

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto
School of Energy Systems
Energiatekniikka
Johannes Niittyniemi

Ilmavesilämpöpumppujen käyttöönotto, käyttö ja suorituskyky osana kaukolämpöverkkoa

Diplomityö
2021

85 sivua, 32 kuvaa, 4 taulukkoa

Tarkastajat: Professori Esa Vakkilainen, TkT Jussi Saari

Ohjaaja: DI Teemu Nieminen

Avainsanat: Ilma-vesilämpöpumput, kaukolämpöverkot, lämpöpumput, kaukojäähdytys

Kylmän ilmaston vuoksi lämmöntuotannon osuus kasvihuonepäästöistä on Suomessa merkittävä. Energiantuotannossa on käynnissä globaali murros ja sen vuoksi myös Suomen kaukolämmöntuotannon on uudistuttava. EU:n ja Suomen kansalliset ilmastotavoitteet ohjaavat kaukolämmön tuotantoa käyttöönottamaan ja kehittämään ympäristöystävällisiä tuotantotapoja. Ilmastotavoitteisiin liittyen Fortum on aloittanut laajan ohjelman, johon sisältyy kaukolämmön uusien vaihtoehtoisten tuotantotapojen pilotointi.

Tämän diplomityön tavoitteena oli tutkia ilma-vesilämpöpumppujen käyttöönottoa, suorituskykyä ja toimintaa osana kaukolämpöverkkoa. Tutkimuksessa seurattiin kahden Fortumin rakentaman pilottilämpöpumpun käyttöönottoa ja toimintaa.

Ilma-vesilämpöpumppuja ei ollut aiemmin hyödynnetty laajassa mittakaavassa kaukolämmön tuotannossa kylmissä olosuhteissa, joten erilaisia käyttöönottoon liittyviä haasteita oli ennakoitu olevan pilotoinnin aikana. Ongelmia ratkaistaessa pilottiprojekteista saatiin kerättyä paljon oppeja. Järjestelmiä optimoimalla saavutettiin huomattavaa kehitystä laitosten toiminnassa ja hyötysuhteessa. Saatujen kokemusten ja tulosten perusteella ilma-vesilämpöpumput vaikuttavat toimivalta ja tehokkaalta tavalta tuottaa kaukolämpöä vähäpäästöisesti. Teknologia on kuitenkin vasta kehitteillä ja siksi uusien järjestelmien optimointiin on varattava aikaa ja resursseja, jotta laitokset saadaan toimimaan optimaalisesti. Pilottilaitosten eri toimintavaiheiden ja komponenttien mitoitukseen liittyvät ongelmat olivat ennakoitavissa, koska todellista käyttötilannetta on haastavaa mallintaa ja suunnitella. Saadut käyttökokeemukset voidaan ottaa huomioon uusien laitosten suunnittelussa ja mitoituksessa. Lämpöpumppujen ja verkoston toiminnan yhteensopivuus ja käytön optimoiminen osoittautuivat koekäyttöjen aikana niin merkittäväksi, että ne saattavat ratkaista ilma-vesilämpöpumppujen kannattavuuden. Hyvin toimiessaan ilma-vesilämpöpumput ovat tehokkaita, eikä niiden käyttö edellytä jatkuvaa käyttökonekunnan huomiota. Tässä diplomityössä esitetyt pilottilaitoksista saadut hyötysuhteeseen ja käyttöön liittyvät tulokset ovat alustavia ja lopulliset tulokset saadaan vasta kun laitosten käytöstä on pidempiaikaista kokemusta ja niiden käyttöä on optimoitu saatujen kokemusten perusteella.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology
School of Energy Systems
Energy Technology
Johannes Niittyniemi

Commissioning, use and performance of air to water heat pumps in a district heating network

Master's thesis

2021

85 pages, 32 figures, 4 tables

Examiner: Professor Esa Vakkilainen, D.Sc. Jussi Saari

Supervisor: M.Sc. Teemu Nieminen

Keywords: air-to-water heat pumps, district heating networks, heat pumps, district cooling

Due to the cold climate, the share of greenhouse gas emissions caused by heat production is significant in Finland. Energy production is undergoing a global transformation and therefore Finland's district heating production must also be reformed. The national climate targets of the EU and Finland guide district heating production to introduce and develop environmentally friendly production methods. In connection with the climate targets, Fortum has launched an extensive program, which includes piloting new alternative production methods for district heating.

The aim of this thesis was to study the commissioning, performance and operation of air-to-water heat pumps as part of a district heating network. The study monitors the commissioning and operation of two pilot heat pumps built by Fortum.

Air-to-water heat pumps had not previously been used on a large scale for district heat production in cold conditions, so various commissioning challenges were anticipated during piloting. When solving the problems, a lot of lessons were learned from the pilot projects. By optimizing the systems, significant improvements were made in the operation and efficiency of the plants. Based on the experience and results gained, air-to-water heat pumps appear to be a competent and efficient way to produce district heating with low emissions. However, the technology is still under development and therefore time and resources must be set aside for the optimization of new systems in order to make the plants operate optimally. Problems with the sizing of the various operating phases and components of the pilot plants were foreseeable because it is challenging to model and plan the actual operating situation in advance. The operating experiences gained can be taken into account in the design and dimensioning of new plants. The compatibility and operational optimization of the heat pumps and the network proved to be so significant during the test runs that they may solve the profitability of the air-to-water heat pumps. When operating optimally, air-to-water heat pumps are efficient and do not require constant attention from operating personnel. The efficiency and results obtained from the pilot plants presented in this thesis are preliminary and the final results will be obtained only after a longer period of experience.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Fortum Power and Heat Oy:lle. Työuran aloittaminen Fortumilla on tarjonnut minulle paljon arvokasta kokemusta. Erityiskiitoksen siitä ansaitsee Teemu Nieminen, joka on tukenut minua niin työtehtävissä, kuin diplomityön ohjaajanakin.

Diplomityön tekeminen uuden teknologian pilotoinnista on mielenkiintoinen ja hieno mahdollisuus. Haluan kiittää Fortumia ja sen henkilöstöä diplomityöni mahdollistamisesta. Kari Hyvönen, Simon Lintu, Thomas Ekholm ja Waltteri Kyrölä ottivat minut ennakkoluulottomasti vastaan pilottiprojekteihin, mikä mahdollisti kokemuksien keräämisen tätä diplomityötä varten.

Yliopistolta haluan kiittää Esa Vakkilaista ja Jussi Saarta työn ohjaamisesta ja tarkastamisesta.

Opinnot ovat toisinaan olleet haastavia ja niistä selviytyminen ilman yhteistyötä ja tukea olisi ollut raskasta. Täten haluan kiittää Tuukkaa ja Santeria hyvistä hetkistä ja tuesta opintojen aikana.

Lisäksi kiitoksen ansaitsee avopuolisoni Noora tuesta opintojen aikana. Lopuksi haluan kiittää perhettäni motivoinnista ja tuesta aina peruskoulusta yliopistoon asti.

Helsingissä 14.6.2021

Johannes Niittyneemi

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLILUETTELO

1	Johdanto	8
1.1	Työn tausta	8
1.2	Työn tavoitteet	9
1.3	Työn rajaukset	9
2	Kaukolämpö ja lämpöpumput energiantuotannon murroksessa	10
2.1	Kaukolämmön tuotanto ja hiilidioksidin ominaispäästöt Suomessa	10
2.2	Suomen kansalliset ilmastotavoitteet	12
2.3	Espoon kaupungin ilmastotavoitteet.....	14
2.4	Fortumin ilmastotavoitteet.....	15
2.5	Kaukolämmön tuotannon uudet mahdollisuudet ja haasteet	16
2.5.1	Lämpöpumppujen merkitys osana energiajärjestelmää kasvaa	16
2.5.2	Lämpöpumppujen hyödyntämispotentiaali kaukolämmön tuotannossa	20
2.5.3	Kaukolämmön tuotantoon liittyvät epävarmuudet ja odotettavissa olevat muutokset	22
3	Lämpöpumput	25
3.1	Lämpöpumppujen toimintaperiaate	25
3.2	Lämpöpumpuissa käytettävät kylmäaineet.....	28
3.2.1	Kylmäaineiden luokittelu haitallisuuden perusteella	28
3.2.2	Kylmäaineiden luokittelu turvallisuuden perusteella.....	28
3.2.3	Kylmäaineiden luokittelu kemiallisen rakenteen perusteella.....	29
3.2.4	Esimerkkejä kylmäaineista ja niiden ominaisuuksista.....	31
3.3	Lämpöpumppusovellukset.....	35
3.3.1	Ilma-ilmalämpöpumput.....	35
3.3.2	Ilma-vesilämpöpumput	35
3.3.3	Vesi-vesilämpöpumput	35
3.3.4	Maalämpöpumput ja geoterminen lämpö	36
4	Ilma-vesi lämpöpumput kaukolämpötuotannossa.....	37
4.1	Suurten ilma-vesilämpöpumppujen hyödyntämiseen liittyvät mahdollisuudet	37
4.2	Kaukolämpöverkkoihin liitetyt ilma-vesilämpöpumput Suomessa.....	38
4.3	Suurissa ilma-vesilämpöpumpuissa käytettävät teknologiat	39
4.4	Höyryruiskutuksen hyödyntäminen lämpöpumpputeknologian kehittämisessä	44
4.5	Modulaaristen ratkaisujen ja suurten lämpöpumppujen ominaisuuksien vaikutus kaukolämpökäyttöön	47

5	Ilma-vesilämpöpumppuprojektit Espoossa	48
5.1	Espeen kaukolämpöverkko	48
5.2	Vermo AWHP-pilottiprojekti	48
5.2.1	Vermön AWHP-projektin toimintaympäristö.....	48
5.2.2	Ilma-vesilämpöpumput Vermön projektissa	48
5.3	Aalto Works.....	52
5.3.1	Aalto Works projektin toimintaympäristö	52
5.3.2	Ilma-vesilämpöpumput Aalto Works projektissa	52
6	Vermön ja Aalto Worksin pilottilaitoksista saadut kokemukset.....	56
6.1	Vermön pilottilaitoksesta tehdyt havainnot.....	56
6.1.1	Rakentamisen ja käyttöönoton aikana tehdyt havainnot.....	56
6.1.2	Laitoksen koekäyttövaiheen aikana tehdyt havainnot	57
6.2	Aalto Worksin pilottilaitoksesta tehdyt havainnot	58
6.2.1	Rakentamisen ja käyttöönoton aikana tehdyt havainnot.....	58
6.2.2	Koekäyttövaiheen aikana tehdyt havainnot	58
6.3	Takuukokeet	67
6.3.1	Vermön takuukokeet	67
6.3.2	Aalto Worksin takuukokeet	69
6.4	Laitosten tehokkuus.....	71
6.5	Käytön tarkkailu, tarkastukset ja huolto	75
7	Johtopäätökset.....	79
8	Yhteenveto	83

SYMBOLILUETTELO

Roomalaiset

L_p	äänitaso	dB
L_w	ääniteho	dB
D	leviämismittaus vapaassa kentässä	dB
r	etäisyys	m

Kreikkalaiset

Ω	avaruuskulma
----------	--------------

Lyhenteet

AWHP	Air-to-water heat pump
CFC	Chloro-Fluoro-Carbon
CHP	Combined Heat and Power
COP	Coefficient of Performance (lämpökerroin)
GWP	Global Warming Potential
HCFC	Hydro-Chloro-Fluoro-Carbon
HFC	Hydro-Fluoro-Carbon
HFO	Hydro-Fluoro-Olefin
ODP	Ozone Depletion Potential
PFC	Per-Fluoro-Carbon
TEWI	Total Equivalent Warming Impact

1 Johdanto

1.1 Työn tausta

Ilmastonmuutoksen hillintä ohjaa kaukolämpötuotantoa ympäristöystävällisten tuotantotapojen hyödyntämiseen. Kivihiilen käyttö loppuu Suomessa viimeistään vuoden 2029 alussa eduskunnan päätöksen 416/2019 mukaisesti (Eduskunnan päätös, 416/2019). Nykyisin kaukolämpötuotanto perustuu suurimmaksi osaksi polttaviin kattilalaitoksiin. Fortumin Espoon alueen viimeinen kivihiililaitos lakkautetaan vuoden 2025 aikana, mikä vähentää kaukolämmön tuotantokapasiteettia 160 MW. Fortumin Espoon kaukolämpöverkossa lämpö tuotetaan pääsääntöisesti maakaasulla ja kivihiilellä. Maakaasun polttaminen on huomattavasti kivihiiltä ympäristöystävällisempää, mutta myös maakaasun tuotanto ja siirto aiheuttavat välillisesti merkittäviä kasvihuonepäästöjä (Crow, et. al. 2018).

Polttamisesta aiheutuvien välillisten ja välittömien päästöjen vuoksi kaukolämmöntuotannossa on kehitettävä uusia ympäristöystävällisiä ratkaisuja. Tulevaisuudessa sähkön tuotanto toteutetaan entistä enemmän uusiutuvilla energialähteillä, kuten aurinko- ja tuulivoimalla. Eurooppa-neuvosto on asettanut tavoitteeksi vähentää kasvihuonekaasupäästöjä 40 % vuoteen 2030 mennessä vuoden 1990 tasosta (Holma, et al. 2018). Ilma-vesilämpöpumput ovat houkutteleva ratkaisu sähköistyvässä kaukolämmöntuotannossa, koska ne eivät tarvitse muiden prosessien hukkaenergiaa toimiakseen. Lisäksi niillä voidaan tuottaa sekä kaukokylmää, että kaukolämpöä hyvällä hyötysuhteella.

Kaukolämpölaitosten tulee pystyä toimittamaan asiakkailleen lämpöä luotettavasti kaikissa tilanteissa. Suomen ilmastossa kaukolämpöverkkoon tuotetun lämpöenergian lisäksi keskeistä on varmistaa riittävä lämmöntuotantoteho kaikkein kylmimpinä pakkasjaksoina. Tuotannon on oltava ympäristöystävällistä ja hiilineutraaliuteen pyrkiminen edellyttää nopeaa toimialan uudistumista. Toimitetun lämmön hinnan on oltava kuitenkin kohtuullista ja kilpailukykyistä.

Lämpöpumppujen käytettävyyteen kaukolämmön tuotannossa vaikuttaa esimerkiksi hyödynnettävissä olevat lämmönlähteet, kaukokylmän hyödyntämismahdollisuudet, sähkön hinta, polttoon perustuvan lämmöntuotannon sääntely ja hinta, lämpövarastojen ja

lämpöpumppujen yhteiskäyttö, mahdollisuus kaukolämpöverkostojen lämmön alentamiseen sekä koko kaukolämpöverkon (mukaan lukien asiakkaiden järjestelmät) joustavuus ja ohjaus. Kaukolämpöverkon ja -lämmöntuotannon olemassa olevilla rakenteilla on suuri vaikutus lämpöpumppujen hyödynnettävyyteen.

Energiasektorin murroksen vuoksi Fortum kehittää uusia innovatiivisia kaukolämpöratkaisuja. Ilma-vesilämpöpumpuista kaukolämpöverkossa on saatu lupaavia kokemuksia muualta maailmasta, mutta Suomessa niitä on rakennettu vasta muutamia. Vähäinen määrä johtuu Suomen kylmästä ilmastosta. Talvella lämmöntarve on suurimmillaan ja ilma-vesilämpöpumppujen hyötysuhde on alimmillaan. Lisäksi kylmimmillä pakkasilla ulkolämpötila saattaa laskea ilma-vesilämpöpumppujen käyttöalueen ulkopuolelle, jolloin tuotantoa ei saada tehtyä lainkaan. Tällöin lämmön tuotanto on korvattava polttavilla tekniikoilla tai sähköllä.

1.2 Työn tavoitteet

Tämän diplomityön tarkoituksena on tutkia ja kerätä tietoa ilma-vesilämpöpumppujen soveltuvuudesta kaukolämpötuotantoon. Fortum rakentaa Espoon kaukolämpöverkon alueelle kahta ilma-vesilämpöpumppua, joilla on tarkoitus pilotoida tekniikoiden toimivuutta. Ensimmäinen lämpöpumppu rakennetaan Vermon lämpökeskuksen yhteyteen ja toinen Otaniemen lämpökeskukselle osaksi Aalto Works-projektin aluelämpöverkkoa. Pilottiprojektien toteutuksen aikana kerätyn tiedon ja kokemusten pohjalta tullaan tulevaisuudessa rakentamaan suurempia ilma-vesilämpöpumppujärjestelmiä. Työssä perehdytään kyseisten projektien käyttöönoton aikaisiin haasteisiin, laitosten suorituskykyyn ja käytettävyyteen. Suomen kylmät talvet aiheuttavat haasteita ilma-vesilämpöpumppujen hyödyntämisessä. Työn aikana tutkitaan myös alhaisten lämpötilojen aiheuttamia haasteita ilma-vesilämpöpumpputekniikalle.

