kuva 3. Ammoniakin log p, h -diagrammi (IndustrialHeatPumps.nl n.d.).

### 3.1 Kylmäaineet ja uusi F-kaasuasetus

Kylmäaineiksi kutsutaan nesteytettyjä kaasuja, jotka toimivat väliaineina kylmäkoneiston lämmönsiirrossa. Kylmäaineiden hyödyntäminen kylmäkoneistossa perustuu niiden kykyyn muuttaa faasiaan nesteestä kaasuksi, kun ne ottavat vastaan ympäristön lämpöä, ja puolestaan kaasusta nesteeksi, kun ne luovuttavat lämmön ympäristöönsä. Hyvän kylmäaineen termodynaamiset ominaisuudet ovat korkea höyrystymislämpö, matala viskositeetti, pieni kompressorin painesuhde, hyvät lämmönsiirto-ominaisuudet, suuri tilavuustuotto sekä yli yhden baarin höyrystymispaine. Kemialliselta rakenteeltaan kylmäaineen tulisi olla mahdollisimman stabiili, ei saisi reagoida aktiivisesti sekä olla palamatonta ja hyvin liukenevaa käytettävän kompressorijölyn kanssa. Lisäksi fysiologisesti sen tulisi olla mahdollisimman myrkytön, ei-ärsyttävä iholle ja limakalvoille, haitaton jäähdytettävälle kohteelle sekä helposti havaittava vuotojen osalta. (Kaappola ym. 2011, 31–32.)

Aiemmin mainittujen lisäksi, kylmäaineen tulisi olla halpa ja ympäristöystävällinen. Sen haitallinen vaikutus ilmakehän otsonikerrokselle ja ilmaston lämpenemiselle, eli kasvihuoneilmiölle, pitäisi olla mahdollisimman vähäinen tai olematon. Näitä voidaan mitata kahdella tunnusluvulla: ODP- ja GWP-luvuilla. ODP, eli Otzone Depletion Potential, kertoo kylmäaineen suhteellisen otsonihaitallisuuden, kun taas GWP, eli Global Warming Potential, kertoo ilmaston lämpenemispotentiaalin. Mitä korkeampia luvut ovat, sitä enemmän kylmäaine aiheuttaa haittaa kyseisille ilmiöille. (Kaappola ym. 2011, 32.)

Kylmäaineet jaotellaan lainsäädännöllisesti halogeenimolekyylin mukaan. Kaikki kylmäaineet ovat pääsääntöisesti hiilivetyjä, joiden vetyatomeja on prosessoimalla korvattu halogeenimolekyyleillä. Halogeenihiilivetyjä ovat CFC-, HCFC-, HFC- ja PFC-kylmäaineet. Osittain halogenoituja hiilivetyjä ovat synteettiset kylmäaineet, kuten HFO- ja HCFO-aineet. Lisäksi on täysin halogeenivapaita kylmäaineita, joita kutsutaan luonnollisiksi kylmäaineiksi. Näitä ovat ammoniakki (R717) ja hiilidioksidi (R744), joita käytetään usein Vahteruksen siirtimillä varustetuissa lämpöpumpuissa, sekä vesi ja puhtaat hiilivedyt (HC), kuten isobutaani (R600a), propaani (R290) ja propeenit (R1270). (Hakala & Kaappola, 23–26.)

Euroopan neuvosto ja parlamentti asetti uuden F-kaasuasetuksen 2024/573, joka tuli voimaan 11.03.2024. Asetuksella vähennetään ensin asteittain fluorattujen aineiden tai niiden seosten käyttämistä, ja ne pyritään lopulta poistamaan markkinoilta vuoteen 2050 mennessä. Asetus koskee käytännössä kaikkia fluoria sisältäviä kylmäaineita, kuten HFC-, PFC- ja HFO-aineet. Myös kaikki fluoratuista kaasuista riippuvaiset tuotteet, laitteet ja niiden osat tulivat uuden asetuksen piiriin. (Kapanen 2024)

### 3.2 Teolliset lämpöpumput

Nyky päivänä kaupungistuminen, ilmastomuutos sekä geopoliittiset muutokset ajavat teollisten lämpöpumppujen kysynnän kasvua. Puhtaan ja uusiutuvan

lämpöenergian kysyntä kasvaa tiheästi asutuilla alueilla, joissa lämpöenergian jakelu on erittäin tehokasta ja edullista kaukolämpöverkon kautta. Ilmastonmuutos puolestaan kannustaa lainsäätäjiä entistä tiukempiin CO<sub>2</sub>-päästöjen rajoituksiin ja EU:n tavoitteena onkin vähentää CO<sub>2</sub>-päästöjä alle puoleen nykyisestä vuoteen 2030 mennessä sekä saavuttaa nollapäästöt vuoteen 2050 mennessä, minkä tueksi otetaan käyttöön uusi päästökauppajärjestelmä sekä CO<sub>2</sub>-vero. (Euroopan parlamentti 2022)

Geopoliittiset muutokset taas ovat heikentäneet energian saatavuutta ja nostaneet sen hintaa erityisesti viimeisen kahden vuoden aikana. Energiamarkkinoilla ei myöskään ole näkyvissä tasaantumisen merkkejä ainakaan lähitulevaisuudessa. (Laine 2024, 96.)

Euroopassa on jo kymmeniä teollisen kokoluokan lämpöpumppuvalmistajia, joista suurin osa joko suunnittelee jokaisen kohteen erikseen tai käyttää niin kutsuttuja standardimallisia lämpöpumppumoduuleja, jotka on tehty tietyn teholuokan mukaan. Siihen, kumpi ratkaisusta on sopivampi kussakin tapauksessa, vaikuttaa enimmäkseen lämmönlähde ja sen lämpötila sekä lauhtumislämpötilan suuruus. (Laine 2024, 96–97.)

Lämpöpumpun jaottelu eri kategorioihin voi olla moninaista, mutta tässä työssä luokitteluperusteeksi on valittu vähintään 0,5 MW:n lämmityskapasiteetti, jotta lämpöpumppu voidaan luokitella teolliseksi lämpöpumpuksi. Usein myös laitevalmistajat noudattavat samaa 500 kW:n minimitehoa erotellessaan teolliset lämpöpumput kaupallisen puolen lämpöpumpuista (Laine 2024, 96). Tässä työssä tarkastellaan vain teollisia lämpöpumppuja, joissa käytetään luonnollisia kylmäaineita, kuten ammoniakkia, ja Vahteruksen levylämmönsiirtimiä.

Lämpöpumpun pääkomponentit ovat höyrystin, kompressori, lauhtutin ja paisuntalaite, joista kolme jälkimmäistä sijaitsee korkeapainepuolella ja höyrystin matalapainepuolella. Teollisissa lämpöpumpuissa vaadittava teho on yleensä joistain megawateista useisiin kymmeniin tai jopa satoihin megawatteihin saakka, jolloin tarvitaan korkeapainepuolelle usein lisäksi tulistuksenpoistin sekä

alijäähdytin tai ekonomaiseri. Lisäksi voidaan tarvita öljynjäähdytin, mikäli käytetään ruuvikompressoria. (Kaappola ym. 2011, 51–60.)

### 3.2.1 Järjestelmät

Teollisissa lämpöpumpuissa käytetään suoraa jäähdytystä tai välillistä järjestelmää. Suorassa järjestelmässä höyrystin sijaitsee suoraan jäähdytettävässä kohteessa. Kylmäaine kiertää nesteenä höyrystimelle ja höyrystyy joko osittain tai kokonaan. Suora järjestelmä voidaan jakaa kuiva- ja märkähöyrystykseen. Kuivahöyrystyksessä höyrystimelle syötetään vain sen verran kylmäainetta, että se kaikki ehtii höyrystyä. Märkähöyrystys taas on ominainen ammoniakkilaitoksissa. Höyrystin on kokonaan täytetty nestemäisellä kylmäaineella, joka höyrystyy ja muuttuu kylläiseksi höyryn ja nestepisaroiden seokseksi. Jotta voidaan varmistaa pelkän kylmäainekaasun päätyminen kompressorille, tarvitaan lisäksi erillinen nesteenerotin, jolla saadaan pisarat talteen ja palautettua höyrystimelle. Märkähöyrystin vaatii suuremman kylmäainetäytön verrattuna kuivahöyrystimeen, mutta sen etuna on toimintavarmuus, minkä takia sitä käytetään usein teollisissa kylmlaitoksissa. (Aalto ym. 2012, 269–270.)

Suora jäähdytys toimii Vahteruksen lämmönsiirtimillä sekä kuiva- että märkähöyrystyssovelluksissa, mutta se vaatii lämmönlähteeltä useimmiten nestemäisen olomuodon. Esimerkiksi ilmajäähdytyssovellukset eivät sen vuoksi sovellu Vahteruksen siirtimille höyrystimen osalta. Välillinen järjestelmä on Vahteruksen kannalta toimiva, sillä silloin voidaan tarjota varmuudella höyrystin. (Vahterus 2024)

Välillisessä järjestelmässä on niin sanottu keruupiiri, jolla kerätään lämpö jäähdytettävästä kohteesta ensin kylmäliuokseen, esimerkiksi glykoliliuos, josta lämpö saadaan talteen kylmäaineella ja höyrystimellä. Näin voidaan varmistaa, ettei mahdollisesti haitallinen kylmäaine pääse vuotamaan jäähdytettävään kohteeseen. Sen muita etuja ovat pieni kylmäainetäytös, hyvät säätöominaisuudet ja helppo integrointi tehdasvalmisteiseksi kylmäkoneikoksi.

Välillinen piiri vaatii usein suuremmat putkistot ja pumppukierron kylmäliuokselle. Myös kylmäkerroin on huonompi verrattuna suoraan järjestelmään, mikä johtuu höyrystimen ylimääräisestä lämpötilaerosta. (Aalto ym. 2012, 270–271.)