1.3 Työn rajaukset

Työn tutkimusosuus rajautuu Vermon ja Otaniemen ilma-vesilämpöpumppuprojekteihin. Työssä tutustutaan syvällisemmin kompressiolämpöpumppuihin ja ilma-vesilämpöpumpputekniikan hyödyntämiseen kaukolämpöverkossa. Absorptiolämpöpumput rajataan kokonaan työn sisällön ulkopuolelle.

2 Kaukolämpö ja lämpöpumput energiantuotannon murroksessa

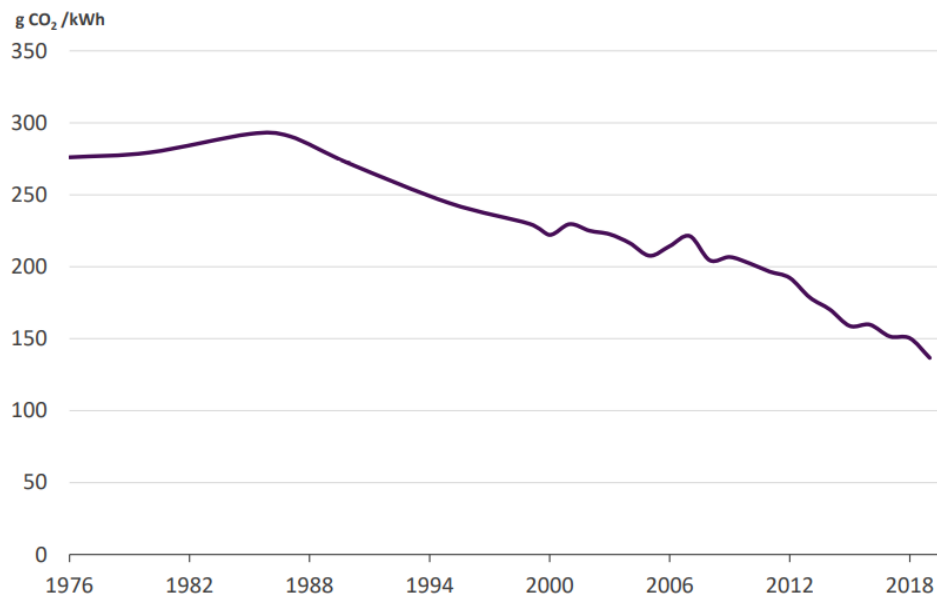
EU:n ja Suomen kansalliset ilmastotavoitteet haastavat kaukolämpölaitokset tutkimaan erilaisia vaihtoehtoja lämmöntuotannon uudistamiseksi osana koko energiajärjestelmän murrosta ja hiilineutraaliuden saavuttamiseksi nopealla aikataululla. Kylmän ilmaston vuoksi lämmöntuotannon osuus kasvihuonepäästöistä on Suomessa suuri. Lämpöpumput tarjoavat osaratkaisun ilmastotavoitteiden saavuttamiseksi.

2.1 Kaukolämmön tuotanto ja hiilidioksidin ominaispäästöt Suomessa

Energiateollisuus ry:n vuotta 2019 koskevan tilastoinnin perusteella (Energiateollisuus, 2020) kaukolämmön hankintamäärä Suomessa oli yhteensä 36 600 GWh. Energian hankintamäärällä tarkoitetaan kaukolämpölaitosten käyttämän energian määrää. Hankitusta energiamäärästä 32 700 GWh tuotettiin polttoaineilla ja 3 800 GWh tuotettiin lämmön talteenotolla ja lämpöpumpuilla. Viimeisen viiden vuoden aikana lämmön talteenotto ja lämpöpumpujen tuotanto on kasvanut 170 %. Lämmönhankinnasta 66,6 % oli höyryvoimalaitosten vastapainelämpöä tai vastaavaa yhteistuotantolämpöä kaasuturbiineista, kaasumoottoreista tai dieselmoottoreista. Vuonna 2019 tuotetun yhteistuotantosähkön määrä oli 11 000 GWh. Kaukolämmön ja siihen liittyvän sähkön tuotantoon käytettiin yhteensä 51 900 GWh polttoaineita, josta erillistuotantoon käytettiin 9 900 GWh. Kaukolämmön piirissä olevien asiakkaiden lukumäärä on kasvanut jatkuvasti 1970 -luvulta alkaen. Asiakkaiden lukumäärä oli vuoden 2019 lopussa yhteensä 155 500 kpl (0,6 % kasvu edellisvuodesta). Perustietoa kaukolämpölaitosten toiminnasta on esitetty taulukossa 1 ja kaukolämmön hankinnan ominaispäästöjen kehitys on esitetty kuvassa 1. Kaukolämmön hankinnan ominaispäästöt vuonna 2019 olivat 136,6 gCO₂/kWh, joka on 9,1 % edellisvuotta vähemmän. Yhteistuotannon päästöt on laskennassa jaettu lämmölle ja sähkölle hyödynjakomenetelmällä.

Taulukko 1. Perustietoa kaukolämpölaitosten toiminnasta vuonna 2019 (Energiateollisuus, 2020)

	Vuosi 2019	Muutos vrt. 2018
Kaukolämmön hankinta yhteensä	36 600 GWh	- 1,4 %
Kaukolämmön tuotanto polttoaineilla	32 700 GWh	- 2,9 %
Kaukolämmön tuotantoon liittyvä sähkön tuotanto	11 000 GWh	- 4,4 %
Edellisiin käytetty polttoaine	51 900 GWh	- 3,1 %
Lämmön talteenotto ja lämpöpumpun tuotanto	3 800 GWh	+ 13,9 %
Kaukolämmön käyttö	33 200 GWh	- 0,8 %
Asuintalojen osuus käytöstä	53,6 %	- 0,2 %-yks.
Asiakkaat:		
❖ Lukumäärä	155 500 kpl	+ 0,6 %
❖ Sopimusteho	19 100 MW	+ 0,3 %
❖ Rakennustilavuus	1004 milj. m ³	+ 1,1 %
❖ Asuintalojen osuus rakennustilavuudesta	46,2 %	+ 0,3 %-yks.
Myydyn lämmön verollinen keskihinta:		
❖ Aritmeettinen keskiarvo	82,30 €/MWh	+ 1,1 %
❖ Lämmön myynnillä painotettu keskiarvo	80,85 €/MWh	+ 2,2 %
Kaukolämpöverkon pituus	15 430 km	+ 1,9 %



Kuva 1. Kaukolämmön hankinnan ominaispäästöjen kehitys (Energiateollisuus, 2020)

2.2 Suomen kansalliset ilmastotavoitteet

EU on sitoutunut olemaan ilmastoneutraali vuoteen 2050 mennessä. Tavoitteen saavuttamiseksi EU:n komissio on käynnistänyt Green Deal -ohjelman, jonka tavoitteena on vähentää päästöjä, säilyttää ja kehittää Euroopan luonnonympäristöä, sekä investoida huippututkimukseen ja innovaatioihin. Euroopan unioni asettamat velvoitteet ja päätökset sitovat Suomen energiantuotantoa. EU on asettanut tavoitteeksi 40 prosentin vähennyksen kasvihuonepäästöissä vuoteen 2030 mennessä suhteessa vuoden 1990 tasoon. EU:n tavoite on vähentää päästökauppasektorin kasvihuonekaasupäästöjä 43 prosenttia. Päästökaupan piiriin kuuluvat lentoliikenne, kaukolämmöntuotanto, sähköntuotanto ja teollisuus. Suomen tavoitteena on vähentää taakanjakosektorin päästöjä 39 prosenttia vuoteen 2030 mennessä, joka pitää sisällään maatalouden, liikenteen, jätteet ja rakennusten erillislämmityksen. Green deal -ohjelman yhteydessä on myös linjattu energiankäytön tehokkuuden parantamisesta ja uusiutuvien energialähteiden osuuden nostamisesta. Tavoitteisiin kuuluu, että energian käyttöä tehostetaan 32,5 prosenttia vuoteen 2030 mennessä. Vastaavasti uusiutuvien energialähteiden osuuden tavoite vuoteen 2030 mennessä on 32 prosenttia ja energiankäyttöä on tehostettava 0,8 prosenttia vuosittain vuoteen 2030 asti. (Ympäristöministeriö, 2021)

Vuonna 2015 voimaan astunut kansallinen ilmastolaki määrittää Suomen ilmastopolitiikan. Laki määrittää, että Suomen on vähennettävä kasvihuonekaasupäästöjä 80 % vuoden 1990 tasosta vuoteen 2050 mennessä. Ilmastolaissa määritetään myös ilmastopolitiikan suunnittelujärjestelmä ja linjataan ilmastotavoitteiden toteutumisen seurannasta. Sanna Marinin hallitus on linjannut Suomen hiilineutraaliuden tavoitteeksi vuoden 2035. Ilmastolakia tullaan uudistamaan siten, että hiilinielut ja päästöt ovat tasapainossa ennen vuotta 2035. Ilmastojä energiastategia, sekä keskipitkän aikavälin suunnitelma tullaan päivittämään ennen vuoden 2021 loppua. (Ympäristöministeriö, 2021)

Ympäristö- ja ilmastoministeri Krista Mikkonen asetti 15.4.2020 ryhmän laatimaan listan mahdollisista koronaviruksen jälkeisistä elvytystoimista. Elvytystoimien on tarkoitus vastata samalla ilmastokriisiin ja luonnon köyhtymiseen liittyviin ongelmiin. Työryhmä tarkasteli toimeksiantonsa mukaisesti sitä, miten koronapandemian vuoksi tehtävät taloutta elvyttävät toimet valitaan siten, että ne hyödyttävät myös tavoitteiden saavuttamista päästöjen näkökulmasta ja mahdollistavat sen, että Suomesta tehdään maailman ensimmäinen hiilineutraali

yhteiskunta ja luonnon monimuotoisuuden heikkeneminen saadaan pysäytettyä Marinin hallituksen päätösten mukaisesti. Työryhmä esitti teemaan liittyen yhdeksän toimenpidekokonaisuutta, joissa se muun muassa kuvasi tavoitteiden saavuttamiseksi tarvittavia yhteiskunnallisia murroksia. Esitettyjä murroksia olivat:

- energiajärjestelmän murros
- julkisen sektorin murros
- yksityisen kulutuksen murros
- yhdyskuntien ja liikennejärjestelmän murros
- ruokajärjestelmän murros
- teollisuuden murros
- luontopohjaiset ratkaisut ja luonnon monimuotoisuuden murros
- työelämän ja osaamisen murros.

Energiajärjestelmän murroksen osalta työryhmä listasi useita toimenpiteitä, joilla jo käynnissä olevaa energiajärjestelmän murrosta voitaisiin vauhdittaa. Monet teknologiat ja ratkaisut ovat vasta kehitysvaiheessa ja täten uusia investointeja tarvitaan huomattavia määriä. Vähäpäästöiset ratkaisut tarvitsevat tuekseen merkittävän määrän uutta, puhdasta sähkötuotantokapasiteettia. (Kestävän elvytyksen työryhmä, 2020)

Työvoima- ja elinkeinoministeriö on aloittanut uuden ilmasto- ja energiastrategian valmistelun Sanna Marinin hallitusohjelman mukaiseksi. Uudessa strategiassa tullaan ottamaan huomioon EU:n asettamat ilmasto- ja energiatavoitteet. Strategiassa tullaan huomioimaan EU komission ilmoittama päästötavoite, jonka mukaan 40 prosentin päästövähennystavoitetta vuoteen 2030 mennessä kiristettäisiin 55 prosenttiin, ja hallitusohjelman mukainen tavoite hiilineutraaliudesta vuoteen 2035 mennessä. (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2021)

Sanna Marinin hallitusohjelmassa on linjattu, että Suomen sähkön ja lämmön tuotannon tulee olla lähes päästötöntä vuoden 2030 loppuun mennessä. Hallitusohjelmassa on määritetty toimenpiteitä kaukolämmön tuotantoon liittyen. Uudistuksessa toteutetaan energiaverotuksen kokonaisuudistus, jonka tarkoituksena on tukea etenemistä hiilineutraaliin kiertotalouteen. Kokonaisuudistuksen ensimmäisessä vaiheessa II veroluokan sähkövero alennetaan kohti EU:n sallimaa minimitasoa ja kaukolämpöverkkoon kytketyt lämpöpumput ja konesalit siirretään sähköveronluokkaan II. Energiatukijärjestelmä tulee kohdistumaan

tuotantotukien sijaan energiateknologian investointien tukemiseen. Kivihiilen energiakäytön päättymisestä vuoden 2029 aikana on päätetty jo aiemman hallituskauden aikana. Energia-yhtiöitä, jotka luopuvat kivihiilestä ennen vuoden 2025 loppua, tullaan tukemaan kannustimilla. Kaukolämpöverkkoon toteutettavien polttoon perustumattomien tekniikoiden, kuten lämpöpumpputekniikoiden, käyttöönottoa ja pilotointia tullaan edistämään. Turpeen energiakäyttö tullaan puolittamaan vuoteen 2030 mennessä, joka huomioidaan energiaverotuksen kokonaisuudistuksessa. (Valtioneuvosto, 2021)

Eduskunta on päättänyt vuoden 2021 alussa voimaan tulleista energian käyttöön liittyvistä verouudistuksista hallituksen esityksen perusteella (Hallituksen esitys, 167/2020). Uudistuksen tavoitteena on muun muassa edistää hiilineutraaliutta. Uudistuksessa lämmityspolttoaineiden verotusta muutetaan vähentämällä CHP-tuotannon verotukea ja korottamalla lämmityspolttoaineiden veroja. Toimenpiteet tulevat kiristämään lämmityspolttoaineiden verotusta 105 miljoonalla eurolla. Kaukolämpöverkkoon kuuluvien lämpöpumppujen ja konosalien siirtäminen alempaan sähköveroluokkaan on valmisteilla, ja sen on tarkoitus tulla voimaan vuoden 2021 aikana.

2.3 Espoon kaupungin ilmastotavoitteet

Espoon kaupungin vuosien 2017-2021 valtuustokaudelle laaditussa strategiassa tavoitteeksi hiilineutraaliudelle on asetettu vuosi 2030. Ilmasto-ohjelma määrittä ilmastotyön suunnan vuoteen 2020 asti. Ilmasto-ohjelmassa Espoon kaupunki on sitoutunut muun muassa edistämään uusiutuvien energianlähteiden käyttöönottoa. Kyseisen ilmasto-ohjelman lisäksi Espoo noudattaa myös pääkaupunkiseudun ilmastostrategiaa ja työ- ja elinkeinoministeriön kunta-alan energiatehokkuussopimusta ja kiinteistöalan energiatehokkuussopimusta. (Espoo, 2021)

Lähes puolet Espoon CO₂-ekvivalenttipäästöistä aiheutuu kaukolämpötuotannosta (Espoo, 2016). Tästä johtuen Fortumin tekemät toimenpiteet hiilineutraalin tuotannon hyväksi ovat merkittävässä roolissa Espoon ilmastotavoitteiden saavuttamisen kannalta. Espoon kaupunki toimii tiiviissä kehitysyhteistyössä Fortumin kanssa. Yhteistyön päämääränä on edistää älykkäitä energiaratkaisuja. Uusiutuvan energian osuutta on hiljattain lisätty Kivenlahteen

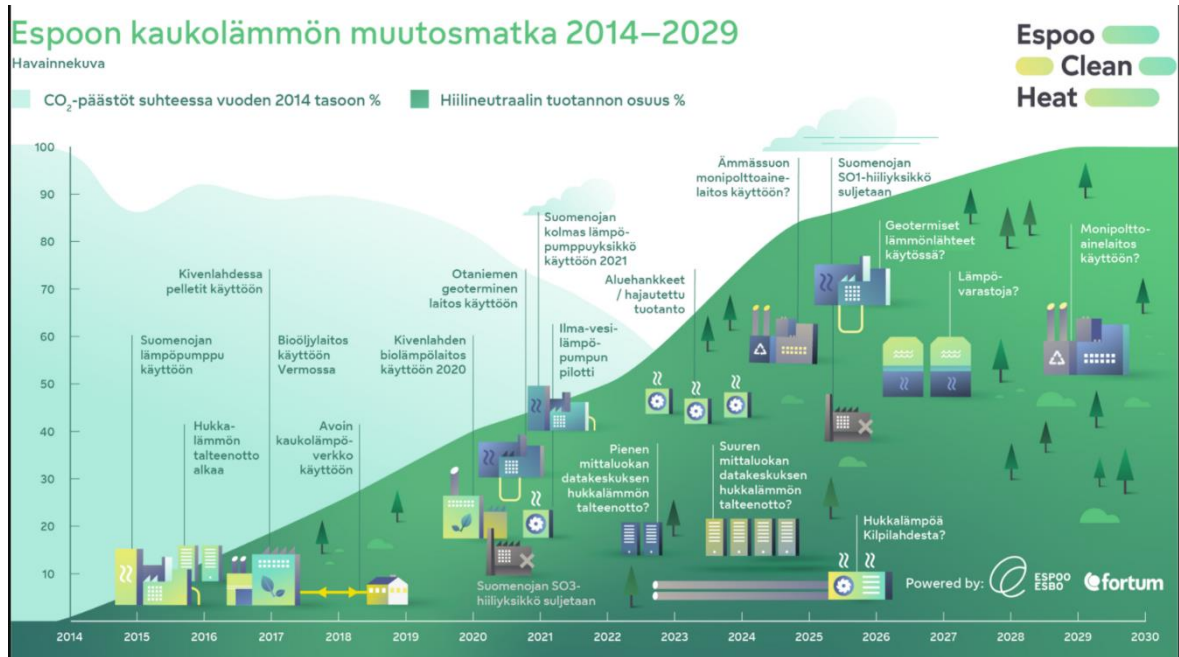
rakennetulla biokattilalla ja Suomenojan voimalaitokselle rakennetuilla lämpöpumpuilla. ST1 on lisäksi käynnistänyt vuonna 2015 geolämpöhankkeen, joka onnistuessaan tuottaisi 320 GWh lämpöä vuosittain. Suomenojan lämpöpumppuyksikön valmistuminen tulee nostamaan hiilineutraalin kaukolämmön osuuden yli 50 prosenttiin. (Espoo, 2019)

Ilma-vesilämpöpumppujen mahdollinen lisääntyminen voi toimia suuressa roolissa ilmastotavoitteiden saavuttamisessa niin Espoossa, kuin koko Suomessakin. Tässä diplomityössä tutkittavat ilma-vesilämpöpumppuprojektit ovat Fortumin pilottiprojekteja, joissa kerätään kokemuksia ja tietoa tulevia investointeja varten. Näin ollen pilottiprojektit ovat tärkeässä roolissa, kun arvioidaan eri teknologioiden hyödynnettävyyttä kasvihuonekaasupäästöjen alentamiseksi.

2.4 Fortumin ilmastotavoitteet

Fortum päivitti vuoden 2020 lopussa koko konsernia koskevan strategian, jonka tarkoituksena on edistää siirtymistä puhtaaseen energiantuotantoon ja samalla varmistaa kestävä taloudellinen tulos. Fortum tavoittelee hiilineutraaliutta vuoteen 2050 mennessä Pariisin sopimuksen mukaisesti. Strategiassa on määritetty välitavoitteet hiilineutraaliuden saavuttamiseksi. Hiilineutraaliuden saavuttamiseksi Fortum on asettanut välitavoitteeksi Euroopan tuotannon hiilineutraaliuden vuoteen 2035 mennessä, hiilidioksidipäästöjen vähentämisen 50 prosentilla vuoteen 2030 mennessä vuoden 2019 tasosta ja vähintään 12 merkittävää vapaaehtoista luonnon monimuotoisuutta tukevaa toimenpidettä vuonna 2021. Kivihiilivoimantuotanto tullaan lopettamaan Espoossa vuoteen 2025 mennessä ja Fortumin kokonaiskivihiilivoimakapasiteetti tullaan puolittamaan ennen vuoden 2025 loppua. (Fortum, 2021)

Fortum yhdessä Espoon kaupungin kanssa on sitoutunut muuttamaan kaukolämmön tuotannon Espoossa hiilineutraaliksi ennen vuotta 2030. Hiilineutraaliuden välitavoitteena on jo aiemmin mainittu kivihiilestä luopuminen vuoden 2025 aikana. Hiilineutraalisuus-projektia kutsutaan nimellä Espoo Clean Heat. Muutos kohti hiilineutraaliutta sisältää monia toimenpiteitä. Espoo Clean Heat:in mukainen kaukolämmön muutosmatka on esitetty kuvassa 2. (Fortum, 2021b)



Kuva 2. Espoon kaukolämmön muutossuunnitelma hiilineutraaliin tuotantoon (Fortum, 2021b)

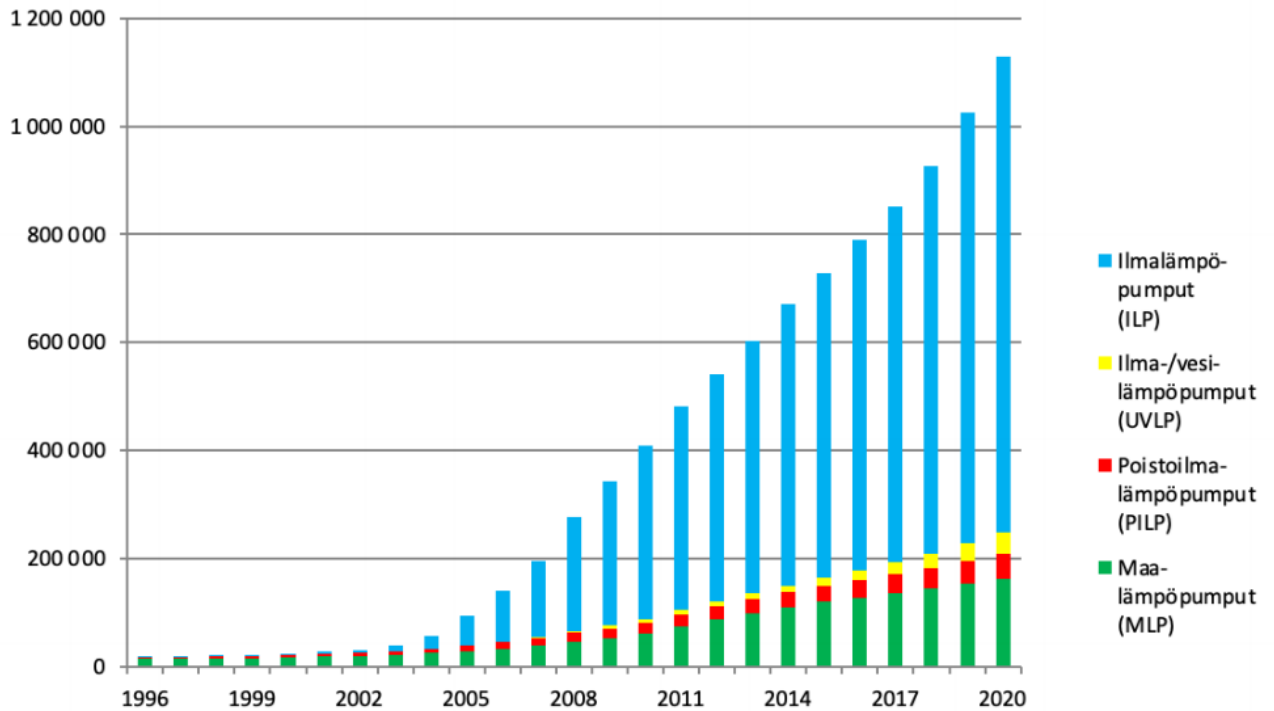
2.5 Kaukolämmön tuotannon uudet mahdollisuudet ja haasteet

Kaukolämpölaitosten tulee pystyä toimittamaan asiakkailleen lämpöä luotettavasti kaikissa tilanteissa. Sekä asiakkaat että säädökset edellyttävät tuotannon olevan ympäristöystävällistä ja hiilineutraaliuteen liittyvät tavoitteet edellyttävät nopeaa toimialan uudistumista. Samaan aikaan toimitetun lämmön hinnan on oltava kohtuullista ja kilpailukykyistä. Suomen ilmastossa kaukolämpöverkkoon tuotetun lämpöenergian lisäksi keskeistä on varmistaa riittävä lämmöntuotantoteho kaikkein kylmimpinä pakkasjaksoina. Lämpöpumput tulevat olemaan merkittävä osa lämmöntuotantoa.

2.5.1 Lämpöpumppujen merkitys osana energiajärjestelmää kasvaa

Lämpöpumpuilla on merkittävä rooli tulevaisuuden lämmöntuotantoratkaisuissa. Lämpöpumppujen lisääntymiseen liittyy myös lämmityksen sähköistyminen ja siihen liittyvät huoltovarmuuskysymykset (Pöyry Management Consulting Oy, 2019). Ilmalämpöpumput tulevat edelleen lisääntymään. Kuvassa 3 on esitetty lämpöpumppujen kumulatiivinen määrä (SULPU, 2020). Suurin osa myydyistä pumpuista on pieniä kotitalouksille myytyjä pumppuja. Suuria, kaukolämpöverkkoon kytkettyjä, ilma-vesilämpöpumppuja ei Suomessa ole tiettävästi aiemmin toteutettu kuin yksi Suur-Savon Sähkön toimesta Puumalaan. Fortumin

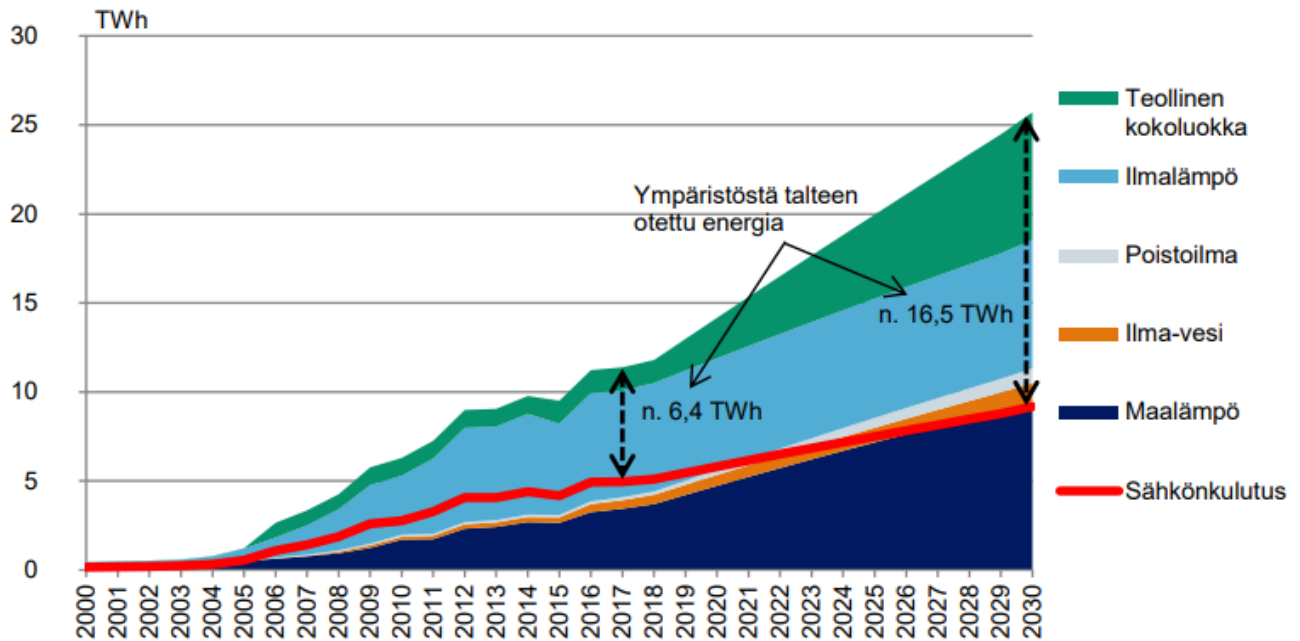
Esposseen toteuttamat pilottilaitokset ovat siten tärkeitä avauksia tällä tekniikalla. Ilmalämpöpumput eivät edellytä toimiakseen muita lämmönlähteitä, ja ne ovat investointikustannuksiltaan muita lämpöpumppuja edullisempia. Niiden hyötysuhde kuitenkin pienenee ilman lämpötilan laskiessa ja ne eivät tuota lämpöä huippukulutustilanteissa, joita Suomessa esiintyy kovien pakkauskautien aikana. (Sweco, 2019)



Kuva 3. Suomeen myydyt lämpöpumput, kumulatiivinen määrä. (SULPU, 2020)

Pöyry Management Consulting Oy (2019) on tarkastellut Huoltovarmuuskeskuksen toimeksiannosta energiamurroksen vaikutusta huoltovarmuuteen. Selvityksessä on arvioitu energiankulutuksen ja -tuotannon muutoksia vuoteen 2030 asti, tarkasteltu mitä huoltovarmuusriskejä muutokseen liittyy, ja esitetty tapoja, joilla näitä riskejä voitaisiin 2020-luvulla pienentää. Arvioinnin pohjaksi Pöyry oli muodostanut kaksi tarkasteltavaa skenaariota Huoltovarmuus 2030 sekä Lämmityksen sähköistyminen. Huoltovarmuus 2030 -skenaario oli rakennettu Juha Sipilän hallituksen energia- ja ilmastostrategian mukaisen politiikkaskenaarion pohjalle. Lämmityksen sähköistyminen -skenaariossa tarkasteltiin tilannetta, jossa sekä teollisen kokoluokan että kiinteistökohtaisten lämpöpumppujen tuotanto lisääntyy Huoltovarmuus 2030 -skenaariota voimakkaammin. Kuvassa 4 on esitetty Lämmityksen

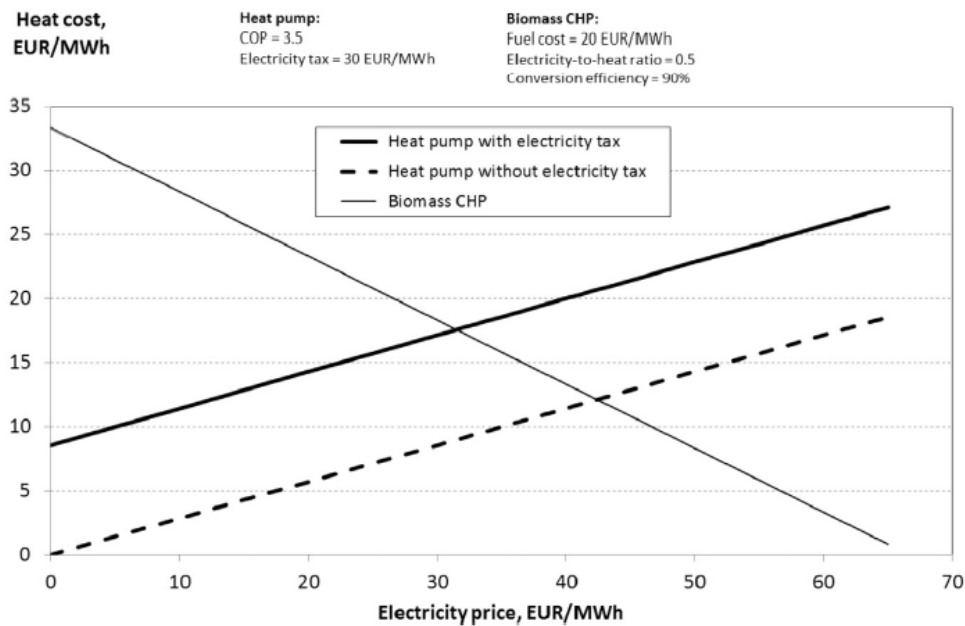
sähköistyminen -skenaarion mukainen ennuste lämpöpumppujen lämmöntuotannon ja sähkökulutuksen kehitykselle.



Kuva 4. Huoltovarmuus energiamurroksessa -raportissa esitetyn Lämmityksen sähköistyminen -skenaarion mukainen ennuste lämpöpumppujen lämmöntuotannon ja sähkökulutuksen kehitykselle (Pöyry Management Consulting Oy, 2019). Kuvaajien laadinnassa on käytetty apuna SulPu:n, Tilastokeskuksen ja Energiateollisuuden tilastoja.