### 3.2.2 Komponentit

#### **Höyrystin**

Lämmönsiirrin, jossa kylmäaine sitoo itseensä lämpöä ympäristöstään ja höyrystyy. Höyrystyminen tapahtuu, kun lämpötila ylittää kylmäaineen kiehumispisteen. Kiehumispisteen lämpötila on sitä alhaisempi, mitä matalampi kylmäaineen paine on. (Jokela 2020)

#### **Kaskadisiirrin**

Kaskadisiirrin mahdollistaa höyrystymisen ja lauhtumisen samassa siirtimessä, jolloin ensiö- ja toisiopuolilla kiertää molemmissa kylmäaine. Sovelluksesta riippuen, toisella puolella kylmäaine lauhtuu, kun taas toisella puolella oleva kylmäaine höyrystyy. Kun on kyseessä matala- ja korkeapainepuolien yhteiskäyttö, voidaan kummallekin puolelle määrittää omat suunnittelupaineensa. Kaskadisiirrintä käytetään yleensä kaksivaiheisessa lämpöpumpussa, jossa kylmäainetta puristetaan kahdella eripaineisella kompressorilla. (Vahterus 2024)

#### **Kompressorit**

Teollisissa sovelluksissa kompressorit ovat tavallisesti ruuvi- ja mäntäkompressoreita. Niiden rakenne on usein avokompressorit, jossa moottori ja kompressorit sijaitsevat erillään toisistaan. Avokompressorit on suunniteltu vaativiin olosuhteisiin ja niiden käyttöikä on usein 20–30 vuotta, kun taas kaupallisissa sovelluksissa käytettävien kompressorien käyttöikä saattaa olla alle 10 vuotta. (Kaappola ym. 2011, 51–54)

## **Lauhdutin**

Lämmönsiirrin, jossa kylmäaine lauhtuu ja muuttaa olomuotoaan höyrystä nesteeksi. Kompressorin tekemällä työllä saavutettu lämpöenergia voidaan luovuttaa haluttuun käyttökohteeseen lauhduttimen avulla. (Jokela 2020)

## **Paisuntalaite**

Toimii kylmäkierrossa kompressorin vastakohtana, eli sillä saadaan muodostettua paine- ja lämpötilahäviö kylmäaineelle. Paisuntalaitteella, joka on usein paisuntaventtiili, voidaan säädellä höyrystimelle syötettävän kylmäaineen määrää, millä voidaan varmistaa, että kompressorille päätyy pisaratonta kylmäainekaasua. (Jokela 2020)

## **Tulistuksenpoistin**

Ennen lauhdutinta sijaitseva lämmönsiirrin, jonka tehtävä on jäähdyttää tulistunutta kuumakaasua, mutta ei aloittaa vielä lauhtumista. Sillä voidaan parantaa järjestelmän energiatehokkuutta ja suojata lauhdutinta liialliselta lämpökuormitukselta. (Kianta 2013, 84.)

## **Alijäähdytin**

Lauhduksen jälkeen ja ennen paisuntalaitetta sijaitseva lämmönsiirrin, jolla voidaan jäähdyttää kylmäainetta sen lauhtumislämpötilan alapuolelle. Alijäähdyttimellä parannetaan tehokkuutta jäähdytyskapasiteetin lisääntymisellä, vähennetään kavitaatoriskiä paisuntalaitteessa sekä estetään kylmäaineen höyrystyminen liian aikaisin. Alijäähdyttimellä voidaan parantaa COP-arvoa noin 10 %:lla. (Vahterus 2024)

## **Ekonomaiseri**

Ekonomaiseri on eräänlainen alijäähdytin, jolla saadaan jäähdytettyä ja höyrystettyä osa kylmäaineesta ja ohjattua suoraan kompressorille, jo ennen höyrystintä. Tällöin myös höyrystimen kylmäteho kasvaa ja koko systeemin kokonaisteho nousee. (Vahterus 2024)



## Öljynjäähdytin

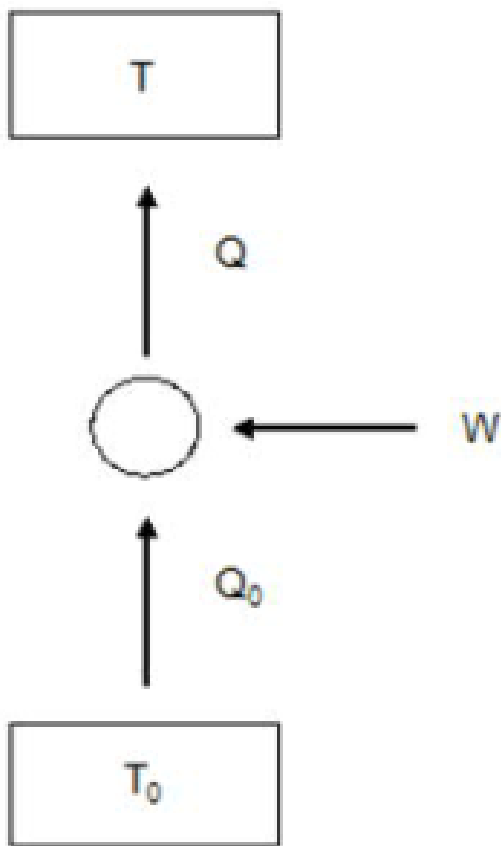
Kompressorin yhteydessä oleva lämmönsiirrin, jolla jäähdytetään kompressorissa käytettävää voiteluöljyä ja estetään sen ylikuumeneminen. Öljyn oikea lämpötila pidentää öljyn käyttöikää sekä parantaa kompressorin toimintaa ja suojaa sitä kulumiselta. Liian kuuma öljy voi menettää voitelukykyänsä heikentämällä sen kemiallista rakennetta. (Hakala & Kaappola 2007, 189–191.)

### 3.2.3 COP

Lämpöpumpun tehokkuus voidaan ilmaista COP-arvolla, joka on lämpökerroin,  $\varphi$ . Se kertoo lämpöpumpun hyötysuhteen kulutetun ja tuotetun energian osalta. Mikäli lämpöpumpun COP olisi 4, silloin jokaista käytettyä 1 kW sähköenergiaa vastaan saadaan tuotettua 4 kW lämpöenergiaa. Lämpökerroin saadaan laskettua oheisella kaavalla 1:

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

|       |           |                                    |
|-------|-----------|------------------------------------|
| jossa | $\varphi$ | lämpökerroin                       |
|       | $Q$       | prosessista saatu lämpöenergia [J] |
|       | $W$       | prosessiin tehty työ [J].          |



Kuva 4. Lämpöpumpun tehokkuus (Sweco 2024).

Mikäli kyseessä on kylmäkone, eli järjestelmää käytetään jäähdyttämiseen, COP-arvosta puhutaan kylmäkerroimenä,  $\varepsilon$ . Kylmäkerroin voidaan laskea seuraavalla kaavalla 2:

$$\varepsilon = \frac{Q_0}{W}, \quad (2)$$

|       |               |                                    |
|-------|---------------|------------------------------------|
| jossa | $\varepsilon$ | kylmäkerroin                       |
|       | $Q_0$         | prosessista saatu kylmäenergia [J] |
|       | $W$           | prosessiin tehty työ [J].          |

Lämpöpumpun COP:iin vaikuttavat erityisesti lämmönlähteen lämpötila sekä saavutettava ulostulolämpötila. Havainnollistamaan niiden vaikutusta, taulukossa 1 on esitetty lämmönlähteen ja ulostulevan veden lämpötilojen vaikutukset lämpökertoimeen. Arvot on laskettu COP estimator -ohjelmalla, jossa on laskennassa käytetty kompressorille 70 %:n hyötysuhdetta, prosessille 5 %:n energiahäviöitä ja kahden asteen lämpötilaeroja sekä höyrystimelle että lauhduttimelle. Kylmäaineen ominaisuudet vaikuttavat olennaisesti COP-arvoon, joten myös käytettävä kylmäaine tulee huomioida. Kylmäaineena laskennassa käytettiin teollisissa lämpöpumpuissa usein hyödynnettävää ammoniakilla. Todellisuudessa arvot voivat vaihdella paljonkin, mutta laskenta on tehty havainnollistamaan, kuinka suuri vaikutus pelkästään prosessin lämpötiloilla on lämpökertoimeen. (John Cantor Heat Pumps n.d.)

Taulukko 1. Lämpötilojen vaikutus COP-arvoon.

| <b>Lämpötilojen vaikutus COP-arvoon ammoniakilla</b> |                              |     |     |     |     |      |
|--|------------------------------|-----|-----|-----|-----|------|
| Veden ulostulo-lämpötila (°C)                        | Lämmönlähteen lämpötila (°C) |     |     |     |     |      |
|  |                              | 0   | 15  | 30  | 45  | 60   |
| 65   |                              | 3.2 | 4.2 | 5.8 | 9.4 | 25.1 |
| 75   |                              | 3.0 | 3.6 | 4.8 | 6.8 | 12.3 |
| 85   |                              | 2.7 | 3.2 | 4.1 | 5.4 | 8.3  |
| 95   |                              | 2.5 | 3.0 | 3.6 | 4.6 | 6.3  |

Lähtökohtaisesti, mitä suurempi COP voidaan lämpöpumpulla saavuttaa, sitä paremmaksi investointi ja takaisinmaksuaika osoittautuu. Kun arvioidaan COP-arvoa, täytyy ottaa huomioon, millaisesta sovelluksesta on kyse. Mikäli lämpötilaerot ovat suuret eli kyseessä on korkean, yli 85 °C ulostulolämpötilan sovellus, jossa lämmönlähteen lämpötila on alhainen, voidaan pitää hyvänä tavoitteena COP-arvoa 3. Jos taas voidaan ottaa lämpöä lähteestä, joka on lämpötilaltaan jo huomattavasti korkeampi, yli 30 °C, eikä prosessin loppulämpötila vaadi korkeaa ulostulolämpötilaa, hyvänä arvona voidaan pitää yli 5 COP:a. (Vahterus 2024)

### 3.2.4 Lämpöpumppujen markkinapotentiaali

Siirtyminen matalalämpöiseen kaukolämpöverkkoon, kuten muun muassa Tanskassa ja Suomessa on tehty, toisi varmasti lisää kysyntää lämpöpumpuille, sillä useimmilla teollisilla lämpöpumpuilla voidaan saavuttaa suoraan vaadittu ulostulolämpötila. Toki siirtymä 90 °C:n kaukolämpöverkkoon veisi aikaa, sillä uudistukset koskevat aina uusia kaukolämpökeskuksia, ja koska niiden käyttöikä on noin 15–20 vuotta, kaukolämpöverkon lämpötila pysynee käytännössä 115 °C:n tasolla vielä arviolta 10–15 vuotta. (Laine 2024, 96.)

Eikä pidä unohtaa, että vaikka korkeamman kaukolämpöverkon vaatima lämpötila pystytäänkin jo saavuttamaan synteettisillä kylmäaineilla, ei tilanne tulevaisuudessa välttämättä jatku samana niiden käyttämisen suhteen, sillä ne sisältävät terveydelle ja ympäristölle haitallisia PFAS-yhdisteitä. PFAS-yhdisteitä koskeva REACH-asetus on vielä valmisteluvaiheessa, mutta hyvin todennäköisesti myös ne tullaan kieltämään tulevaisuudessa. Tulevaisuutta silmällä pitäen ja varman päälle pelaten, turvallinen vaihtoehto on luonnolliset kylmäaineet. (Kapanen 2024)

Matalalämpöverkkouudistus yhdessä uuden F-kaasuasetuksen kanssa kannustaisi yrityksiä investoimaan luonnollisiin kylmäaineisiin ja lämmöntalteenottolämpöpumppeihin jo nyt, ja myymään ylimääräisen hukkalämmön paikallisille kaukolämpöyhtiöille, saaden siitä kohtuullisen korvauksen (Laine 2024, 96).