Yhdistetyn lämmön- ja sähköntuotantolaitosten (CHP) ja erilaisiin lämmönlähteisiin perustuvien lämpöpumppujen yhdistelmän käyttäminen on Suomen kaltaisessa ilmastossa tehokasta. Lämpöpumpuilla saadaan tuotettua sähköön perustuen hyvällä hyötysuhteella peruslämpöä ja CHP laitoksilla saadaan tuotettua lämmön huippukulutustilanteessa suurella teholla lämpöä, jolloin myös laitoksen sähköntuotanto on huipussaan. Tämä palvelee suurella teholla toimivien lämpöpumppujen sähkön tehontarvetta. Kaukolämpöä tuottavissa CHP-laitoksissa sähköntuotanto perustuu lämmöntarpeeseen. Sähköntuotannon ja kulutuksen historiatiedon perusteella sähkön tuotanto CHP-laitoksissa korreloi Suomessa melko voimakkaasti sähkön kulutuksen kanssa. (Energiavirasto, 2019) Pöyry Management Consulting Oy (2019) tekemän selvityksen tietojen perusteella merkittävästä määrästä 2020-luvulla käyttökänsä päähän tulevista kaukolämpö-CHP -laitosten korvausinvestoinneista ei ole vielä tehty investointipäätöksiä. Raportissa on pohdittu erilaisia keinoja sähkön toimitusvarmuuden turvaamiseksi. Yksi keino on käyttökänsä päähän tulevien CHP -laitosten

uudistamisten tukeminen. Averfalk, Ingvarsson, Persson, Gong ja Werner (2017) vertailivat tutkimuksessaan biomassan polttoon perustuvien CHP-laitosten ja suurten lämpöpumppujen kannattavuutta tyypillisessä markkinatilanteessa Ruotsissa. Alhaisilla sähkönhinnoilla lämmön tuottaminen lämpöpumpuilla on CHP-laitoksia kannattavampaa ja korkeilla sähkön hinnoilla päinvastoin (kuva 5). Kuvaajassa on esitetty lämpöpumpuilla tuotetun lämmön hinta ilman sähköveroa ja sähköveron kanssa. Kuvasta selviää havainnollisesti se, kuinka sähkövero vaikuttaa lämpöpumppujen kannattavuuteen ja kilpailukykyyn.



Kuva 5. Biomassan polttamiseen perustuvalla CHP-laitoksella ja lämpöpumpulla tuotetun lämmön hinta erilaisilla sähkönhinnoilla. Tyypilliset Ruotsalaisen markkinatilanteen lähtöarvot on esitetty kuvaajan yläpuolella samoin kuin lämpöpumpun COP -arvo. (Averfalk H, et al. 2017)

Kaukolämpöverkkoon kytketyt lämpöpumput voivat toimia tulevaisuudessa yhtenä keinona lisätä sähkön kulutusjoustoja ja siten lisätä energiasysteemin vakautta. Tuuli ja aurinkoenergian aiheuttamia korkeita tuotantopiikkejä voidaan hyödyntää kaukolämpöverkon lämmön varastointia hyödyntämällä ja lämpöpumpuilla (Averfalk H, et al., 2017). On arvioitu, että lämpöpumppujen, lämpövarastojen ja CHP tuotannon yhdistelmä, jossa ylimääräinen tuotettu sähkö varastoidaan lämpönä kaukolämpöverkoston yhteydessä, voidaan toteuttaa kustannustehokkaasti (Averfalk H. et al. 2017, Mathiesen B. ja Lund H. 2009).

2.5.2 Lämpöpumppujen hyödyntämispotentiaali kaukolämmön tuotannossa

Lämpöpumppujen hyödyntämispotentiaaliin kaukolämmön tuotannossa vaikuttaa useat erilaiset tekijät. Tällaisia ovat esimerkiksi käytettävissä olevat lämpöpumppujen lämmönlähteet, kaukokylmän hyödyntämismahdollisuudet, sähkön hinta, polttoon perustuvan lämmöntuotannon sääntely ja hinta, lämpövarastojen ja lämpöpumppujen yhteiskäyttö, mahdollisuus kaukolämpöverkostojen lämmön alentamiseen sekä koko kaukolämpöverkon (mukaan lukien asiakkaiden järjestelmät) joustavuus ja ohjaus. Kaukolämpöverkon ja -lämmöntuotannon olemassa olevilla rakenteilla on suuri vaikutus lämpöpumppujen potentiaaliin.

Helin et, al. (2018) mallinsivat sitä, kuinka kaukolämpöverkostoisiin liitettävät lämpöpumput voisivat lisätä energiantuotannon kestävyyttä sähkön- ja lämmöntuotannossa pohjoismaisilla energiamarkkinoilla. Erityisesti tarkastelun kohteena oli se, kuinka lisääntyvän uusiutuvan energiantuotannon aiheuttaman sähkön määrän ja hinnan vaihtelua voitaisiin hyödyntää lämpöpumppujen käytössä. Kaukolämpöön liitettävien yksittäisten lämpöpumppujen investointipäätös tehdään tarkastelemalla kyseisen investoinnin kannattavuutta, mutta lämpöpumppujen laaja-alainen käyttöönotto voi vaikuttaa koko sähkömarkkinaan. Mallinnus toteutettiin lisäämällä lämpöpumppuja olemassa oleviin CHP-laitoksia hyödyntäviin kaukolämpöverkkoihin siten, että CHP-laitosten tuotantoa korvattiin lämpöpumpuilla sähkön hinnan ollessa alhaista. Tulosten perusteella lämpöpumput alensivat kaukolämmön hintaa kaikissa käytetyissä skenaarioissa. Laskenta toteutettiin ilman lämpöpumppujen sähköveroa. Samaan aikaan sähkön alhaisimmat tuntihinnat nousisivat, millä olisi positiivinen vaikutus uusiutuvan energian tuotannon investointeihin. Lämpöpumppujen laaja käyttö kaukolämpöverkoissa alentaisi polttoaineiden käyttöä pohjoismaisissa sähkön- ja lämmöntuotantojärjestelmissä sekä tasapainottaisi uusiutuvan energiantuotannon aiheuttamia sähkönhinnan lyhytaikaisia alhaisia hintoja pohjoismaisilla sähkömarkkinoilla. (Helin, et al. 2018).

VALOR Partners Oy laati vuonna 2016 Energiategollisuus ry:n toimeksiannosta selvityksen suurten lämpöpumppujen hyödyntämismahdollisuuksista kaukolämmön tuotannosta Suomen olosuhteissa. Suurten lämpöpumppujen osuus kaukolämmön kokonaistuotannosta Suomessa vuonna 2016 oli vain 0,6 TWh (1,7 % kokonaistuotannosta). Ruotsissa tuotantomäärä oli puolestaan 4,0 TWh (7,4 % kokonaistuotannosta). Lämpöpumppujen hyödyntämisen kannattavuus riippuu kaukolämpöjärjestelmästä ja sen ominaisuuksista. Potentiaalin

arvioinnissa täytyy huomioida useita lämpöpumppuinvestointien kannattavuuteen vaikuttavia tekijöitä. Tärkeimmät potentiaaliin liittyvät tekijät ovat hyödynnettävissä olevat hukkalämmönlähteet, lämmönlähteiden sijainti, lämmönlähteiden hinta, maankäyttö, sähköverkon olemassa oleva kapasiteetti ja muun olemassa olevan lämmöntuotantokapasiteetin rakenne. Lämpöpumppujen todellisen hyödyntämispotentiaalin määrittämiseksi jokainen kaukolämpöjärjestelmä on täten käytävä erikseen läpi, koska lämpöpumppujen hyödyntämispotentiaali vaihtelee huomattavasti eri järjestelmien välillä. (VALOR Partners Oy, 2016)

Lämpöpumppujen taloudellisesti kannattavaan hyödyntämispotentiaaliin vaikuttavat muun muassa sähkön ja lämmön hintakehitys, energiaverot sekä palvelinkeskusten sijoittuminen kaukolämpöverkon alueelle. VALOR Partners Oy käytti lämpöpumppujen karkeaa hyödyntämispotentiaalia arvioidessaan lähtökohtana Suomessa toimivien kaukolämpöyhtiöiden kaukolämmönmyyntiä (kulutus häviöiden jälkeen) vuonna 2014. Arviossa kaukolämpöyhtiöt jaoteltiin kolmeen kategoriaan myynnin määrän mukaan, ja niille kullekin arvioitiin kaukolämmön myynnistä se osuus, joka voitaisiin mahdollisesti tuottaa kustannustehokkaasti käyttämällä suuria lämpöpumppuja. Merkittävimpään kategoriaan kuuluvat Suomen suurimpien kaupunkien kaukolämpöyhtiöt, kuten Fortum Espoossa, Helsingin energia, Tampereen Sähkölaitos sekä Vantaan ja Turun energiayhtiöt. Suurten lämpöpumppujen potentiaali on merkittävin suurissa järjestelmissä, sillä niissä lämpöpumppuja voidaan helposti hyödyntää myös kaukojäähdytyksen tuotannossa. Kaukojäähdytyksen ja kaukolämmön yhdistäminen parantaa lämpöpumppuinvestointien kannattavuutta. (Valor Partners Oy, 2016)

Arviossa hyödynnettiin toteutetuiden lämpöpumppuinvestointeja ja simuloiteja. Niistä saatujen tulosten perusteella saatiin karkea arvio eri kokoisten kaukolämpöjärjestelmien suurten lämpöpumppujen hyödyntämispotentiaalista. Suurissa järjestelmissä arvioitiin potentiaalin olevan 12–15 % lämmöntuotannosta. Keskisuurten toimijoiden osalta hyödyntämispotentiaaliksi arvioitiin 6-10 %. Suurten lämpöpumppujen hyödyntämispotentiaaliksi pienissä järjestelmissä arvioitiin olevan yhteensä 4-10 %. Arvioimalla erikokoisten toimijoiden potentiaalia suhteessa näiden kaukolämmöntuotantoon, saatiin VALOR Partners Oy:n tekemässä arviossa suurten lämpöpumppujen hyödyntämispotentiaaliksi Suomessa noin 3,0 – 4,2 TWh, eli 9-13 % myydyin kaukolämmön kokonaismäärästä. Raportissa on esitetty myös tekijöitä, jotka vaikuttavat lämpöpumppujen hyödynnettävyyteen kaukolämpöverkkojen

lämmöntuotannossa. Esimerkkeinä tällaisista tekijöistä ovat sähkön hinta ja polttoon perustuvan lämmöntuotannon sääntely ja kustannukset. Lämpöpumppujen käyttöpotentiaalista kaukolämmön tuotannossa on esitetty myös suurempia arvioita. Kaisa Kontu (2020) on väitöstudkimuksessaan arvioinut, että lämpöpumppujen osuus kaukolämmön tuotannosta voisi olla 10 – 20 %, mutta hyödyntämispotentiaali vaihtelee laitoksittain.

2.5.3 Kaukolämmön tuotantoon liittyvät epävarmuudet ja odotettavissa olevat muutokset

Valitut EU:n ja kansallisen tason strategiat energiantuotannon hiilineutraaliustavoitteiksi määrittävät selkeästi kaukolämpöverkkoihin tuotetun lämmöntuotannon suuntaa sekä lyhyellä että pitkällä aikavälillä. Merkittävimmät yksittäiset tiedossa olevat lämmöntuotannon muutokset ovat kivihiilen ja polttoturpeen käytöstä luopuminen. Myös muiden fossiilisten polttoaineiden verotuksen kiristymiseen liittyviä päätöksiä on jo tehty. Kaukolämmöntuotanto muuttuu poltosta enemmän sähkön hyödyntämiseen muun muassa lämpöpumppuja hyödyntämällä. Tämän kehityssuunnan vuoksi sähkön hinnan kehityksellä on merkittävä vaikutus lämmöntuotannon valintoihin ja samalla se muodostaa merkittävän epävarmuustekijän kaukolämpöliiketoiminnalle. Lämpöpumppuihin perustuva tekniikka mahdollistaa kaukolämmöntuotannon uudistumisen, mutta samalla uusi tekniikka voi houkutella kaukolämpöä käyttäviä asuinkiinteistöjä ja teollisuutta siirtymään omaan lämmöntuotantoon, jos kaukolämpö ei ole hinnaltaan kilpailukykyistä tai, jos asiakkaiden näkemyksiä ja tarpeita ei oteta riittävästi huomioon lämmön tuotannossa (Kontu, 2020).

Suomessa kaukolämpöverkkojen lämpötila on korkea (Sweco, 2019). Lämpöpumppuja voitaisiin hyödyntää tehokkaammin ja monipuolisemmin, jos kaukolämmön lämpötilaa laskettaisiin. Sähköntuotannon toimintavarmuuden merkitys huoltovarmuuden kannalta kasvaa häiriötilanteissa ja kulutushuippujen aikana, kun polttoon perustuva lämmöntuotanto vähentyy ja sähkön käyttöön perustuvat tuotantomuodot lisääntyvät.

Kuten aiemmin kerrottiin, kivihiilen käyttö kielletään Suomessa 1.5.2029 alkaen sähkön ja lämmön tuotannon polttoaineena. Useat yhtiöt lopettavat tai vähentävät merkittävästi

kivihiilen käyttöä omaehtoisesti jo aiemmin ja kivihiilen käyttö onkin ollut Suomessa laskussa viime vuosina.

Suurimmillaan kivihiilen käyttö energiantuotannossa oli 2000-luvun alussa, jolloin kivihiileen perustuvaa tuotantoa oli yli 50 TWh. Vuonna 2016 kivihiiltä käytettiin energiantuotannossa 22 TWh. Kivihiiltä on käytetty Suomessa CHP-laitoksissa, erillislämmöntuotannossa ja erillisessä lauhdesähkön tuotannossa. Nykyisin kivihiilen käyttö keskittyy pääsääntöisesti suurten kaupunkien kaukolämpö- ja CHP-tuotantoon. Vuonna 2016 merkittävin osuus kivihiilen käytöstä sähkön ja lämmön tuotannossa tapahtui Espoossa, Helsingissä, Turun seudulla, Vantaalla, Lahdessa, Pietarsaassa, Vaasassa ja Kirkniemen paperitehtaalla. (Pöyry Management Consulting Oy, 2018)

Kuten aiemmin mainittiin, turpeen energiakäyttö pyritään vähintään puolittamaan vuoteen 2030 mennessä Marinin hallituksen hallitusohjelman mukaisesti. Turpeen vuosittainen energiankäyttö vähentyi Suomessa 30 terawattitunnista alle 20 terawattituntiin (TWh) 2010-luvulla. Vastaavasti turpeen osuus laski vajaan 5 %:iin kokonaisenergiankulutuksesta. Turpeen käyttö kaukolämmön tuotannossa on tavallisinta Etelä-, Keski- ja Pohjois-Pohjanmaalla ja Lapissa. Joinakin vuosina turpeen osuus lämmöntuotannosta on ollut yli 50 % myös Pohjois-Savossa, Keski-Suomessa ja Päijät-Hämeessä. Turpeen käyttö sijoittuu energiantuotannossa yleisesti niille alueille, joilla on merkittävää turvetuotantoa ja alueille, joille on lyhyt kuljetusmatka tärkeiltä turvetuotantoalueilta. (Sitra, 2020)

Kontu (2020) on tutkinut kaukolämpötoimialan asiakaslähtöisiä kehityssuuntia. Kaukolämmön hinnoittelulla on suuri merkitys sen kannalta, onko asiakkailta tahtoa siirtyä osittain tai kokonaan lämpöpumppuja hyödyntävään kiinteistökohtaiseen lämmöntuotantoon. Tutkimukseen sisältyvien laskelmien perusteella investointi kiinteistökohtaisiin lämpöpumppuihin on kannattavaa. Asiakkaiden näkökulmasta kaukolämmön hinta on keskeisessä asemassa, mutta myös hinnoitteluperusteiden läpinäkyvyys, ennustettavuus ja joustavuus erilaisille lämmöntarpeille ovat tärkeitä. Oma hinnoittelujärjestelmä hybridiasiakkaille on tarpeen. Kiinteistö, joka tuottaa peruslämmön lämpöpumpulla, voi maksaa korkeaa hintaa lämpöpöhuipun aikana, koska sen ei tarvitse investoida suurempaan sähköliittymään tai lämmityskattiloihin. Hybridijärjestelmässä peruslämpö tuotettaisiin kiinteistökohtaisesti, mutta