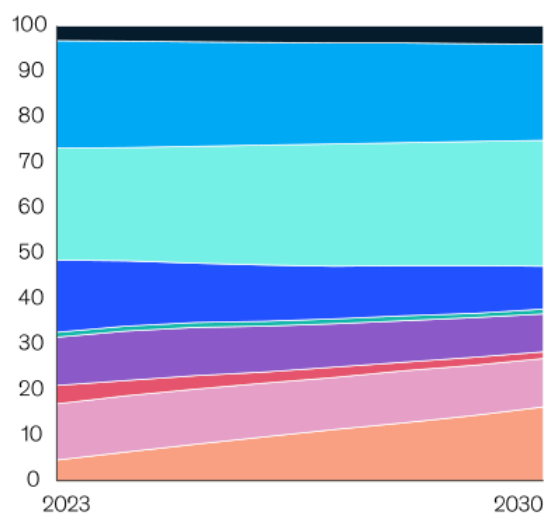
Kansainvälinen energiajärjestö, IEA, on luonut yksityiskohtaisen etenemissuunnitelman, jolla energiaan ja teollisiin prosesseihin liittyvien CO<sub>2</sub>-päästöjen osalta saavutetaan tavoite, eli maailmanlaajuiset nollapäästöt vuoteen 2050 mennessä. Sen mukaan lämpöpumput näyttelevät suurta roolia teollisuuden lämmöntarpeen kattamisessa. Varsinkin matalan ja keskitason, <100–400 °C, lämmön tuottamisessa tultaisiin hyödyntämään lämpöpumppuja, ja niiden osuuden kyseisen sektorin kokonaisenergiantuotosta arvioidaan olevan 30 %. IEA:n nettonollapäästöskenaarion mukaan tulisikin asentaa noin 500 MW:n

edestä lämpöpumppuja joka kuukausi seuraavien 30 vuoden ajan, jotta tämä tavoite täyttyisi. (Zühlsdorf 2023, 40)

**By 2030, heat pumps are expected to make up a growing share of the technology mix for district heating and industrial processes in Europe.**

**District heating technology mix transitions (EU-27+UK), %**

Other<sup>1</sup> CHP<sup>2</sup> coal Coal boiler  
 CHP<sup>2</sup> natural gas Heat plants Natural gas boiler  
 CHP<sup>2</sup> bioenergy Biomass boiler Heat pumps

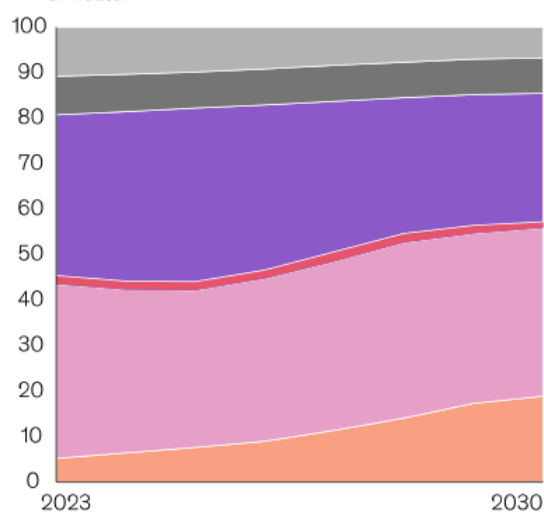


**CAGR 2023–30, %**



**Industrial process heating technology mix transitions (EU-27+UK),<sup>3</sup> %**

Oil boiler Biomass boiler Natural gas boiler  
 Electric boiler Coal boiler Heat pumps or heater



**CAGR 2023–30, %**



<sup>1</sup>Includes electric boiler or heater, solar thermal, oil boiler, geothermal, CHP nuclear, CHP oil, CHP other renewables, and CHP other sources.

<sup>2</sup>Combined heat and power.

<sup>3</sup>For heat temperatures <200°C, excluding space and hot-water heating.

Source: McKinsey Global Energy Perspective 2023 Current Trajectory scenario

McKinsey & Company

Kuva 5. Lämpöpumppujen ennustettu kasvu kaukolämpö- ja prosessilämmityssovelluksissa (McKinsey & Company 2024).

### 3.3 Lämmön siirtyminen

Lämpötilaero pyrkii aina tasoittumaan siirtymällä kuumemmasta lämpötilasta kylmempään, minkä takia lämmön siirtyminen vaatii aina lämpötilaeron. Lämmön siirtyminen tapahtuu johtumalla, konvektiona tai säteilynä. Lämmön johtuminen perustuu aineen molekyylien liike-energian siirtymiseen molekyylistä toiseen,

mikä aiheutuu niiden keskinäisistä voimista ja törmäilyistä. Lämpö voi siirtyä myös sähkömagneettisena säteilynä, jolloin sitä kutsutaan lämpösäteilyksi. Siinä energia siirtyy valon nopeudella fotoneina. Konvektio taas on kaasun tai nesteen virtauksen mukana tapahtuvaa lämmönsiirtoa. Siinä lämpötilaero on kiinteän pinnan sekä sen ohi virtaavan aineen välillä, jolloin lämpöä siirtyy pintaan tai siitä pois. Konvektio voi olla pakotettua tai luonnollista. Pakotettu konvektio on ulkoisen paineen avulla aikaansaatua aineen virtausta, kun taas luonnollisessa konvektiossa virtaus tapahtuu painovoiman avulla. Pakotettu konvektio on kylmäteknikassa tärkein lämmönsiirtotapa ja yhdessä johtumisen kanssa ne muodostavat lämpöpumppujen lämmön siirtymisen. Lämmönsiirto voidaan toteuttaa erityyppisillä lämmönsiirtimillä. (Aalto ym. 2012, 35–41.)

### 3.3.1 Levylämmönsiirrin

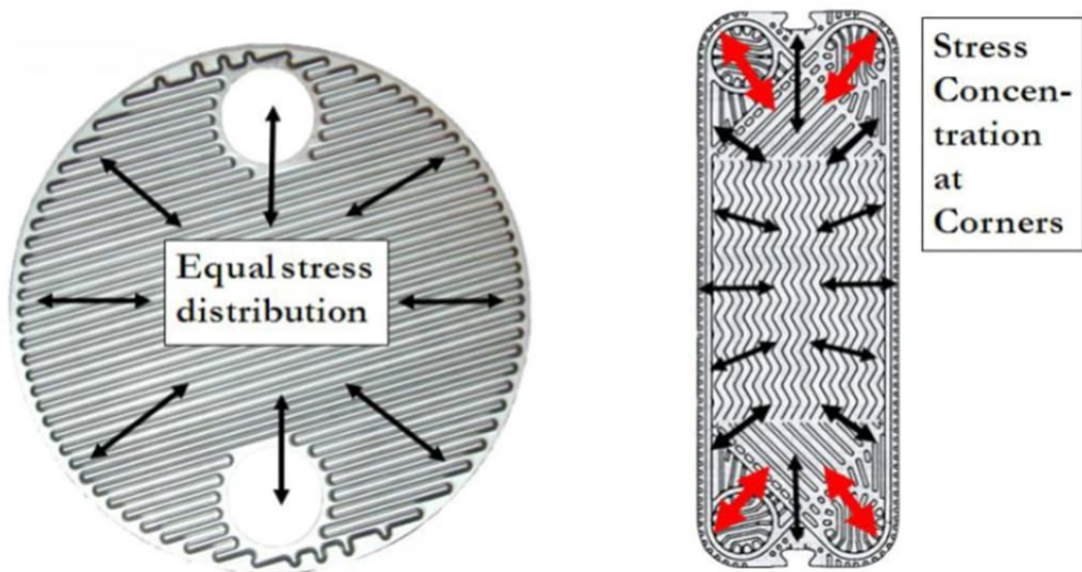
Levylämmönsiirrin on yleisesti käytetty eri kylmäteknikan sovelluksissa. Lämmönsiirrin koostuu päällekkäisistä levyistä, jotka voivat olla eri muotoisia ja joihin on prässätty poimutuskuvio. Sen etuja on hyvät lämmönsiirto-ominaisuudet, kevyt rakenne ja kompakti koko, ollen 60–70 % pienempi kuin esimerkiksi perinteinen putkilämmönsiirrin. Ne ovat helppo kuljettaa ja asentaa ahtaisiinkin asennuspaikkoihin ja huoltotiloihin. Levylämmönsiirrin voi olla tiivisteellinen, juotettu tai hitsattu. (Vahterus 2024)

Tiivisteellisessä levylämmönsiirtimessä levyt on erotettu toisistaan tiivisteillä. Joka toisessa levyvälissä kiertää kylmäaine ja joka toisessa neste. Ne soveltuvat käytettäväksi matalapaineisissa, yleensä alle 20 baaria, ja keskilämpötilaisissa sovelluksissa. Tiivisteiden kanssa on huomioitava käytettävä aine ja sen vaikutus tiivisteiden materiaaliin. Puolihitsattu lämmönsiirrin on hitsatun ja tiivisteellisen levylämmönsiirtimen yhdistelmä. Niissä kylmäainetta sisältävä levy pari on hitsattu ja nestettä sisältävä puoli on tiivisteellinen. Ne soveltuvat käytettäväksi kemiallisesti haastavien aineiden kanssa sekä kestävät korkeampaa painetta ja lämpötilaa, jopa 40 baariin ja 250 °C:een saakka. (Vahterus 2024)

Juotetun levylämmönsiirtimen siirrinlevyt on juotettu toisiinsa kuparilla tai nikkelillä. Juotetut levylämmönsiirtimet kestävät korkeampia paineita ja lämpötiloja, tyypillisesti alle 140 baariin ja noin 225 °C:een saakka. (Vahterus 2024)

Rakenne voi olla kuitenkin myös täysin hitsattu, kuten Vahteruksen valmistamissa lämmönsiirtimissä, jolloin ne soveltuvat todella korkeille lämpötiloille ja paineille, jopa 600 °C ja 170 bar, sekä mahdollistavat myös korrosoivien nesteiden käytön. (Vahterus 2024)

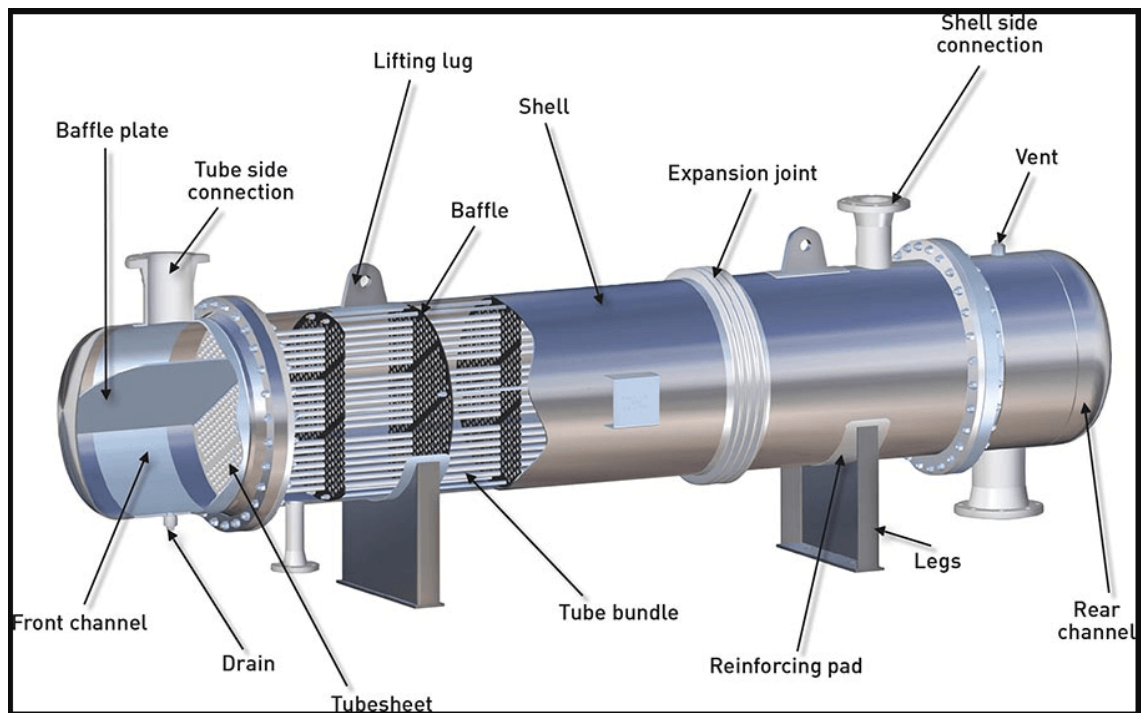
Levyn muoto tiivisteellisissä ja juotetuissa siirtimissä on neliö tai suorakulmio. Vahteruksen täysin hitsatussa siirtimessä levyn muoto on pyöreä, jolloin kuten kuvassa 6 on esitetty, pyöreässä levyssä rasitus jakautuu tasaisesti, kun taas suorakulmaisessa levyssä levyn kulmat ottavat kovimman rasituksen vastaan. Tasainen rasitus mahdollistaa vakaan lämmönsiirron, korkeampien paineiden käytön, vähäisen likaantumisen ja sen myötä vähäisen huollon tarpeen sekä pidemmän käyttöiän. Poimutuskuvilla pyritään lisäämään levyjen välissä kulkevan aineen turbulenssia ja siten parantamaan leikkausjännitystä, joka vähentää likaantumista levyjen pinnoilla. (Vahterus 2024)



Kuva 6. Levyn muodon vaikutus rasituksen jakautumiseen (Vahterus 2024).

### 3.3.2 Putkilämmönsiirrin

Putkilämmönsiirtimet eli Shell & Tube -lämmönsiirtimet koostuvat sylinterinmuotoisesta vaipasta sekä sen sisällä olevasta moniputkiryhmästä. Putket on liitetty vaipan päätyihin juottamalla, hitsaamalla tai mankeloimalla, ja ne erotetaan toisistaan välilevyillä, jotka myös samalla ohjaavat virtausta vaipan sisällä. Putkiryhmän geometria ja putkijako, välilevyjen tyyppi sekä vaipan paksuus ja päätyjen mitoitus voivat olla hyvin vaihtelevia putkisiirtimissä, mutta usein eri valmistajien rakenteet noudattavat TEMA-lyhenteellä tunnettua standardia. (Aalto ym. 2012, 168–170.)



Kuva 7. Putkilämmönsiirtimen rakenne (Mechanical Knowledge 2023).

Putkilämmönsiirtimen kestävä rakenteen ansiosta sillä voidaan toteuttaa korkean lämpötilan ja paineen vaativia sovelluksia. Sen lämmönsiirto-ominaisuudet ovat kuitenkin heikommät kuin levylämmönsiirtimillä. Toisin sanoen, yltääkseen vastaavaan kapasiteettiin kuin esimerkiksi Plate & Shell -siirrin, tarvitsee sen rakenteen olla huomattavasti isompi. Koska sen koko kasvaa, myös sen hinta nousee korkeammaksi, kun tarvitaan enemmän

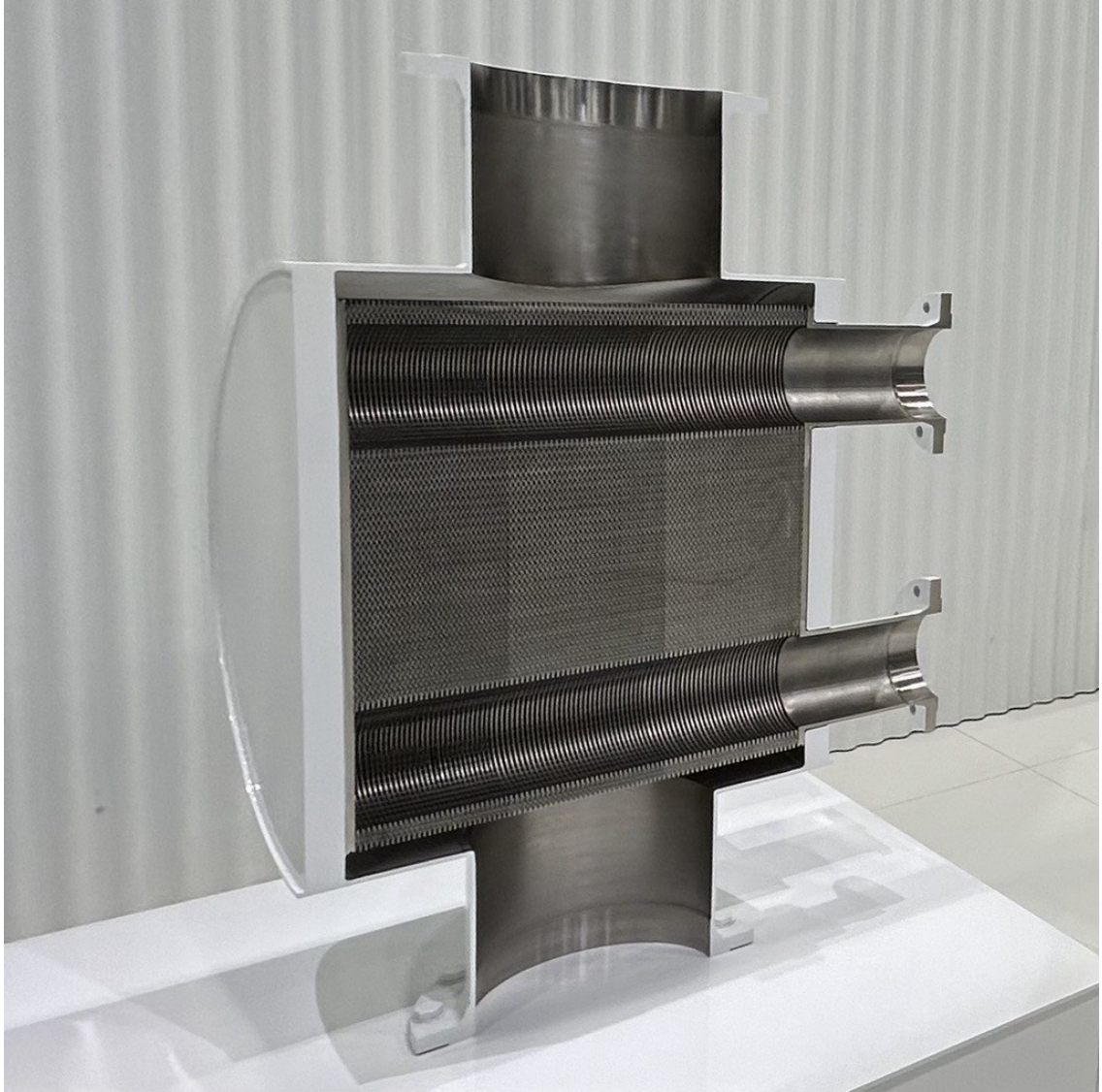


materiaaleja. Plate & Shell -siirrin on usein 40–50 % edullisempi, johtuen materiaalisäästöistä. (Vahterus 2024)

### 3.3.3 Vahterus Plate & Shell -lämmönsiirrin

Vahteruksen levylämmönsiirtimet perustuvat täysin hitsattuun rakenteeseen, joka koostuu siirrinlevypakasta sekä ulkokuoresta eli vaipasta. Jokainen lämmönsiirrin valmistetaan mittatilaustyönä tapauskohtaisesti vastaamaan parasta mahdollista suorituskykyä sekä rakennetta asiakkaiden tarpeisiin. Rakenne voi olla myös avattava, jolloin toinen tai molemmat vaipan päädyistä ovat kiinni ruuviliitoksella. Avattava rakenne on hyvä esimerkiksi vaativissa olosuhteissa käytettävien siirtimien kanssa, jolloin levypakka voidaan tuoda ulos vaipasta ja puhdistaa tehokkaasti. Lämmönsiirtimen tarkoitus on siirtää lämpöä primääripuolelta toisiopuolelle virtaukset erottavan lämmönsiirtolevyn kautta. Kuvassa 8 on esitetty Vahteruksen levylämmönsiirrin, joka on halkaistu rakenteen esittelemiseksi Chillventa-messuilla lokakuussa 2024, Saksan Nürnbergissa. (Vahterus 2024)

Useimmiten siirtimen rakenne on täysin hitsattu, jolloin sen puhdistaminen on vaikeaa. Puhdistus onnistuu kuitenkin kemiallisesti lisäämällä asianmukaista puhdistusainetta kiertoan tai käyttämällä vastakkaista virtausta, jolloin mahdolliset likapartikkelit irtoavat. Myös siirtimen liitännäyhteiden kautta voi suorittaa mekaanista puhdistusta, mutta se on rajallisempaa. Mahdollinen likaantumisen täytyy huomioida lämmönsiirtimen käyttösovellusta mietittäessä. Vahteruksen lämmönsiirtimelle soveltuvatkin mahdollisimman puhtaat lämmönlähteet, jotka eivät likaa siirrintä. Mahdollinen lika, esimerkiksi jätevedessä tai kylmässä merivedessä syntyvä jääkide, heikentää lämmönsiirron tehokkuutta ja voi pahimmassa tapauksessa tukkia koko siirtimen. Jonkinlainen esisuodatus voi olla tarpeen, mikäli lämmönlähde sisältää paljon liikaavaa materiaalia tai jäätä. (Vahterus 2024)



Kuva 8. Vahteruksen näyttelysiirrin kuvattuna Chillventa-messuilla 10/2024.