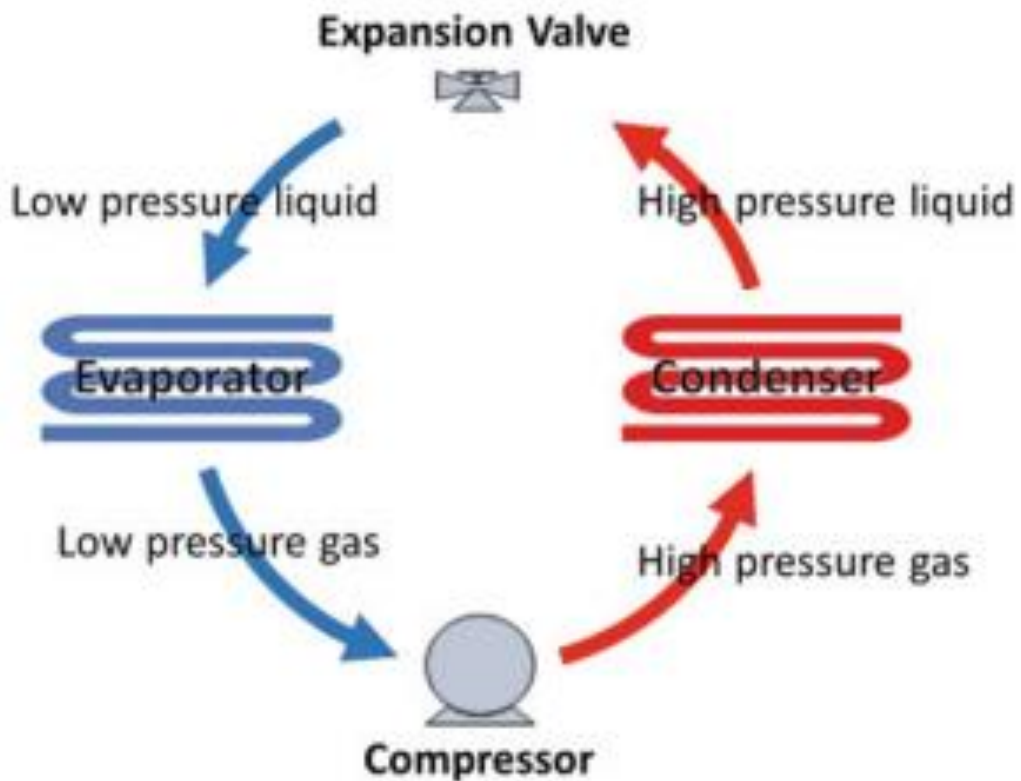
huippulämpö hankittaisiin kaukolämmöstä. Kaukolämpölaitosten ja kiinteistöjen yhteistyön lisäämisellä, laskutusperusteiden muutoksilla ja älykkäällä lämmönohjauksella voitaisiin lämmityksen kuluja pienentää. (Kontu, 2020)

Tielinen (2020) on tarkastellut kaukolämmöstä maalämpöön vaihtamisen taloudellista kannattavuutta asuintalossa Lappeenrannassa. Kannattavuutta tarkasteltiin 13 todellisen esimerkkikohteen avulla ja tutkimuksessa käytetty asuinrakennusten määrä oli noin puolet vuosina 2015 – 2019 puretuista kaukolämpöliittymistä. Kaukolämmön ja kiinteistökohtaisten lämpöpumppujen keskinäiseen kannattavuuteen vaikuttaa usea muuttuva tekijä. Tielisen tutkimuksen johtopäätös on, että Lappeenrannassa kaukolämmön vaihtaminen kiinteistökohtaiseen lämpöpumppuun ei useimmissa tapauksissa ole taloudellisesti kannattavaa.

3 Lämpöpumput

3.1 Lämpöpumppujen toimintaperiaate

Lämpöpumput voidaan jakaa käytettävän tekniikan perusteella kahteen luokkaan, absorptiolämpöpumppuihin ja kompressiolämpöpumppuihin. Tässä diplomityössä keskitytään vain kompressiolämpöpumppuihin ja lämpöpumppuihin viitattaessa tarkoitetaan kompressiolämpöpumppuja. Lämpöpumppuilla siirretään lämpöenergiaa matalalämpöisestä lähteestä korkealämpöisempään kohteeseen. Lämpöpumppujen pääkomponentit ovat kompressori, paisuntaventtiili, höyrystin ja lauhdutin. Lämpöenergia siirtyy kylmäaineessa. Komponentit sijoittuvat suljettuun putkistoon, jossa kylmäaine kiertää niiden läpi kuvan 6 mukaisesti. (Grassi, 2018)



Kuva 6. Lämpöpumppuprosessi (Lun, et al. 2019)

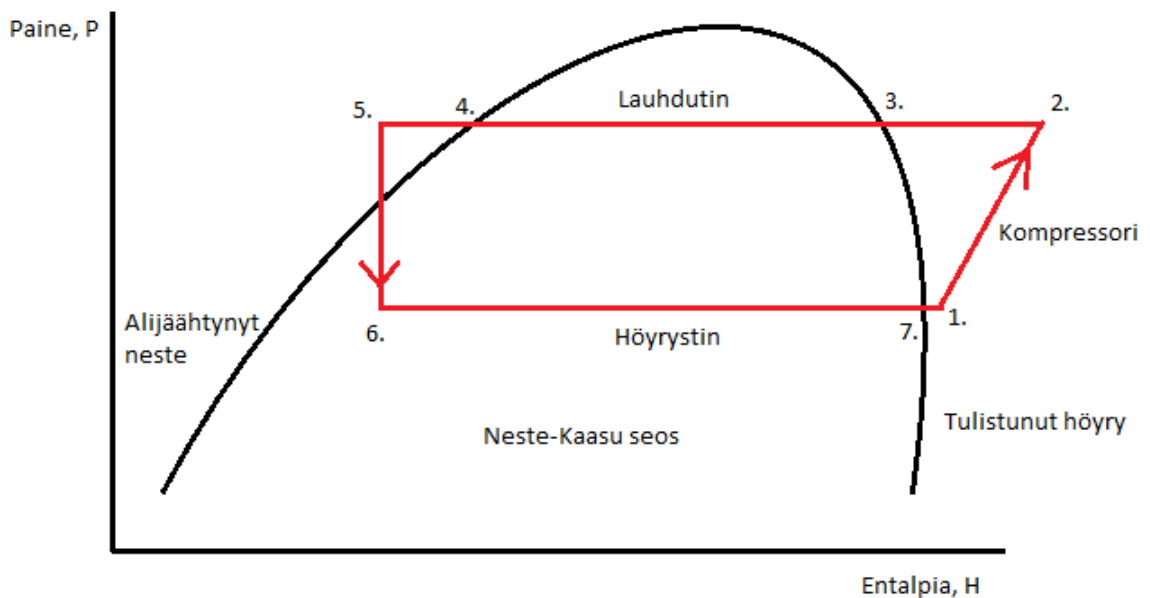
Lämpöenergia kerätään lämpöpumpulle tyypillisesti ilmasta, maaperästä tai vedestä. Lämpöpumppuprosessiin kuuluu neljä vaihetta. Ensimmäisessä vaiheessa kylmäainekaasu kulkee kompressorin läpi, jossa se tulistuu. Toisessa vaiheessa tulistunut kaasu kulkee lauhttimelle, jossa kylmäaine lauhtuu takaisin nesteeksi luovuttaen energiaa. Kolmannessa vaiheessa lauhtunut kylmäaine kulkee paisuntaventtiilin läpi, jossa kaasu/nesteseoksen paine ja lämpötila laskevat. Viimeisessä vaiheessa kylmäaine kulkee höyrystimelle, jossa se kerää lämpöenergiaa lämpölähteestä ja höyrystyy. Lämpöpumppuprosessin yksinkertainen muoto on esitetty kuvassa 6. (Lun, et al., 2019)

Lämpöpumpuissa voidaan käyttää monia eri kylmäaineita, mutta tietyin rajoituksin. Kylmäaineen valinnassa keskitytään pääosin kylmäaineen ominaisuuksiin, ympäristövaikutuksiin ja turvallisuustekijöihin (Lun, et al., 2019). Kylmäaineiden ominaisuuksia kuvataan lisää myöhemmin tässä diplomityössä.

Lämpöpumppujen hyötysuhdetta kuvataan COP-luvulla (Coefficient Of Performance). COP-luku kertoo tuotetun lämmön osuuden suhteessa sähkötehoon. COP-lukua laskiessa huomioidaan lämmitettävän kohteen alku- ja loppulämpöenergiat ja sähköä kuluttavien laitteiden sähköenergiat. Kompressorikulutus on suurimman osan käytetystä sähköenergiasta, mutta suuremmissa järjestelmissä myös erilaiset oheislaitteet ja mahdolliset sulatusjärjestelmät tulee huomioida. COP-arvo voidaan laskea kylmäainetuotannolle lämmöntuotantoa vastaavasti. (Grassi, 2018)

Lämpöpumppujen toiminta perustuu termodynamiikan pääsääntöihin. Termodynamiikan ensimmäinen sääntö kuvastaa energian säilymistä, eli systeemin sisäinen energiamäärä ei voi muuttua, jos systeemiin ei tuoda tai sieltä poisteta energiaa. Tämä tarkoittaa sitä, että adiabaattisessa prosessissa alku- ja loppulämpötilan ero määrittävät tehdyn työn. Yksinkertaistettuna se kuvastaa sitä, että aine voi muuttua prosessissa olomuotoaan, mutta energiaa ei voida synnyttää tyhjästä. Ensimmäisen pääsäännön vuoksi energiatasapainossa systeemiin sisään tulevan energiamäärän ja sieltä poistuvan energiamäärän muutos määrittää systeemin sisäisen energiamäärän muutoksen. Toinen pääsääntö kuvastaa entropian kasvua, eli muutoksen suuntaa. Yksinkertaisimmillaan se tarkoittaa sitä, että lämpö pyrkii siirtymään korkeammasta lämpötilasta kylmempään. (Lun, et al., 2019)

Lämpöpumpun toimintaa voidaan kuvastaa paine-entalpia (PH) kuvaajan avulla. Kuvassa 7 on kuvattu lämpöpumpppuolosuhteiden eri vaiheet paine-entalpia -kaavion avulla. Kuvan pisteiden 1-2 välillä hieman tulistunut kylmäaine kaasu kulkee kompressorin läpi, jossa kylmäainetta painetta nostetaan ja se tulistuu lisää. Kompressorin jälkeen kaasu kulkee lauhduttimelle, jossa se luovuttaa lämpöä vakio paineessa lämmitettävään kohteeseen (väli 2-5). Lauhduttimessa kylmäainetta tulistusta poistuu (väli 2-3). Tämän jälkeen kaasu jatkaa lauhduttimissa lauhduttimessa ja kaasu alkaa muuttamaan muotoaan kaasusta nesteeksi (väli 3-4). Lopuksi kaasu on muuttunut kokonaan nesteeksi ja se alijäähtyy (väli 4-5). Lauhduttimen jälkeen neste kulkee paisuntaventtiilin läpi, jossa sen paine lasketaan höyrystimen paineeseen. Paineen laskun yhteydessä kylmäaine alkaa höyrystymään. Höyrystimessä kylmäainetta siirtyä lämpöä vakio paineessa, jonka yhteydessä se höyrystyy kaasuksi (väli 6-7). Höyrystimen loppupäässä kylmäaine alkaa tulistumaan ennen kompressorin (väli 7-1). (Lun, et al., 2019)



Kuva 7. Paine-entalpia kaavio lämpöpumpppuolosuhteiden eri vaiheille

3.2 Lämpöpumpuissa käytettävät kylmäaineet

Lämpöpumpuissa kylmäaineen tarkoitus on siirtää lämpöä höyrystimen ja lauhduttimen välillä. Kylmäaineet ovat nesteytettyjä kaasuja, jotka muuttavat olomuotoaan kaasumaisiksi lämpötilan noustessa. Faasimuutoksen yhteydessä sitoutuu paljon energiaa, jonka vuoksi kylmäaineella saadaan siirrettyä suuria määriä lämpöä. Kylmäaine höyrystyy lämpöpumpun höyrystimessä, jolloin se sitoo suuren määrän energiaa itseensä. Lauhduttimella kylmäaine puolestaan lauhtuu takaisin nestemäiseksi, jolloin kylmäaine vapauttaa höyrystymisessä sitoman lämpöenergian.

3.2.1 Kylmäaineiden luokittelu haitallisuuden perusteella

Kylmäaineiden haitallisuutta ympäristölle kuvataan yleensä ODP-, GWP- ja TEWI- luvuilla. Lukujen suuruus kertoo kylmäaineiden haitallisuudesta:

ODP-luku: Ozone Depletion Potential kertoo kylmäaineen suhteellisen otsonihaitallisuuden. ODP-luvun skaala on nollasta yhteen ja referenssinä käytetään kylmäainetta R11, jonka arvoksi on määritetty 1. (Kapanen, 2017)

GWP-luku: Global Warming Potential kertoo kylmäaineen kasvihuonehaitallisuudesta. Referenssilukuna käytetään hiilidioksidin haitallisuuslukua, jonka arvoksi on määritetty 1. Asteikko kasvihuonehaitallisuudelle on nollasta ylöspäin. (Kapanen, 2017)

TEWI-luku: Total Equivalent Warming Impact ilmaisee kylmälaitoksen koko elinkaaren aikana tuottaman kasvihuonehaitallisuuden kilogrammoina hiilidioksidia. TEWI-luvussa huomioidaan suorat kylmäainepäästöt ja laitoksen energiankulutuksesta johtuvat hiilidioksidipäästöt. TEWI-luvun asteikko on nollasta ylöspäin. (Kapanen, 2017)

3.2.2 Kylmäaineiden luokittelu turvallisuuden perusteella

Kylmäaineiden turvallisuusluokitus tehdään niiden terveys- ja turvallisuusvaikutusten mukaan. Kylmäaineiden vaaralliset ominaisuudet ovat lähinnä niiden myrkyllisyys ja syttyvyys. Myrkyllisyysluokituksessa on kaksi ryhmää, joista A-ryhmään kuuluu kylmäaineet,

joiden työperäisen altistuksen raja-arvo on yli 400 ppm. B-ryhmään kuuluu puolestaan kylmäaineet, joiden raja-arvo on alle 400 ppm. Syttyvyysluokan mukaan kylmäaineet voidaan jakaa neljään eri ryhmään. Kylmäaineiden syttyvyysluokan määrittää niiden syttymisraja, palonopeus ja palamislämpötila. Luokka 1 ei ole syttyvä. Luokka 2L tarkoittaa alhaisempaa syttyvyyttä ja luokka 2 syttyvää kylmäainetta. Luokka 3 on suurin luokka ja se kuvastaa kylmäaineen korkeaa syttymisherkkyyttä. (Kapanen, 2017)

3.2.3 Kylmäaineiden luokittelu kemiallisen rakenteen perusteella

Kylmäaineiden jakaminen jaottelu voidaan tehdä niiden sisältämien halogeenimolekyylien mukaan. Kylmäaineet koostuvat yleisesti hiilivedyistä, joiden vetyatomeja on korvattu halogeenimolekyyliellä. Lisäksi on kaksi kylmäaineryhmää, jotka kuuluvat luonnonmukaisiin kylmäaineisiin ja ne eivät sisällä lainkaan halogeenimolekyyliä. Kylmäaineryhmät ovat:

CFC-kylmäaineet: Chloro-Fluoro-Carbon kylmäaineet, jotka koostuvat täysin halogenoiduista hiilivedyistä ja jotka sisältävät klooria, fluori ja hiiltä. CFC-kylmäaineiden haitta-
puolena on niiden suuret ODP- ja GWP-arvot. (Kapanen, 2017)

HCFC-kylmäaineet: Hydro-Chloro-Fluoro-Carbon ryhmä pitää sisällään kylmäaineet, jotka koostuvat osittain halogenoiduista hiilivedyistä. CFC-kylmäaineiden tavoin HCFC-kylmäaineet sisältävät klooria, fluoria ja hiiltä, mutta lisäksi myös vetyä. HCFC-kylmäaineet omaavat pienen ODP-arvon, mutta suuren GWP-arvon. (Kapanen, 2017)

HFC-kylmäaineet: Hydro-Fluoro-Carbon kylmäaineet sisältävät osittain halogenoituja hiilivetyjä. HFC-kylmäaineet koostuvat fluorista, hiilestä ja vedystä. HFC-kylmäaineilla on suuri GWP-arvo, mutta ne ovat otsonihaitattomia. (Kapanen, 2017)

PFC-kylmäaineet: Per-Fluoro-Carbon kylmäaineet sisältävät täysin halogenoituja hiilivetyjä ja koostuvat pelkästään fluorista ja hiilestä. PFC-kylmäaineilla on suuri GWP-arvo, mutta ne ovat otsonihaitattomia. (Kapanen, 2017)

HFO-kylmäaineet: Hydro-Fluoro-Olefin kylmäaineet sisältävät osittain halogenoituja hiilivetyjä. HFO-kylmäaineet sisältävät fluoria, hiiltä ja vetyä. HFO-kylmäaineilla on matala GWP-arvo ja ne ovat otsonihaitattomia. (Kapanen, 2017)

HC-kylmäaineet: Hydro-Carbon kylmäaineet koostuvat puhtaista hiilivedyistä. HC-kylmäaineet kuuluvat luonnonmukaisiin kylmäaineisiin, koska ne eivät sisällä lainkaan halogeenimolekyylejä. HC-kylmäaineet ovat otsonihaitattomia ja niiden kasvihuonehaitallisuus on hyvin alhainen. (Kapanen, 2017)

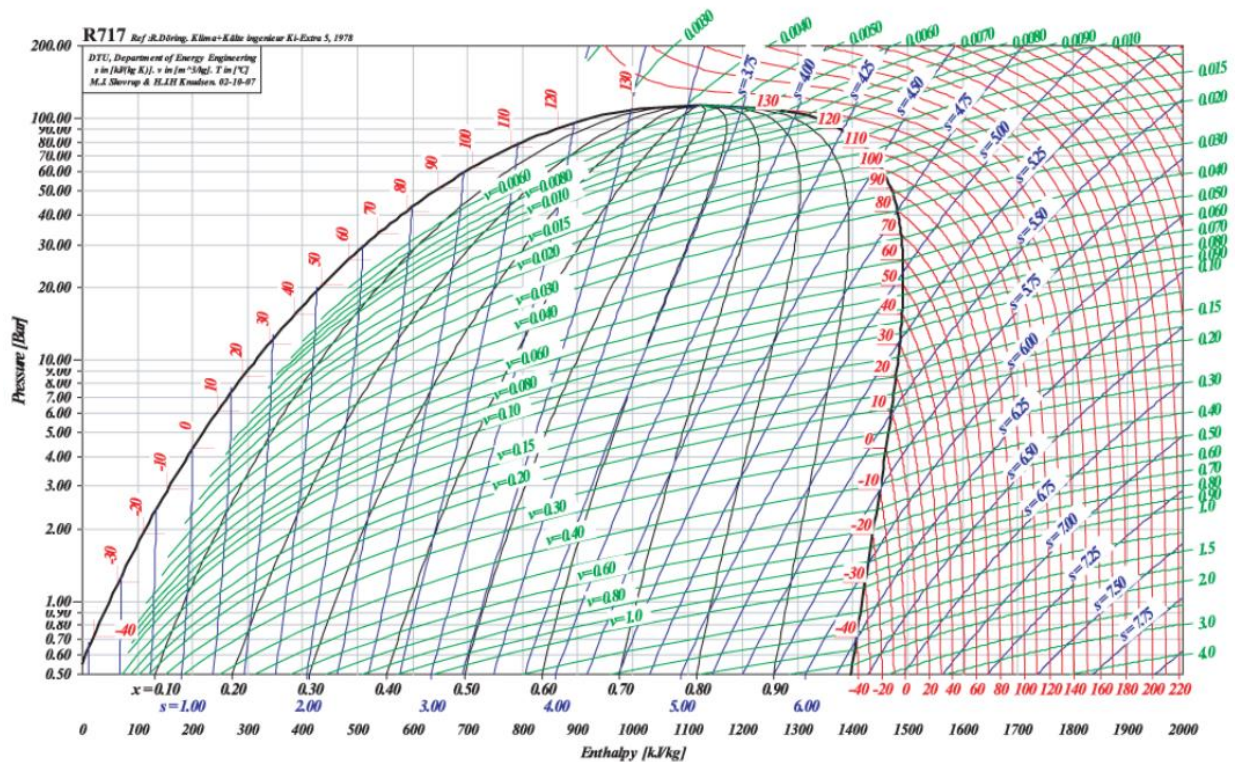
Epäorgaaniset kylmäaineet: Ovat puhtaita epäorgaanisia yhdisteitä. Epäorgaaniset kylmäaineet kuluvat luonnonmukaisiin kylmäaineisiin. Ne ovat otsonihaitattomia ja kasvihuonehaitattomia, tai niiden kasvihuonehaitallisuus on hyvin matala. (Kapanen, 2017)

CFC- ja HFC-kylmäaineiden käyttö on kielletty EY-asetuksessa 1005/2009, eli niin sanotussa otsoniasetuksessa (EY-asetus, 1005/2009). HFC- ja PFC-kylmäaineiden käyttöä on rajoitettu EU-asetuksessa 517/2014, eli F-kaasusetuksessa. Rajoituksessa on kielletty vuodesta 2020 lähtien fluorivetyä sisältävät jäähdytyslaitteet, joiden GWP-arvo on suurempi kuin 2500. (EU-asetus, 517/2014) HFO-kylmäaineille, HC-kylmäaineille ja epäorgaanisille kylmäaineille ei ole asetettu rajoituksia, mutta on kuitenkin huomioitava, että HC-kylmäaineet ovat ensimmäisen luokan palavia aineita ja että epäorgaanisista kylmäaineista ammoniakki on ensimmäisen luokan palava neste ja myrkkyy. Luonnonmukaisten kylmäaineiden käyttö säädetään painelaitelainsäädännössä. (Kapanen, 2017)

3.2.4 Esimerkkejä kylmäaineista ja niiden ominaisuuksista

R717 (Ammoniakki)

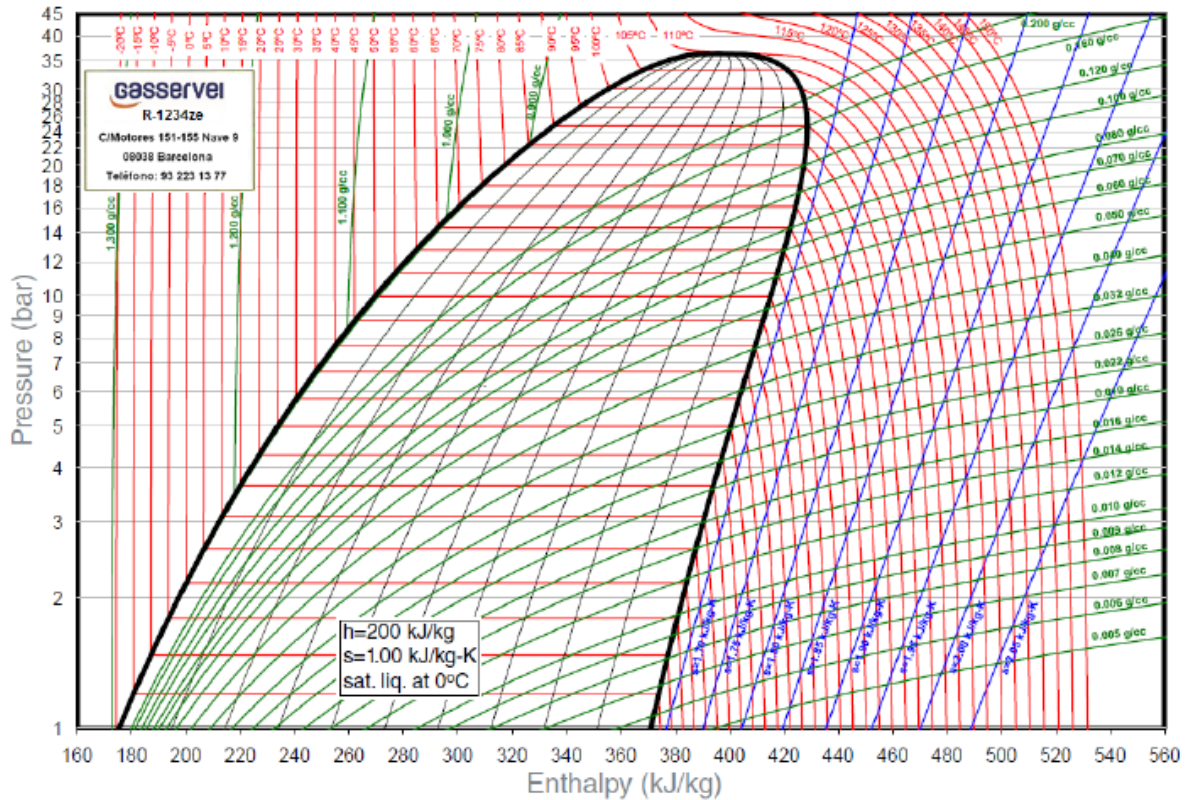
Ammoniakki (R717) on luonnonmukainen kylmäaine, joten F-kaasuasetus ei vaikuta sen käyttöön. Ammoniakin GWP- ja ODP-arvot ovat nolla, joten sitä ei luokitella ympäristölle vaaralliseksi. Ammoniakki kuuluu turvallisuusluokkaan B2L, eli se on myrkyllinen ja heikosti syttyvä. (SFS-EN 378-1, 2016) Ammoniakissa on pistävä haju, joka on havaittavissa jo ennen vaarallisia pitoisuuksia. Ammoniakki soveltuu parhaiten matalalämpöisistä korkealämpöisiin sovelluksiin, jonka vuoksi se sopii hyvin kaukolämmön tuotantoon. (AGA, 2021)



Kuva 8. R717:n (Ammoniakki) entalpia-paine -kuvaaja (Swep, 2020)

R1234ze

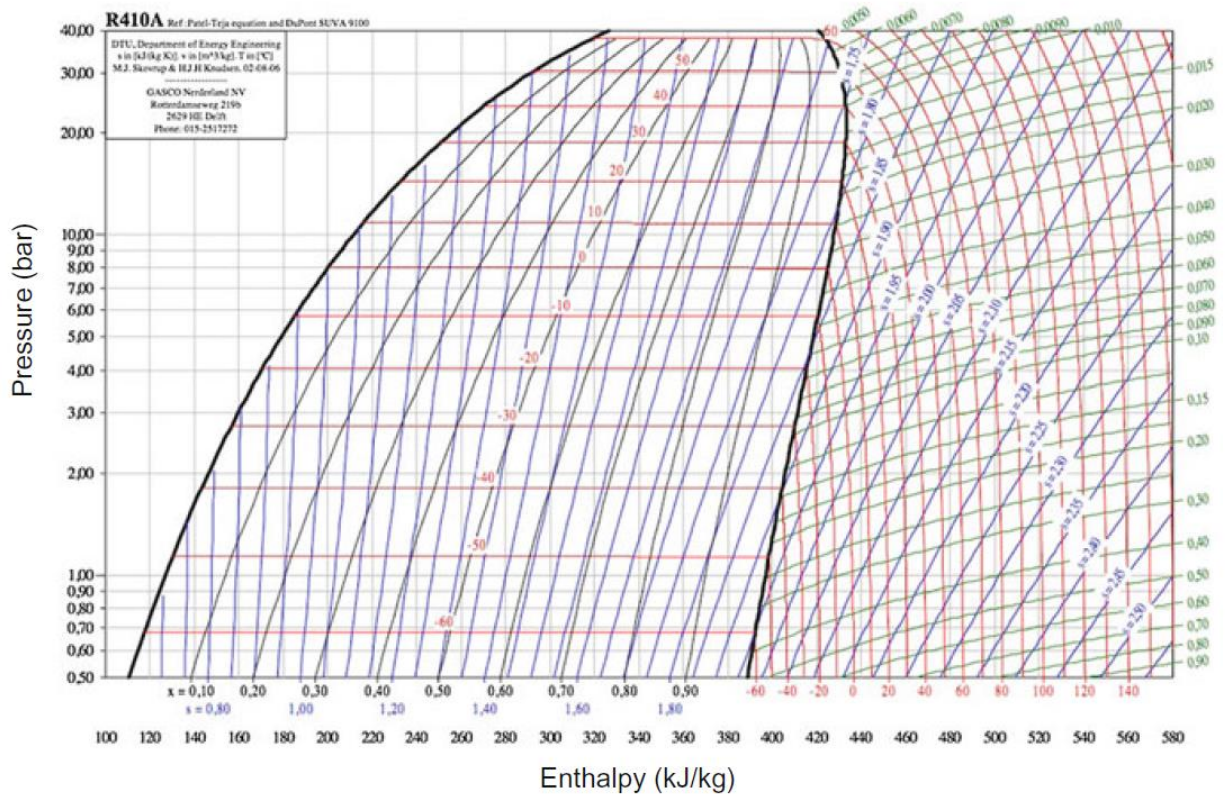
R1234ze kuuluu HFO-kylmäaineisiin ja täten sen käyttöä ei ole rajoitettu F-kaasuasetuksessa. Sen ODP-arvo on nolla ja GWP- arvo on 6. Täten sillä on vuotaessaan hyvin pieni vaikutus ympäristöön. R1234ze sopii parhaiten keski-korkealämpöisiin sovelluksiin. Se kuuluu turvaluokkaan A2L, eli se on heikosti syttyvä, mutta ei myrkyllinen. (AGA, 2021)



Kuva 9. R1234ze:n entalpia-paine -kuvaaja (Gasservei, 2020)

R410A

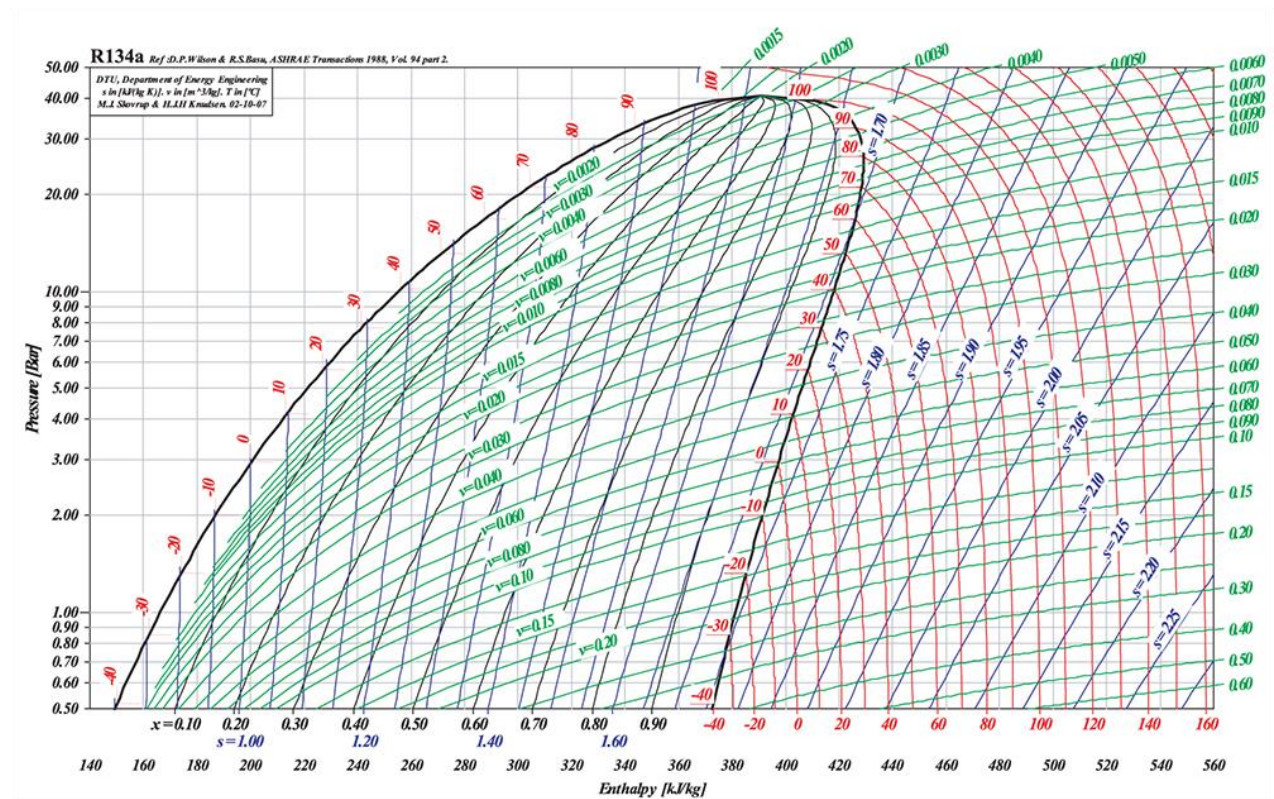
R410A kuuluu HFC-kylmäaineisiin, jonka vuoksi F-kaasuasetuksessa mainitut rajoitukset vaikuttavat sen käyttöön ja saatavuuteen. Sen ODP-arvo on nolla ja GWP-arvo on 2088. Täten se on vuotaessaan ilmastonmuutosta kiihdyttävä kylmäaine. R410 sopii parhaiten matala-keskilämpöisiin sovelluksiin. Se kuuluu turvaluokkaan A1, eli se ei ole myrkyllinen eikä helposti syttyvä. (AGA, 2021)



Kuva 10. R410A:n (Ammoniakki) entalpia-paine -kuvaaja (Grassi, 2018)

R134a

R134a kuuluu HFC-kylmäaineisiin, jonka vuoksi F-kaasuasetuksessa mainitut rajoitukset vaikuttavat sen käyttöön ja saatavuuteen. Sen ODP-arvo on nolla ja GWP-arvo on 1430. Täten se on ympäristöön vuotaessaan ilmastonmuutosta kiihdyttävä kylmäaine. R134a sopii matalalämpöisistä korkealämpöisiin sovelluksiin ja täten sitä pystytään hyödyntämään laajasti. Se kuuluu turvaluokkaan A1, eli se ei ole myrkyllinen eikä helposti syttyvä. (AGA, 2021)



Kuva 11. R134a:n entalpia-paine -kuvaaja (Swep, 2020)

3.3 Lämpöpumppusovellukset

3.3.1 Ilma-ilmalämpöpumput

Ilma-ilmalämpöpumppuja käytetään erityisesti kiinteistökohtaiseen lämmittämiseen ja jäähdyttämiseen. Niiden investointikustannukset ovat pienet ja kiinteistökohtaisessa käytössä ne ovat helppokäyttöisiä. Ilma-ilmalämpöpumppujen hyötysuhde (COP) on tyypillisesti 3,0-4,0, mutta hyötysuhde heikkenee lämpötilan laskiessa alle -10°C - -20°C . Pumput lisäävät tilojen käyttömukavuutta, koska niitä voidaan käyttää lämmityksen lisäksi myös jäähdytykseen. Toisaalta sisäyksikön ääni ja ilmavirta voivat olla häiritseviä, mikä voi heikentää niiden käyttömukavuutta.