Vahterus Plate & Shell -lämmönsiirtimessä on yhdistetty Shell & Tube -lämmönsiirtimen korkea paineen- ja lämpötilansietokyky sekä Plate & Frame -lämmönsiirtimen erinomainen lämmönsiirtokyky. Levypakka koostuu pyöreistä yhteenhitsatuista siirrinlevypareista, jotka poimutetaan eri tavoin optimaalisen lämmönsiirron saavuttamiseksi. Siirrinlevyparit hitsataan levypakaksi ja asennetaan sylinterinmuotoiseen teräsvaippaan – tästä tulee nimitys Plate & Shell -lämmönsiirrin. Lämmönsiirrin on täysin hitsattu ja tiivistetön, mikä tekee siitä erittäin kestävä, turvallisen ja huoltovapaan. Rakenne mahdollistaa lyhyen ja tehokkaan virtausreitit, jolla saadaan säilytettyä matala painehäviö, mikä sopii

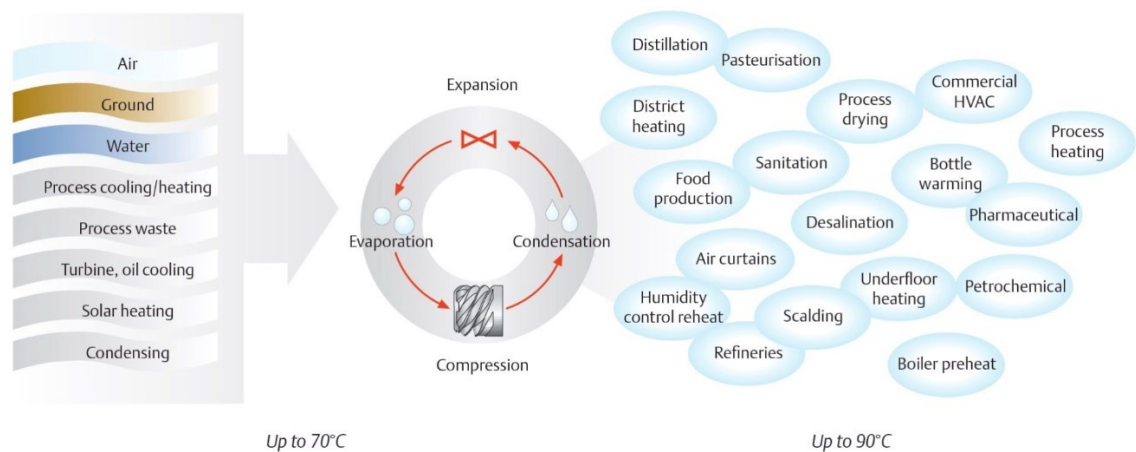
erityisesti viskoosien nesteiden käsittelyyn. Vahterus Plate & Shell -lämmönsiirtimen toiminta-alue lämpötilan osalta on -196–600 °C. Yleisimmät tyyppihyväksytyt paineluokat ovat 10, 16, 25, 40 ja 60 baaria, mutta siirrin voidaan suunnitella käytettäväksi jopa 170 baarin paineluokassa. (Vahterus 2021)

Virtaukset voidaan ohjata siirtimen läpi vasta-, myötä- tai ristivirtauksena. Vastavirtauksessa levypakan sekä vaipan virtaukset kulkevat vastakkaisiin suuntiin, esimerkiksi vesi virtaa levypakassa alhaalta ylös ja ammoniakki vaipassa ylhäältä alas. Myötävirtauksessa molemmat kulkevat samaan suuntaan eli alhaalta ylös tai ylhäältä alas. Ristivirtauksessa levypakan virtaus kulkee alhaalta ylös, tai toisinpäin, ja vaipassa taas virtaus kulkee vasemmalta oikealle tai oikealta vasemmalle. (Vahterus 2021)

## 4 Lämmönlähteet

Teolliset lämpöpumput voivat hyödyntää useita eri luonnollisia lämmönlähteitä, joita ovat maaperä, ympäröivä vesi ja ulkoilma sekä jätevesi. Myös hukkalämmöt, kuten neste- ja kaasuvirtaukset, ovat usein hyödynnettävissä teollisten lämpöpumppujen lämmönlähteinä. (Heat Pumping Technologies 2024)

Vuoden 2017 tutkimuksessa, jossa tutkittiin teollisuuslämpöpumppusovelluksia Euroopan kaukolämmön tuotannossa, käytetyimmiksi lämmönlähteiksi osoittautuivat geoterminen lämpö, kaukojäähdytys, aurinkolämpö, ympäröivä vesi ja jätevesi sekä teollisuuden savukaasut ja prosessien hukkalämmöt (Davis ym. 2017, 5).



Kuva 9. Lämmönlähteet ja niiden hyödyntäminen eri sovelluksissa (European Heat Pump Association 2022).

### 4.1 Käytetyimmät lämmönlähteet teollisilla lämpöpumpuilla

Suurin osa, jopa 57 %, tutkittujen applikaatioiden kokonaiskapasiteeteista hyödynsi lämmönlähteenään jätevettä. Jäteveden hyödyntämistä pidetään vakaana ja pitkäaikaisena lämmönlähteenä, ja sitä hyödynnettiin suurissa kaupungeissa kuten Tukholmassa, Helsingissä, Göteborgissa ja Oslolla. Toiseksi yleisin, 24 % osuudella, lämmönlähde oli ympäröivä vesi, jota hyödynnetään rannikkoalueilla ja alueilla, joissa on suuri joki tai järvi. Vaikka

vesistön lämpötila ei yllä samalle tasolle kuin jäteveden, ollen useimmiten 2–15 °C välillä, sen hyödyntäminen perustuu saatavilla oleviin suuriin vesimassoihin. Jäljelle jääneiden muiden lämmönlähteiden yhteisosuus oli vain 17 %, mutta etenkin teollisuuden hukkalämpöjen hyödyntämisessä nähtiin valtavaa potentiaalia tulevaisuudessa. (Davis ym. 2017, 10–11.)

#### 4.1.1 Hukkalämmöt

Tulevaisuudessa on huomattavaa kasvupotentiaalia erityisesti teollisuuden prosessien lämmöntalteenotossa, sillä lämpöpumpuilla voidaan nykyään saavuttaa prosessin vaatimukset täyttävä loppulämpötila, joka sitten itse prosessissa saadaan suoraan nostettua hyödynnettävälle tasolle. Nykyään nähdään kasvavaa kiinnostusta kaukolämmön hyödyntämiseen myös pienemmillä asuinalueilla, jotka sijaitsevat teollisuuslaitosten läheisyydessä. Näiden laitosten tuottama hukkalämpö voidaan jakaa asuinkiinteistöihin paikallisen kaukolämpöverkon kautta. Erityisen hyvä mahdollisuus hukkalämmön talteenottoon ja uudelleenkäyttöön asuinrakennusten lämmityksessä syntyy alueilla, joissa teollisuuslaitokset, kuten paperitehtaat tai jatkuvasti toimivat prosessiteollisuuden laitokset, tuottavat tasaisesti hukkalämpöä ympäri vuorokauden. (Laine 2024, 96–101.)

Aiemmin hukkalämpö on usein johdettu esimerkiksi jokiin tai pintavesiin, mutta energianhintojen noustua merkittävästi, hukkalämmön talteenotto teollisen mittakaavan lämpöpumpuilla on nyt taloudellisesti houkuttelevampi vaihtoehto, mikä lisää kiinnostusta lämpöpumpuihin. Tällä hetkellä ei ole olemassa ekologisiin näkökulmiin perustuvia rajoituksia siitä, kuinka paljon lämpökuormaa paikallisviranomaiset sallivat päästettävän vesistöihin. On täysin mahdollista, että ympäristöviranomaiset alkavat tulevaisuudessa rajoittaa hukkalämmön päästöjä vesistöihin, koska niiden lämpeneminen voi häiritä vesieläinten ja kasvien luontaista elinympäristöä, mikä on hyvä ottaa huomioon tehdessä tarvearviointia lämmöntalteenotolle ja lämpöpumpulle. (Laine 2024, 96–101.)

Maailmanlaajuisesti hukkalämpöä tuotetaan varsinkin raskaan teollisuuden toimesta. Toisena hyvänä esimerkkinä on erilaiset jäähdytyssovellukset, joissa tiloja jäähdytetään poistamalla lämpöä. Prosesseissa tuotetaan suuria lämpömääriä, jotka sitten puhalletaan ympäristöön ilmajäähdyttimien kautta, vaikka tämä lämpöenergia olisi otettavissa talteen ja uudelleen hyödynnettävissä. (Vahterus 2024)

#### 4.1.2 Vesistölämmöt

Ympäröivät vesistöt, kuten meret, joet ja järvet, ovat hyviä vaihtoehtoja lämpöpumpun lämmönlähteeksi. Arvioidessa vesistön sopivuutta lämmönlähteeksi, tulee huomioida maantieteellinen sijainti, tarvittava lämmitysteho sekä vesistön ympärivuotinen lämpötila. Järjestelmän maantieteellinen sijainti on tärkeä, sillä mitä kylmempi ympärivuotinen lämpötila on, sitä suurempi on vaadittava lämmitysteho ja siten myös tarvittavan järjestelmän koko kasvaa. Ympäröivän vesistön syvyys on myös oleellinen tieto, varsinkin jos järjestelmää ollaan suunnittelemassa paikkaan, jossa on talvella pakkasta. (Juuti 2020)

Talvella vesistö kylmenee ja, jotta saavutetaan tarpeeksi lämmin lämmönlähde, tarvitsee mennä jopa 70 metrin syvyyteen, kuten esimerkiksi Helsingin edustalla, Suomenlahdella. Jotta tarvittava syvyys saavutettaisiin Suomenlahdella, pitäisi vedenotto olla noin 20 kilometrin päässä rannikolta, mikä tarkoittaa todella pitkää putkea, joka olisi noin 2 metriä halkaisijaltaan, ja liian korkeita investointikustannuksia. Laittevalmistajat pitävät vesistön minimilämpötilavaatimusta kahdessa celsiusasteessa, mutta suosittelevat 3 °C lämpötilaa. Kahden asteen lämpötilaisen meriveden hyödyntäminen vaatisi 1,7-kertaisen määrän vettä verrattuna kolmen asteen veteen, jotta saavutetaan sama lämpöteho. Tämä lisäisi vastaavasti myös laitteiden kokoa ja investoinnin suuruutta. Mitä lämpimämpää vesi on, sitä pienempi vesimäärä tarvitaan saman lämpötehon tuottamiseen, mikä puolestaan mahdollistaa pienempien laitteiden käytön ja pienentää investointikustannuksia. Lisäksi lämpimämpi vesi parantaa

hyötysuhdetta ja vähentää sähkön kulutusta lämmöntuotannossa. (Rauhamäki 2019)

Ympäröivän veden käyttämistä lämmönlähteenä voisi hyödyntää kylmemmissä maissa pienemmässä mittakaavassa. Vaikka vesistöjen lämpötilat ovat alhaiset silloin, kun lämpöä tarvitaan eniten, voisi niitä hyödyntää esimerkiksi pienempien kaupunkien matalalämpöisten kaukolämpöverkkojen syöttämiseen. Investointikustannukset eivät karkaisi käsistä ja hyötysuhdekin pysyisi vielä hyvällä tasolla, kun vaadittu lämpöteho ei nousisi liian korkeaksi. (Vahterus 2024)

#### 4.1.3 Ulko- ja poistoilma

Ulkoilmaa on kaikkialla saatavilla ja se sisältää hyödynnettävää lämpöä jopa -20 °C lämpötilassa. Ilmaa voidaan hyödyntää useiden erityyppisten lämpöpumppujen avulla, kuten ilma-ilma-, ilma-vesi-, vesi-ilma- tai suolaliuos-ilma-sovelluksissa, joilla voidaan lämmittää sisäilmaa tai siirtää lämpö lämmitys- ja käyttöveteen. Toinen ilmapohjainen lämmönlähde on rakennusten ilmanvaihtoilma. Poistoilma on lämmintä ja sen virtausnopeus on suoraan verrannollinen rakennuksen lämmöntarpeeseen. (Heat Pumping Technologies 2024)

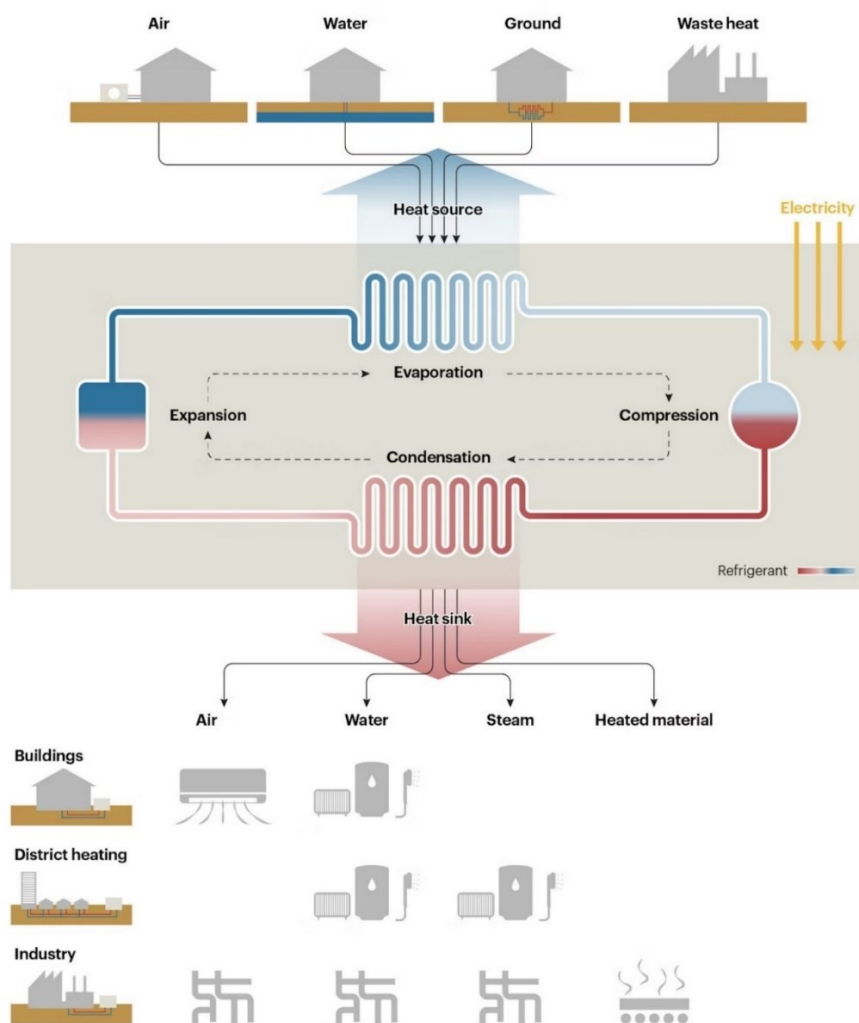
#### 4.1.4 Maalämpö

Maanpinnan alapuolella on runsaasti geotermistä lämpöä, joka voidaan ottaa talteen ja käyttää lämmitykseen myös teollisissa sovelluksissa. Maa on erinomainen ja edullinen lämpövarasto, mikä osoittautuu vähäisinä lämpötilavaihteluina ja pitkinä aikaviiveinä, verrattuna maanpinnan olosuhteisiin. Koska maanpinnan alapuolella on viileää myös kesäisin, sitä voidaan hyödyntää jäähdytykseen. Silloin sisätiloista maaperään siirretty lämpö varastoituu ja se voidaan taas talvella hyödyntää lämmityskäytössä. (Heat Pumping Technologies 2024)

#### 4.1.5 Jätevesilämmöt

Kuten vuoden 2017 tutkimuksesta havaittiin, jätevesiä hyödynnettiin vielä vajaa 10 vuotta sitten lämpöpumpussovelluksissa eniten. Jäteveden hyödyntämisellä saavutetaan suuria etuja, joita ovat korkeahko, pitkäaikainen ja vakaa lämpötila. Myös sen keskeinen sijainti kaupunkialueilla mahdollistaa helpon lämmönjakelun esimerkiksi kaukolämpöverkkoon. (Davis ym. 2017, 10.)

Useimmiten jätevedet ohjataan ensin puhdistamoon, josta se siirtyy lämpöpumpun höyrystimelle 8–18 celsiusasteen lämpöisenä. Motivan mukaan lopullisen jäteveden lämpötila lämmöntalteenoton jälkeen on 3–13 celsiusastetta, eli siitä on saatu viisi celsiusastetta lämpöä talteen. (Motiva 2024)



Kuva 10. Lämmönlähde ja lämpönielu (International Energy Agency n.d.).



## 4.2 Lämmönlähteiden arviointi

Kun tarkastellaan tutkimuksen lämmönlähdetyyppejä ja niiden etuja, voidaan todeta, että niiden käyttömahdollisuudet ovat rajalliset, varsinkin kaukolämpökohteissa. Suurimmat edut löytyvät jätevedeltä sen suhteellisen korkean ja vakaan lämpötilansa sekä kaupunkialueiden läheisyyden johdosta. Jätevettä hyödynnettiinkin verrattain vähän, huomioiden sen lämmöntalteenottokyvyn. Vaikka kokonaiskapasiteetista 57 % oli jäteveden osuutta, sitä hyödynnettiin vain Pohjoismaiden isoimmissa kaupungeissa. Vastaavia ratkaisuja voitaisiin ottaa käyttöön myös muissa Euroopan suurissa kaupungeissa, joista löytyy kaukolämpöjärjestelmä. (Davis ym. 2017, 5 & 10–11.)

Myös alhaisen lämpötilan lämmönlähteillä, kuten ympäröivät vesistöt, voidaan saavuttaa verrattain hyvä lämpökerroin. Usein kylmempienkin vesistöjen lämpöpumpuilla päästään COP-arvoon 3. Vesistöjen etu on saatavilla olevat suuret vesimassat, jolloin suuremmista määristä saadaan talteen paljon lämpöä, vaikka lämpötilat ovatkin alhaiset. (Davis ym. 2017, 5 & 10–11.)

Teollisuuden hukkalämmöt nähdään yhtä hyvinä lämmönlähteinä kuin jätevesi, vaikka niiden pitkäaikainen stabiilius ei usein ylläkään samalle tasolle. Toisaalta löytyy vakaita ja pitkäkestoisiaakin prosesseja, joissa tehtaat pyörivät ympäri vuorokauden tuottaen runsaasti ja tasaisesti hukkalämpöä. Tällaisissa kohteissa hukkalämmön talteenotto lämpöpumpuilla olisi varsin hyvin toteutettavissa. (Laine 2024, 96.)

Mikäli hukkalämmön hyödyntämistä mietitään investoinnin takaisinmaksuajan kannalta, voi se maksaa itsensä nopeastikin takaisin. Jos hyödynnettävissä on suuria määriä korkeita lämpötiloja, jotka saadaan nostettua verrattain vähällä työllä prosessin vaatimiin lämpötiloihin, voi COP-arvo nousta jopa kymmenkertaiseksi verrattuna muihin lämmönlähteisiin. Tällöin myös takaisinmaksuaika voi olla kymmeniä kertoja nopeampi, jolloin esimerkiksi prosessin pitkäaikainen stabiilius ei ole niin merkittävää investoinnin kannalta. (Vahterus 2024)

Koska tutkimuksen jälkeen on tullut uusia lakimuutoksia koskien kasvihuonepäästöjä ja kylmäaineiden käyttöä, on myös lämmönlähteiden hyödyntämisessä tapahtunut muutoksia. Lisäksi energiamaksuihin on tullut pysyviä muutoksia sitten vuoden 2017, jolloin sähkön hinta oli pääsääntöisesti halpaa ja sen jakelu vakaata. Halpa energia on ollut yksi syy, miksi yritykset eivät vielä olleet investoineet ja panostaneet niinkään lämmöntalteenottoon. Kun energia on halpaa, ei kalliit investoinnit houkuta. (Ritmann 2024)

Varsinkin teollisuuden hukkalämpöjen talteenotto on yleistynyt tutkimuksen aikaisesta tasosta. Kaikissa prosesseissa, missä syntyy lämpöä, usein myös hukataan paljon lämpöä, joka olisi otettavissa talteen. Uusiin asetuksiin on pakko mukautua ja varsinkin isommat yritykset ovat jo näyttäneet mallia siirtymällä täysin hiilineutraaleihin päästöihin. Pienemmät seuraavat perästä vihreässä siirtymässä, jossa uusiutuvien lämmönlähteiden rooli on merkittävä. (Ritmann 2024)

## 5 Sovellukset Vahteruksen lämmönsiirtimillä

Tässä osiossa käsitellään Vahteruksen lämmönsiirtimillä varustettuja teollisia lämpöpumpusovelluksia. Teollisuuden prosesseissa ja esimerkiksi kaukolämmityksessä tarvitaan korkeita loppulämpötiloja, jolloin ne vaativat korkean käyttöpaineen. Lämmönsiirtimiltä vaaditaan tällöin hyvää lämmön- ja paineenkestävyyttä, joka on Plate & Shell -lämmönsiirtimessä täysin hitsatun rakenteensa ansiosta omaa luokkaansa. Niiden todistettu käyttöikä on yli 20 vuotta. Mikäli sovelluksiin olisi valittu tiivisteellinen lämmönsiirrin, vaatisi se tiivisteiden vaihdon tietyin väliajoin, keskimäärin 5 vuoden välein. Tämä tulee pitkässä juoksussa kalliiksi varaosien hankintakustannusten sekä toimitusaika- ja huoltoseisakkien takia. Jos taas valittaisiin putkisiirrin, veisi se yli tuplasti lisää tilaa ja samalla valmistusmateriaaleja. Myös kylmäainelataus kasvaisi suurentuneen koon myötä. (Vahterus 2023)

Kaikissa esimerkkisovelluksissa on käytössä kylmäaineena ammoniakki, sillä se on luonnollinen kylmäaine, jolloin se ei heikennä otsonikerrosta eikä lisää kasvihuoneilmiötä. Ammoniakkia on runsaasti saatavilla luonnollisesti, mikä tekee siitä edullisen kylmäaineen käyttää. Lisäksi ammoniakkin lämmönsiirto-ominaisuudet ovat hyvät sekä sen suuri höyrystymislämpö ja alhainen viskositeetti mahdollistavat pienemmän massavirran ja painehäviön. Sen moolimassa on pieni ja tilavuustuotto suuri, joten koko järjestelmän, kompressoreineen ja putkineen, ei tarvitse olla iso. Pienen moolimassan ja suuren höyrystymislämmön johdosta ammoniakkin höyrystymispaine nousee jyrkemmin kuin muilla kylmäaineilla. Höyrynpaineen noustessa, myös lauhtumispaine nousee, jolloin päästään hyvin korkeisiin lauhtumislämpötiloihin ja voidaan saavuttaa eri prosesseissa vaadittava korkea loppulämpötila. (Aalto ym. 2012, 116–119.)