3.3.2 Ilma-vesilämpöpumput

Ilma-vesilämpöpumppuja käytetään tällä hetkellä pääsääntöisesti kiinteistöjen sisäilman ja käyttöveden lämmittämiseen. Ilma-vesilämpöpumpuilla voidaan tuottaa lämmityksen lisäksi myös viilennystä, jos järjestelmään on asennettu erillinen jäähdytyspuhallin. Ilma-vesilämpöpumpuilla pystytään tuottamaan jopa 90 asteista vettä, jonka vuoksi se on varteenotettava vaihtoehto korvaamaan kiinteistöjen vanhoja lämmitystapoja, kuten kattiloita ja suoraa sähkölämmitystä (Sweco, 2019). Ilma-vesilämpöpumppujen suurimpina etuina ovat niiden tehokkuus, helppo huollettavuus, matalat käyttökustannukset ja matalat CO_2 päästöt hyvän hyötysuhteen takia. Kuten ilma-ilmalämpöpumpuilla, niin myös ilma-vesilämpöpumppujen hyötysuhde laskee lämpötilan laskiessa alle -10°C - -20°C .

Ilma-vesilämpöpumppuja on otettu useissa maissa käyttöön osana kaukolämmöntuotantoa, mutta Suomessa niiden hyödyntäminen kaukolämmöntuotannossa on pilotointivaiheessa. Ensimmäinen kaukolämpöverkkoon kytketty ilma-vesilämpöpumppu Suomessa oli Suur-Savon Sähkön rakentama Puumalan kaukolämpöverkon 700 kW:n ilma-vesilämpöpumppu. Kyseinen lämpöpumppujärjestelmä valmistui vuonna 2019. (Calefa, 2019)

3.3.3 Vesi-vesilämpöpumput

Vesi-vesilämpöpumppuja käytetään jo nykyisin osana kaukolämpöverkkoja. Vesi-vesilämpöpumput vaativat lämmönlähteen, joka voi olla esimerkiksi kiinteistöjen jätevettä, teollisuuden jätevettä tai teollisuuden jäähdytysprosessien lämpöä. Vesi-vesilämpöpumput soveltuvat myös samanaikaisen jäähdytyksen ja lämmityksen tuotantoon, koska energiaa voidaan

kerätä höyrystimellä kylmäpuolelta ja vapauttaa höyrystimellä lämpimälle puolelle. Ensimmäiset merkittävät Suomessa toteutetut vesi-vesilämpöpumput olivat Helen Oy:n vuonna 2006 käyttöön ottama Katri Valan lämpöpumppulaitos, Turun Energian vuonna 2009 käyttöön ottama Kakolan lämpöpumppulaitos ja Fortumin vuonna 2015 käyttöön ottama Suomenojan lämpöpumppulaitos. Laitosten pääasiallisena lämmönlähteenä toimivat jätevesien hukkalämpö. Ensimmäisten onnistuneiden lämpöpumppulaitosten rakentamisen jälkeen uusia investointeja lämpöpumppuihin on toteutettu ja niitä suunnitellaan ja toteutetaan jatkuvasti. Esimerkkinä tällaisista uusista lämpöpumppuinvestoinneista ovat Fortumin Espoon Suomenojan lämpöpumppulaajennus. Uusi lämpöpumppu lisää järjestelmän kapasiteettia yli 20 megawattia hyödyntäen Blominmäen jätevedenpuhdistamon hukkalämpöä ja merivettä.

3.3.4 Maalämpöpumput ja geoterminen lämpö

Maalämpöpumput hyödyntävät maan pintakerrosten lämpöenergiaa, joka on peräisin aurinkoenergiasta. Maalämpö poikkeaa siten geotermisestä energiasta, joka on maan sisuksissa tapahtuvan radioaktiivisen hajoamisen tuottamaa lämpöä. Maalämpöpumppuja hyödynnetään lähinnä kiinteistökohtaisessa lämmöntuotannossa. Suomessa on käynnissä useita hankkeita, joissa pilotoidaan geotermisen lämmön hyödyntämistä kaukolämmön tuotannossa.

St1 rakentaa parhaillaan Espoon Otaniemeen geotermisellä energialla toimivaa lämpölaitosta. Projektissa porataan maahan kaksi 6,4 kilometrin syvyistä reikää. Toisesta reiästä pumpataan vettä alaspäin kallioperään, jossa se kuumenee. Kuumentunut vesi pumpataan toisesta reiästä ylös, josta lämpö siirretään suoraan lämmönvaihtimen kautta Fortumin kaukolämpöverkkoon. Valmistuessaan laitos pystyy tuottamaan jopa 40 MW päästötöntä energiaa kaukolämpöverkkoon. (ST1, 2021) Maaperästä saatava lämpö on niin lämmintä, että sitä pystytään hyödyntämään kaukolämpöverkossa ilman lämpöpumppuja. Laitoksesta saatavalla lämmöllä pystytään kattamaan jopa 10 % Espoon alueen kaukolämmön tarpeesta. (Fortum, 2021c)

4 Ilma-vesi lämpöpumput kaukolämpötuotannossa

Suomen kylmien talvien vuoksi ilma-vesilämpöpumppuja ei voida käyttää kaukolämpöverkon ainoana lämmönlähteenä, mutta osana useiden lämmöntuotantomenetelmien yhdistelmää ilma-vesilämpöpumput voivat olla toimiva osaratkaisu tavoiteltaessa hiilineutraalia kaukolämpötuotantoa. Toistaiseksi kaukolämpöverkkoon kytketyistä ilma-vesilämpöpumpuista on Suomessa vain vähän kokemuksia. Teknologian kehittyminen mahdollistaa laajemmin erilaisten lämmöntuotantotapojen yhdistämisen. Suomen olosuhteissa laitoksen kokonaishyötysuhteeseen vaikuttaa merkittävästi lämmönkeräimien sulattaminen. Höyryruis-
kutusteknologiaan liittyvä kehitystyöstä on saatu lupaavia tuloksia.

4.1 Suurten ilma-vesilämpöpumppujen hyödyntämiseen liittyvät mahdollisuudet

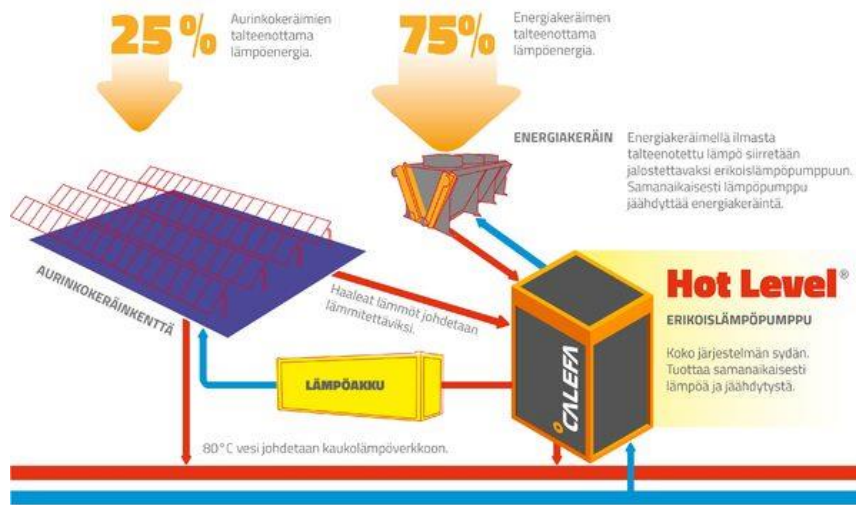
Lämpöpumpputekniikka on kehittynyt nopeasti ja ilmalämpöpumput toimivat varsin tehokkaasti, vaikka ulkolämpötila laskee lähelle $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ilma-vesilämpöpumput voidaan rakentaa toimimaan myös viileämissä lämpötiloissa, mutta vähäisten tuntimäärien vuoksi se ei usein ole kannattavaa. Ulkolämpötila on ollut Espoossa vuosien 2013-2020 aikana alle $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ keskimäärin vain 100 tuntia vuodessa, joka vastaa noin 1,3 % koko ajanjakson tunneista. Kaukolämmön tarpeen osuus koko ajanjakson kaukolämmön tuotannosta on noin 3,2 %. Kuten edellä luvussa 2.5.1 on todettu, lämpöpumppujen, lämpövarastojen ja CHP tuotannon yhdistelmä voi olla kustannustehokas, jos ylimäärin tuotetulla sähköllä tuotetaan lämpöä, joka varastoidaan kaukolämpöverkoston yhteydessä. Älykkäät energiajärjestelmät mahdollistavat muun entistä monipuolisemmin erilaisten lämmönlähteiden käytön ja niiden optimoinnin kaukolämpöjärjestelmässä. Suuret ilma-vesilämpöpumput ovat investointikustannuksiltaan suhteellisen edullisia. Suurimpana etuna on kuitenkin se, että ilma-vesilämpöpumput eivät tarvitse erillistä lämmönlähdettä. Täten kokonaiskustannukset ovat usein muita lämpöpumppuja edullisempia ja perusratkaisut ovat helposti skaalattavissa ja monistettavissa erilaisiin kohteisiin. Suomen kylmän ilmaston lisäksi lämpöpumppujen käytölle lisähaasteen aiheuttaa kaukolämpöverkoissa käytetty korkea lämpötila. (Averfalk H. et, al. 2017, Mathiesen B. ja Lund H. 2009)

4.2 Kaukolämpöverkkoihin liitetyt ilma-vesilämpöpumput Suomessa

Suomessa ei ole toistaiseksi kytketty merkittävää määrää ilma-vesilämpöpumppuja kaukolämpöverkkoihin. Kuten alaluvussa 3.3.2 kerrottiin, Suur-Savon Sähkö on rakentanut Puumalan kaukolämpöverkkoon 700 kW:n ilma-vesilämpöpumpun. Lämpöpumppujärjestelmä valmistui 2019 ja se on ensimmäinen Suomessa toimiva suuremman kokoluokan kaukolämpöverkkoon kytketty ilma-vesilämpöpumppu. Lämpöpumppujärjestelmän rinnalle on asennettu 400 m² kokoinen aurinkokenntä, jonka tarkoituksena on tuottaa 25 % järjestelmän energiasta. Täten järjestelmän yhteenlaskettu lämpöenergia on jopa 1000 kW. Aurinkolämpö voidaan ohjata suoraan kaukolämpöverkkoon tai se voidaan lämmittää korkeampaan lämpötilaan lämpöpumpun avulla. Lisäksi laitoksen yhteyteen on asennettu kaukolämpöakku. (Calefa, 2019)

Kaukolämpöakulla voidaan lämmön varastoinnin lisäksi toteuttaa lämmönkeräimien sulatus kylmällä säällä. Toteutuksessa sulatus tehdään kerralla koko lämmönkeräinentälle. Laitosta ei ole suunniteltu käytettäväksi talvisin ja täten sitä ei ole ajettu suuremmissa mittakaavassa kovassa pakkasessa. Järjestelmän kytkentä on havainnollistettu kuvassa 12. (Calefa, 2019)

Järjestelmä käyttää kylmäaineena R134A:ta ja se koostuu yhdestä kaksiportaisesta lämpöpumpusta. Lämpöpumppu kykenee tuottamaan 80 asteista kaukolämpövettä, jolloin COP on lämpimällä säällä jopa yli 3. Laskemalla kaukolämpöveden lämpötilaa 75 asteeseen saataisiin hyötysuhdetta parannettua jopa 20 %. (Calefa, 2019)



Kuva 12. Suur-Savon Sähkön ilma-vesilämpöpumppu (Calefa, 2019)

4.3 Suurissa ilma-vesilämpöpumpuissa käytettävät teknologiat

Kuten edellä luvussa 3.1 on kuvattu, lämpöpumppujen pääkomponentit ovat kompressori, paisuntaventtiili, höyrystin ja lauhdutin. Tässä diplomityössä suurilla ilma-vesilämpöpumpuilla viitataan teollisen mittakaavan lämpöpumppuihin, joita pystytään hyödyntämään kaukolämmön tuotannossa. Kylmissä ilmastoissa ilma-vesilämpöpumppujen tärkeä toiminto on sulatus, jonka toteutustapa vaikuttaa merkittävästi laitteiston kokonaishyötysuhteeseen (Song, et al., 2019). Muista lämpöpumpputyypeistä poiketen ilmalämpöpumppuihin tulee liittää myös ilmasta lämpöä siirtävät lämmönkeräimet ja tehokkaat ilmaa vaihtavat puhaltimet. Lämpöpumppulaitos voidaan toteuttaa erillisistä komponenteista tai komponentteja voidaan integroida suuremmiksi moduuleiksi.

Lämpöpumpputeknologian nopea kehittyminen on parantanut ilma-vesilämpöpumppujen toimintaa. 2000-luvun alussa ilma-vesilämpöpumpuilla pystyttiin tuottamaan vain noin 45 °C vettä. Teknologian kehittymisen myötä lämpöpumput pystyvät tuottamaan 60 °C vettä ja kehittyneimmillä tekniikoilla vesi saadaan lämmitettyä jopa 90 °C lämpötilaan käyttäen luonnonmukaisia kylmäaineita. (Lun, et al., 2019) Kaukolämpöverkkojen lämpötila on usein hyvin korkea. Tästä johtuen lämpötilannosto ilma-vesilämpöpumpuilla joudutaan usein

tekemään useammassa portaassa. Joillakin kylmäaineilla höyrystymis- ja lauhtumislämpötilat mahdollistaisivat lämpötilan noston yhdessä portaassa, mutta todellisuudessa kompressorien maksimipainesuhde rajoittaa lämpötilan nostoa. Tästä esimerkkinä toimii ammoniakki, jonka paine -36 celsiusasteen höyrystymislämpötilassa on 0,9 bar ja 116 celsiusasteen lauhtumislämpötilassa 82 bar. Teoriassa kompressorien maksimipainesuhde on 10, mutta todellisuudessa se asettuu välille 4-6, jolloin hyötysuhde pysyy hyvänä. Puristusasteen ollessa 10 maksimi lämpötilannosto yhdellä puristusprosessilla on noin 90 celsiusastetta. Kaukolämpöverkossa tämä tarkoittaa sitä, että haluttua lämpötilaa ei pystytä teoriassakaan saavuttamaan yhdellä puristusprosessilla ulkolämpötilan laskiessa alle nollan asteen. (Sweco, 2019)

Lämmönkeräimet ja höyrystimet ilma-vesilämpöpumpuissa

Höyrystin on tärkeä osa lämpöpumppuja. Höyrystimen tehtävänä on siirtää lämpöenergiaa kylmäaineeseen, jolloin kylmäaine höyrystyy ja sitoo energiaa. Lämmönkeräimen toteutustavan merkitys on suuri ilma-vesilämpöpumpuissa lamellien jäätyksen, tarvittavan asennuspinta-alan ja tehokkuuden vuoksi. Ilma-vesilämpöpumpuissa lämmönkeräys voidaan tehdä pääsääntöisesti kahdella tavalla. Lämmönkeräimet voivat toimia höyrystiminä, jolloin kylmäaine virtaa lamellien läpi ja höyrystyy ulkoilman lämpöenergian ansiosta. Kyseistä toteutustapaa kutsutaan ilmahöyrysteiseksi ja sen etuna on parempi tehokkuus, mutta haittapuolena voidaan pitää järjestelmän kylmäaineen suurta määrää. Lisäksi isoissa järjestelmissä kylmäaineputkistoja joudutaan rakentamaan asennuskohteessa, joka altistaa putkiston kylmäainevuodoille. Toisessa tavassa lämmönkeräimien läpi kulkee väliaine, joka kulkee lämmönkeräimiltä erilliselle lämpöpumppujen höyrystimelle. Väliaineena kylmissä olosuhteissa on käytettävä pakkaskeston omaavaa liuosta, esimerkiksi glykolia. Höyrystin kerää energian väliaineena toimivasta nesteestä ja täten vastaavia lämpöpumppuja kutsutaan liuoshöyrysteisiksi.