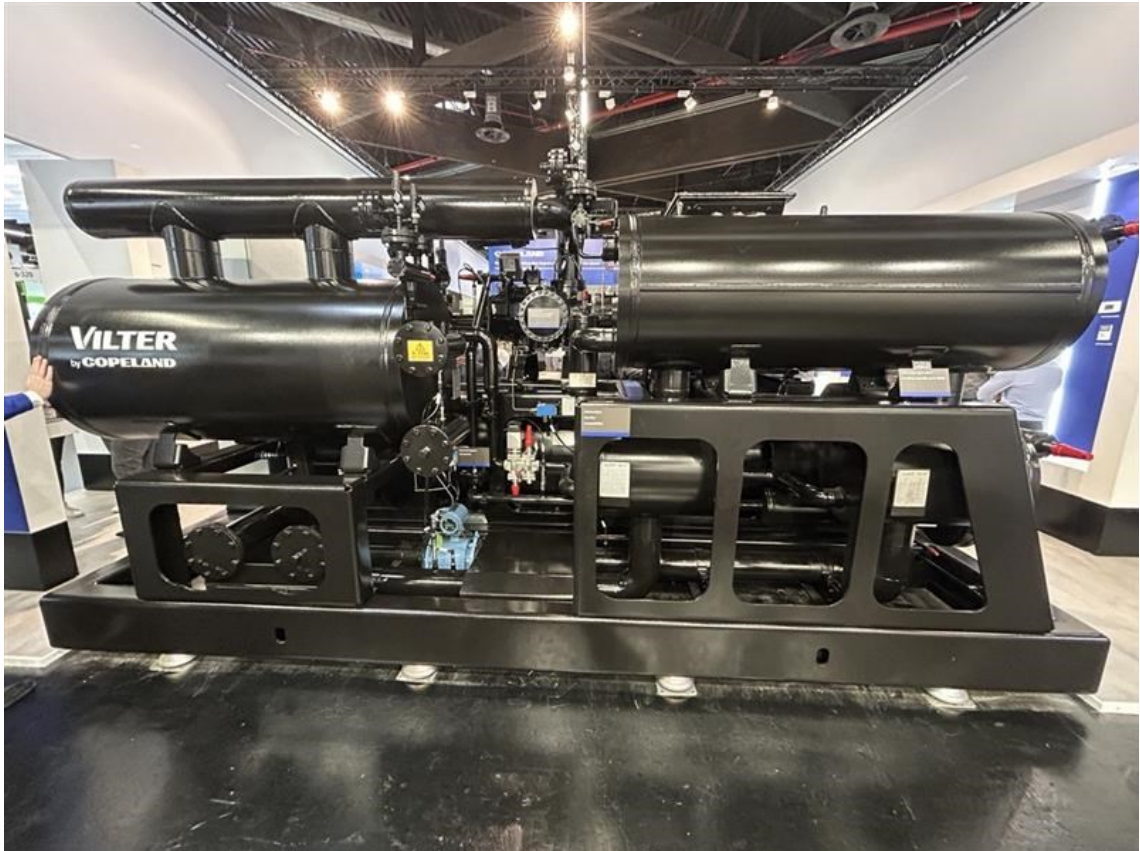
Ammoniakki on myös hyvin turvallinen käyttää, vaikka se luetaankin myrkylliseksi aineeksi. Sen kanssa on toimittava aina varoen, sillä se voi aiheuttaa räjähtävän seoksen tietyssä pitoisuudessa päästessään kosketuksiin ilman kanssa. Räjähdyksen vaatisi todella suuren syttymisenergian, joten se on mahdollinen vain

harvoin syntyvissä olosuhteissa. Sen pistävä haju auttaa havaitsemaan mahdolliset vuodot ajoissa, jolloin suuremmilta vaaroilta voidaan välttyä. (Aalto ym. 2012, 116–119.)

### 5.1 Vilter by Copeland

Yhdysvaltalainen valmistaja, Copeland, ilmoitti lokakuussa Chillventa-messuilla, Saksan Nürnbergissa, lanseeraavansa uuden vedestä veteen teollisuuslämpöpumpun Vilter-tuotemerkilleen. Tarjoten 1–5 MW lämmitystehoa, VQ95-lämpöpumpuilla voidaan pienentää teollisuuden hiilijalanjälkeä prosessien lämmityksessä, kuten ruoka- ja juomatuotannossa, tai niillä voidaan vaikkapa korvata kaukolämmön vanhat fossiilisia polttoaineita käyttävät lämmönlähteet. Moduloimalla useampi VQ95-mallin lämpöpumppu rinnakkain, voidaan saavuttaa jopa 40 MW:n kokonaislämpöteho. (Garry 2024)

Kompakti, yhden alustan lämpöpumppu hyödyntää ammoniakkia kylmäaineenaan, jonka se puristaa ruuvikompressorilla korkeaan lämpötilaan ja paineeseen. Tällä yhdistelmällä voidaan tuottaa jopa 95 °C:n loppulämpötila lämmitettävään veteen. Lämmönlähteenä voidaan käyttää jokia, järviä, jäte- ja pohjavesiä sekä muita nestemäisiä hukkalämpöjä. Vilterin tuotehallintajohtaja, Grant Kovacin, mukaan myös viereisen järjestelmän ammoniakki voidaan purkaa höyrystimeen ja hyödyntää lämmönlähteenä, jolloin höyrystin toimii kaskadina. (Garry 2024)



Kuva 11. Vilterin VQ95-malli kuvattuna Chillventa-messuilla.

Vilterin lämpöpumpussa on neljä erilaista Vahteruksen siirintä: höyrystin sisäänrakennetulla pisaranerotimella, MultiCondenser, jossa tulistuksenpoistin ja lauhdutin sekä lisäksi erilliset ali- ja öljynjäähdyttimet. Höyrystin ottaa lämmön talteen lämmönlähteestä, kun taas MultiCondenser siirtää lämmön hyödykkeeseen. Alijäähdytin puolestaan jäähdyttää kylmäaineen lämpötilan alle lauhtumislämpötilan, jolloin koko systeemin jäähdytyskapasiteetti ja lämmitysteho nousee. Öljynjäähdyttimen tehtävä on jäähdyttää kompressorioilyä, jotta kompressorin voitelukyky pysyy hyvänä, eikä ylikuumentamista tapahdu. Vilterin kompressorilla voidaan käyttää poikkeuksellisen korkealämpöistä öljyä, mikä edesauttaa nostamaan ulostulevan veden lämpötilan korkeammaksi kuin ammoniakkin lämpötila. Lämmönsiirtimiltä vaaditaan prosessissa hyvää lämmönsiirtokykyä sekä korkeaa paineen- ja lämpötilansietokykyä, joka voidaan toteuttaa täysin hitsatuilla Vahteruksen levylämmönsiirtimillä. Lisäksi niiden

kompakti rakenne mahdollistaa lämpöpumpun käytön ahtaammissakin tiloissa. (Vahterus 2024)

## 5.2 Malmön kaukolämpöhanke

Sähkötarjoaja, E.ON, asennutti vuonna 2021 neljä GEA:n ammoniakkilämpöpumpua kaukolämmitykseen Ruotsin Malmöhön vähentääkseen kasvihuonepäästöjään. Jokaisen lämpöpumpun tuottama lämpöteho on 10 MW, jolloin kokonaislämmityskapasiteetti neljällä rinnakkaisella lämpöpumpulla nousee 40 MW:iin. Lämpöpumpukokonaisuus toimii yhdessä jätevedenpuhdistus- sekä jätteenpolttolaitoksen kanssa, vastaten 8 % vuotuisesta kokonaisenergiasta 100 000 kodin lämmityksessä ja säästäten samalla 50 000 tonnia CO<sub>2</sub>-päästöissä vuodessa. COP pysyy ympäri vuoden 3.5 yläpuolella, jolloin jokaista 1 kWh:n kulutettua sähköenergiaa vastaan tuotetaan 3.5 kWh lämpöenergiaa. (GEA n.d.)



Kuva 12. GEA:n Malmön lämpöpumppu (GEA n.d).

Lämpöpumpujärjestelmän hyvä lämpökerroin mahdollistetaan hyödyntämällä lämmönlähteenä 14 °C jätevettä, joka on aiemmin pumpattu mereen

hukkalämpönä. Uudistuksen myötä puhdistetusta jätevedestä saadaan talteen noin 30 MW lämpöä, ja siten kaukolämmitysverkkoon palautuu jatkuvasti lämpöä, joka riittää noin 10 000 ruotsalaiskodin ympärivuotiseen lämmitykseen. Lämpöpumppu on suunniteltu tuottamaan jopa 80 °C:n lämpötiloja, mutta harvemmin siltä vaaditaan yli 71 °C:n loppulämpötiloja. Lämpöpumppuja ajetaan täydellä kapasiteetilla lokakuusta huhtikuuhun, mutta kesäkuukausien lämmöntarvehuippuja varten niistä käytetään vain yhtä tai kahta. Muutoin lämpöä saadaan riittävästi muista uusiutuvista lämmönlähteistä. (Vahterus 2018)

Jokaiseen lämpöpumppuun Vahterus toimitti kuusi lämmönsiirintä: kaksi tulistuksenpoistinta ja lauhdutinta kumpaakin, sekä höyrystimen ja alijäähdyttimen. Lämpöpumppukäytössä siirtimiltä vaaditaan korkeita paineita ja lämpötiloja yhdistettynä hyvään lämmönsiirtokykyyn ja kompaktiin rakenteeseen, mihin Vahteruksen lämmönsiirtimet olivat sopivat. (Vahterus 2018)

### 5.3 Queens Quay

Vahterus aloitti vuonna 2017 yhteistyön Star Renewable Energy'n kanssa toimittaakseen lämmönsiirtimet kahteen 2,65 MW:n jokilämpöpumppuun Skotlannin Queens Quayhin. Lämpöpumput käyttävät lämmönlähteenään Skotlannin länsirannikolla sijaitsevaa Clyde-joen suistoaluetta, joka on Britteinsaarten syvimpiä rannikkovesiä. Lämpöpumput yltyvät jopa 80 °C loppulämpötilaan, ja toimittavat kaukolämpöverkon kautta sekä lämmitysveden että lämpimän käyttöveden uudelle asutusalueelle, johon kuuluu terveys-, liike- ja vapaa-ajankeskuksia sekä kaupungintalo ja 130 uutta skotlantilaiskotia. Verkostoa on tarkoitus laajentaa tulevaisuudessa mm. korkeakoululla, sairaalalla ja useilla kerrostaloilla. Hankkeeseen valittiin Vahteruksen levylämmönsiirtimet, joihin kuuluivat tulistuksenpoistimia, lauhduttimia sekä ali- ja öljynjäähdyttimiä, sillä prosessissa vaadittiin korkeita lämpötiloja sekä kompaktia rakennetta, jonka myötä tarvittava ammoniakkilataus pysyi alhaisena. (Vahterus n.d.)





Kuva 13. Queens Quayn lämpöpumppu (Vahterus n.d.).

Queens Quayn lämpöpumppujärjestelmä on ensimmäinen luonnollisia kylmäaineita käyttävä teollisuusluokan lämpöpumppu Skotlannissa. Energiatoteutus parani CO<sub>2</sub>-päästöjen osalta huomattavasti 80 %, ja tavoite on saada tuo luku täyteen sataan prosenttiin ennen vuotta 2030. West Dunbartonshiren valtuusto vastaanotti Vuoden kaupunki 2021-palkinnon Euroopan lämpöpumppuyhdistykseltä kiitokseksi innovatiivisuudestaan ja suorituskyvystään. (Vahterus n.d.)

Voiton innoittamana Star Renewable Energy valmistelee uusia kohteita Skotlannissa. Bristolin on suunnitteilla 3 MW:n järjestelmä, joka hyödyntää lämmönlähteenään Castle Parkin kelluvaa satamaa, ja Jarrowhin vastaavaa jokilämpöpumppua, joka ottaa lämpönsä Tyne-joesta. (Vahterus n.d.)



## 6 Johtopäätökset

Teollisten lämpöpumppujen lämmönlähteiden valinta on keskeinen tekijä energiatehokkuuden parantamisessa ja ilmastotavoitteiden saavuttamisessa. Optimaaliset lämmönlähteet ovat ympäristöystävällisiä, helposti hyödynnettäviä ja stabiileja. Samalla geopoliittiset uhat ja energiariippuvuuden vähentämistarpeet korostavat joustavien ja luotettavien energiajärjestelmien merkitystä.

Euroopassa matalalämpöisten kaukolämpöverkkojen kehitys on lisännyt teollisten lämpöpumppujen kysyntää, kun teollisuus pyrkii hyödyntämään hukkalämpöä tehokkaammin. Näillä ratkaisuilla on valtava potentiaali edistää resurssitehokkuutta ja pienentää kustannuksia myös tulevaisuudessa. Lämpöpumppujen laajamittainen hyödyntäminen teollisuuden prosesseissa nähdään tärkeänä keinona saavuttaa nettonollapäästöt vuoteen 2050 mennessä, mutta tavoitteet vaativat huomattavia investointeja ja teknologista innovointia.

Vahteruksen lämmönsiirtimien näkökulmasta teollisiin lämpöpumppuihin soveltuvat parhaiten tasalaatuiset ja likaamattomat lämmönlähteet, kuten prosessihukkalämpö, jäähdytyskiertojen ylijäämälämpö sekä vesistöistä tai maaperästä saatava matalalämpöenergia. Täysin hitsatut levylämmönsiirtimet on suunniteltu kestämaan suuria paineita ja lämpötilaeroja, mutta niiden tehokkuus ja pitkäikäisyys edellyttävät, että lämmönlähteet ovat riittävän puhtaita. Esimerkiksi kiinteitä partikkeleita sisältävä lämmönlähde tai jätevesi – ilman esisuodatusta – voivat aiheuttaa haasteita lämmönsiirtimen puhdistuksessa ja tehokkuuden ylläpitämisessä. Myöskään suorat järjestelmät, joissa siirretään lämpöä esimerkiksi suoraan ilmasta kylmäaineeseen, eivät sovellu Vahteruksen höyrystimelle ilman erillistä välipiiriä.

Teolliset lämpöpumput tarjoavat ratkaisuja, jotka edistävät energiatehokkuutta ja uusiutuvan energian hyödyntämistä, samalla kun ne parantavat energiajärjestelmien toimitusvarmuutta ja vakautta. Niiden kehitys luo pohjaa uusille innovaatioille ja liiketoimintamahdollisuuksille, joilla voidaan vastata ilmastonmuutoksen ja energiariippuvuuden haasteisiin.

## Lähteet

Aalto, E.; Aittamäki, A. (toim.); Alijoki, T.; Hakala, P.; Hirvelä, A.; Kaappola, E.; Mentula, J.; Seinelä, A. 2012. Kylmäteknikka. 4. Helsinki: Suomen Kylmähdistys ry.

Areacademy 2022. Basic refrigeration cycle. Viitattu 19.10.2024. <https://areacooling.com/areacademy/basic-refrigeration-cycle-information/>.

David, A.; Vad Mathiesen, B.; Averfalk, H.; Werner, S.; Lund, H. 2017. Heat Roadmap Europe: Large-Scale Electric Heat Pumps in District Heating Systems. Energies 2017. Viitattu 19.10.2024. <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/4/578>.

European Heat Pump Association 2022. Industrial heat pumps can deliver 180°C and higher under development. Viitattu 23.10.2024. <https://www.ehpa.org/wp-content/uploads/2022/12/Industrial-Heat-Pumps-overview.pdf&ved=2ahUKEwjQ6Zu-8r-JAxW6KxAlHZBoB-AQFnoECBMQAQ&usg=AOvVaw1wgEx0DIBc63xKZyjklErZ>.

Euroopan parlamentti 2022. EU:n päästökauppajärjestelmä ja sen uudistaminen. Viitattu 18.10.2024. <https://www.europarl.europa.eu/topics/fi/article/20170213STO62208/eu-n-paastokauppajarjestelma>.

Garry, M. 2024. Copeland Debuts Ammonia-Based Industrial Heat Pump for Decarbonization of Heating. Viitattu 25.10.2024. <https://naturalrefrigerants.com/copeland-debuts-ammonia-based-industrial-heat-pump-for-decarbonization-of-heating/>.

GEA n.d. E.ON turns sewage into a valuable resource with GEA heat pump technology. Viitattu 25.10.2024. <https://www.gea.com/en/customer-cases/heat-pump-technology-eon-malmo/>.

Hakala, P. & Kaappola, E. 2007. Kylmälaitoksen suunnittelu. 2., tarkistettu painos. Helsinki: Opetushallitus.

Heat Pumping Technologies 2024. Heat Sources and heat sinks. Viitattu 19.10.2024. <https://heatpumpingtechnologies.org/market-technology/heat-sources/>.

IndustrialHeatPumps.nl n.d. Thermodynamic cycle. Viitattu 16.10.2024. [https://industrialheatpumps.nl/english/operating\\_principle/thermodynamic\\_cycle/](https://industrialheatpumps.nl/english/operating_principle/thermodynamic_cycle/)

International Energy Agency n.d. How a heat pump works. Viitattu 26.10.2024. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-heat-pumps/how-a-heat-pump-works>.

John Cantor Heat Pumps n.d. COP estimator/comparator. Viitattu 18.11.2024. <https://heatpumps.co.uk/cop-estimator/>.

Jokela, M. 2020. Kylmäprosessi eli miten kylmä syntyy. Kylmäextra 2/2020. Viitattu 18.10.2024. <https://kylmaextra.fi/teemat/kylmaprosessi-eli-miten-kylma-syntyy/>.

Juuti, P. 2020. Lämmittääkö hyinen Itämeri pian Helsinkiä? Energiayhtiö selvittää kivihiilen korvaamista merivedellä – animaatio näyttää, miten se onnistuisi. Viitattu 19.10.2024. <https://yle.fi/a/3-11573287>.

Kaappola, E.; Hirvelä, A.; Jokela, M.; Kianta, J. 2011. Kylmätekniiikan perusteet. Helsinki: Opetushallitus.

Kapanen, M. 2024. Uusi F-kaasuasetus astunut voimaan. Kylmäextra 1/2024. Viitattu 18.10.2024. <https://kylmaextra.fi/teemat/uusi-f-kaasuasetus-astunut-voimaan/>.

Kianta, J. 2013. Kylmätekniiikan käsikirja. 1., painos. Tampere: JM Kianta Tmi.

Laine, T. 2024. Teollisuuslämpöpumput luonnollisilla kylmäaineilla. Kylmätekniiikan koulutuspäivät 2024. Suomen Kylmäyhdistys ry. Viitattu 18.10.2024.

McKinsey & Company 2024. Industrial heat pumps: Five considerations for future growth. Viitattu 28.10.2024. <https://www.mckinsey.com/industries/industrials-and-electronics/our-insights/industrial-heat-pumps-five-considerations-for-future-growth>.

Mechanical Knowledge 2023. Handbook Of Heat Exchangers. Viitattu 22.10.2024. <https://www.mechanical-knowledge.com/2023/12/handbook-of-heat-exchangers.html>.

Mäkelä, M.; Soininen, L.; Tuomola, S.; Öistämö, J. 2019. Tekniikan kaavasto. 19., painos. Tampere: Tammertekniikka.

- Rauhämäki, J. 2019. Merivesilämpöpumput kiinnostava mahdollisuus myös Helsingissä. Viitattu 20.10.2024. <https://www.helen.fi/blogi/2019/merivesilampopumput>.
- Ritmann, J. 2024. Vahteruksen työntekijän haastattelu. Viitattu 23.10.2024.
- Sweco 2024. Vahteruksen sisäiset koulutusmateriaalit. Viitattu 24.10.2024.
- Vahterus 2018. Lämpöpumput mullistavat kaukolämmityksen Ruotsissa. Hot & Cold Magazine 2/2018. Viitattu 25.10.2024. <https://vahterus.com/resources/hot-and-cold-magazine/refrigeration-issue>.
- Vahterus 2021. User Manual. Viitattu 16.10.2024.
- Vahterus 2023. Sisäiset koulutusmateriaalit. Viitattu 5.11.2024.
- Vahterus 2024. Lämmönsiirratkaisujen edelläkävijä. Viitattu 16.10.2024. <https://vahterus.com/fi/company>.
- Vahterus 2024. Sisäiset koulutusmateriaalit. Viitattu 18.10.2024.
- Vahterus n.d. Maximize Efficiency: Vahterus PSHE Power Award-Winning Heat Pumps at Queens Quay. Viitattu 26.10.2024. <https://vahterus.com/resources/cases/award-winning-heat-pumps>.
- Zühlsdorf, B. 2023. Annex 58 – High-Temperature Heat Pumps. Task 1 – Technologies. Viitattu 24.10.2024. <https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/>.