Lämmönkeräimien vaatimaan pinta-alaan vaikuttaa niiden asento ja niissä kiertävä aine. Isoissa järjestelmissä lämmönkeräimet ovat pääsääntöisesti vaakasuuntaisesti tai kallellaan V-mallisesti. Kallellaan olevat lämmönkeräimet vaativat vähemmän asennuspinta-alaa, mutta niiden sulatuksessa on havaittu haasteita jään kertymisenä lamellien pohjaan.

Lämmönkeräimien sulattaminen

Teollisen kokoluokan ilma-vesilämpöpumppuja ei ole käytetty laajassa mittakaavassa kylmissä olosuhteissa. Kylmissä olosuhteissa ilman kosteus tiivistyy lamellien pintaan ja jäätyy. Jäätä alkaa muodostumaan lamellien pintaan, kun ulkolämpötila laskee alle viiden asteen. Jäätymisestä johtuen lamelleja on sulatettava tasaisin väliajoin, jotta lämmönsiirron tehokkuus ja ilmavirtaus lamellien läpi ei heikkene. Lamellien sulatus voidaan toteuttaa siirtämällä kylmäainepiirin välityksellä lämpöä höyrystimelle, tai tuomalla lämpö sulatukseen ulkoisesta lähteestä. (Song, et al., 2019)

Sulatus voidaan toteuttaa usealla eri tavalla:

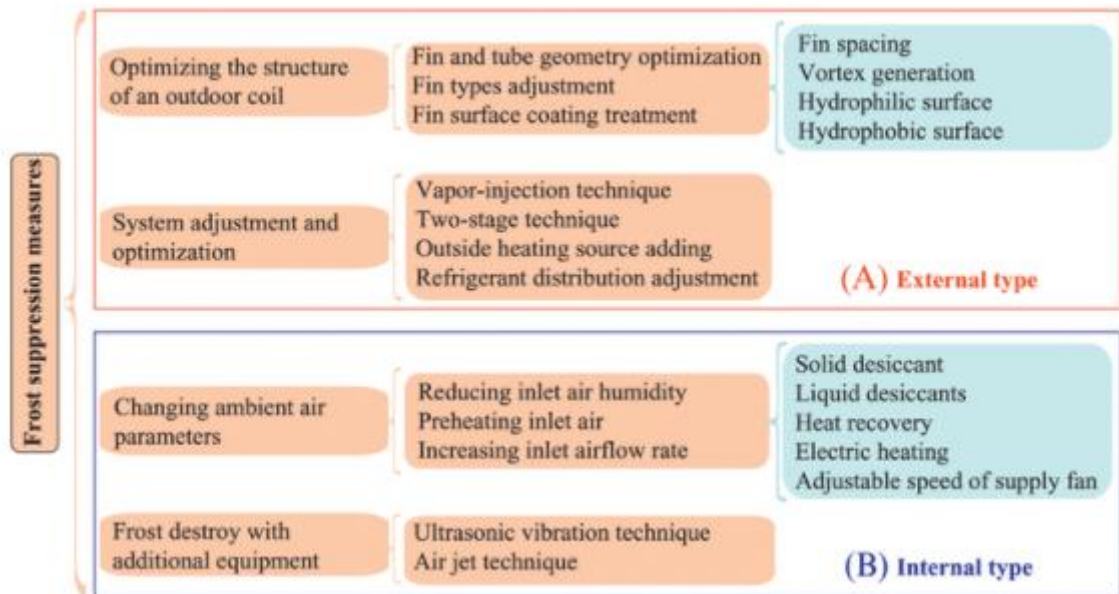
1. Kaukolämpöverkossa olevissa järjestelmissä lämpö sulatukseen tuoda kaukolämmön meno- tai paluupuolelta. Vastaavanlaisessa toteutuksessa lämmönsiirtimien sisällä on toinen nestepiiri, jossa sulatuksessa käytettävä neste kulkee siirtäen lämpöä lamelleihin. Lämpö voidaan vaihtoehtoisesti tuoda myös ulkoisista hukkalämpölähteistä, jos niitä on saatavilla. (Song, et al., 2019)
2. Lamellit voidaan myös sulattaa sammuttamalla lämpöpumppu, jos ulkolämpötila on yli nolla astetta. Etuna luontaisessa sulamisessa on sen edullinen hinta, koska se ei vaadi minkäänlaista laitteistoa ja tarvittava automaatio on yksinkertainen. Lamellien sulaminen on kuitenkin erittäin hidasta pelkän ulkolämpötilan avustuksella ja täten sulatus on järkevämpää tehdä muilla toimenpiteillä. (Song, et al., 2019).
3. Lamellit voidaan sulattaa sähkövastuksien avulla. Sulatus voidaan toteuttaa puhtaasti sähköllä, jolloin vastukset sijoitetaan lamellien sisään. Toisaalta vastuksia voidaan käyttää myös toissijaisena sulatuskeinona. Tällöin vastuksilla voidaan sulattaa lamellista osuus, joka ei sula riittävästi varsinaisen sulatuksen avustuksella. (Song, et al., 2019)
4. Sulatus voidaan toteuttaa ruiskuttamalla lamelleille kuumaa vettä. Sulatus voitaisiin toteuttaa näin, jos halpaa hukkalämpöä sisältävää vettä on saatavilla. Kyseistä sulatustapaa ei kuitenkaan nykyisin käytetä laajasti. Sulatukseen käytetty vesi jää osittain lamellien pintaan, joka heikentää lämmönsiirtoa ja voi jäätymä uudelleen lamellien pintaan. Kyseinen sulatustapa ei ole nykyisin laajassa käytössä sen käyttökustannuksen ja ongelmien vuoksi. (Song, et al., 2019)
5. Kuumakaasuun perustuvaa sulatusta käytetään pääsääntöisesti suuremmissa laitteissa. Kuumakaasusulatuksessa lauhdutin ja paisuntaventtiili ohitetaan erillisen

venttiilin avulla. Tulistunut kylmäainekaasu ohjataan kompressorilta höyrystimelle, jossa se luovuttaa energiaa lamelliin ja ulkoilmaan, jolloin vapautuva energia sulattaa lamellien pinnassa olevan jään. Energia kylmäaineeseen siirtyy puhtaasti kompressorin tekemästä työstä. Tästä syystä johtuen kuumakaasusulatus on toisinaan hyvin pitkäkestoinen. (Song, et, al., 2019)

6. Sulatuksen toteuttaminen kääntämällä kylmäainekierto nelitieventtiilin avulla on yleisin sulatuksen toteutustapa ilmalämpöpumppujärjestelmissä. Kylmäainekierron kääntäminen tarkoittaa sitä, että lauhduttimen ja höyrystimen tehtävät vaihtuvat keskenään, jolloin ulkoilmassa oleva höyrystin muuttuu lauhduttimeksi. Käänteisessä kierrossa kaukolämpöverkkoon kytketty lämpöpumppu siirtää energiaa kaukolämpöverkosta lamelleille. Käänteisessä kierrossa kaukolämpöverkkoon kytketyssä lämpöpumpussa kylmäaine höyrystyy kaukolämpöverkkoon kytketyssä lämmönsiirtimessä, josta se ohjataan kompressorille. Kylmäainekaasun painetta nostetaan kompressorissa, josta se ohjataan ulkoilmassa olevalle lamelleille. Kylmäaine lauhtuu lamellissa, jolloin se vapauttaa energiaa lamellin pintaan ja ulkoilmaan, jolloin jää alkaa sulamaan. Lamellilta kylmäaine jatkaa neste/kaasu seoksena paisuntaventtiilille, jossa sen painetta lasketaan hallitusti ja kylmäaine kulkee takaisin kaukolämpöverkossa olevalle lämmönvaihtimelle. Vedestä saadun energian lisäksi sulatukseen saadaan energiaa kompressorin sähkötehon kautta. Energiaa sulatuksen aikana kuluu lamellin lämmittämiseen, jään sulattamiseen, sulamisesta syntyvän nesteen lämmittämiseen ja lopulta nesteen höyrystämiseen lamellin pinnalta. Lisäksi sulatuksen aikana lamelli lämmittää ulkoilmaa, jolloin energia menee hukkaan. (Song, et, al., 2019)

Sulatusjaksojen optimointi on tärkeää järjestelmän hyötysuhteen vuoksi. Sulatusjaksojen ajankohta voidaan määrittää kuluneen ajan tai lämmönsiirron tehokkuuden mukaan. Aikapohjaisissa sulatusjaksoissa sulatusjaksojen tapahtumaväli ja kesto voidaan määrittää opittujen arvojen perusteella hyödyntäen kokemuksia jäätymisestä eri lämpötiloissa ja kosteuksissa. Lämmönsiirron mukaan tapahtuva sulatusjaksojen jaksottaminen toteutetaan seuraamalla lämmönsiirron suuruutta lämmönkeräimissä. Sulatusjakso aloitetaan lämmönsiirron alittaessa haluttu taso. Toteutustavasta riippumatta sulatusjaksojen ajoittaminen on tärkeässä roolissa. Erillistä nestettä käyttävien lämmönkeräimien etuna on niiden mahdollistama ylimääräinen kapasiteetti. Tämä käytännössä tarkoittaa sitä, että järjestelmään voidaan asentaa enemmän lämmönkeräimiä, kun lämpöpumput tarvitsevat käydäkseen täydellä kapasiteetilla, jolloin sulatus ei vähennä järjestelmän tuotantotehoa. Lämmönkeräimissä, joissa kiertävänä aineena toimii kylmäaine, vastaava toteutus ei ole mahdollinen, koska koko kylmäainepiirin tuotanto keskeytyy sulatuksen vuoksi. (Song, et, al., 2019)

Suuret ilmavesilämpöpumput ovat toistaiseksi harvinaisia kylmissä ilmastoissa, mutta pienempiä ilmalämpöpumppuja käytetään laajasti ympäri maailmaa. Kuvassa 13 on esitetty mahdollisia toimenpiteitä jäätyksen estämiseksi ja vähentämiseksi.



Kuva 13. Toimenpiteitä jäätyksen estämiseksi (Song, et al., 2019)

Jäätyksen määrää voidaan hallita siis monin eri keinoin. Ilmankosteuden vähentämistä erillisillä laitteilla pienemmissä ilmalämpöpumpuissa on tutkittu, mutta toistaiseksi se vaikuttaa kannattamattomalta ratkaisulta korkean hintansa vuoksi. Toinen hieman vastaava ratkaisu on lämmittää lämpöpumpun imuilmaa, kun ulkoilma viilenee niin, että jäätä alkaa muodostua. Imuilman lämmittäminen kylmissä olosuhteissa on kuitenkin ongelmallista korkean energiankulutuksen vuoksi. Esilämmitys voitaisiin kuitenkin toteuttaa edullisemmin teollisuuden hukkalämmöllä, jos sitä on saatavilla. Ilmavirtauksen nostamisella pystytään myös vähentämään jäätymistä, mutta ongelmaksi voi muodostua nousevat äänitasot ja kohonnut sähkönkulutus. (Song, et al., 2019)

Jään kertymistä voidaan estää myös mekaanisilla toimenpiteillä. Jään kertyksen vähentämistä ultraäänitärinällä on tutkittu muutamissa tutkimuksissa pienemmillä lämpöpumpuilla. Tutkimukset osoittavat, että tekniikan hyödyntämisellä on positiivinen vaikutus jään kertymiseen, COP-arvoon ja tuotantokapasiteettiin. (Tan, et al., 2014) Kyseisen tekniikan

hankintahinta on korkea ja ohjaaminen vaikeaa, mikä rajoittaa sen hyödyntämistä. Jään poistaminen voitaisiin toteuttaa myös ruiskuttamalla paineilmaa lamelleihin. Paineilman hyödyntämistä ei ole kuitenkaan tutkittu laajemmin, joten nykyisellä tietämyksellä sen kannattavuutta on vaikea arvioida. Paineilman ruiskutuksen huonona puolena on sen kallis hankinta- ja käyttöhintaa. (Song, et, al., 2019)

Jäätymiseen voidaan lisäksi vaikuttaa lamellien rakenteen optimoinnilla. Lamellien suunnittelussa tulee huomioida lamellin geometria ja ripojen tyyppi. Lamellien optimointi vaatii erillisen arvioinnin tilanteesta riippuen ja täten yleispätevää mallia ei ole. Lisäksi lamelleita suunnitellessa on huomioitava valmistuksen haastavuus, joka nostaa valmistuskustannuksia. Jäätymistä ja lamellien kulumista voidaan hallita myös erilaisilla pinnoitemateriaaleilla. (Song, et, al., 2019)

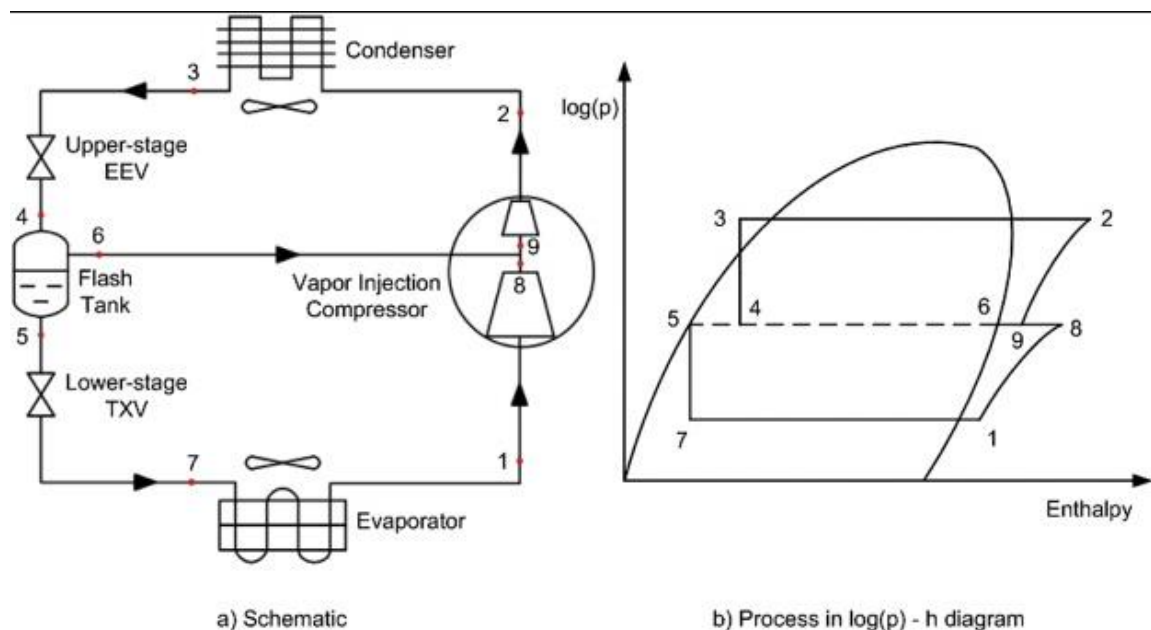
4.4 Höyryruiskutuksen hyödyntäminen lämpöpumpputeknologian kehittämisessä

Lämpöpumput kehittyvät edelleen, vaikka niitä on hyödynnetty jo 1800-luvulla. Itse lämpöpumppuprosessi säilyy tulevaisuudessakin samana, mutta valmistusteknologioiden kehittyminen mahdollistaa monimutkaisempien ja tehokkaampien kompressorien valmistamisen. (SFOE, 2008) Lisäksi jo aiemmin mainitut määräykset kylmäaineiden GWP- ja ODP-arvoille ohjaavat kylmäaineiden kehittymistä ja käyttöä. Kokemuksien kertyessä laitoksia voidaan optimoida entistä tehokkaammiksi. Lisäksi uudet teknologiat ja tutkimukset mahdollistavat entistä tehokkaamman sulatuksen toteuttamisen.

Erilaisia höyryruiskutusjärjestelmiä on käytetty jo pitkään, mutta niiden hyödyntäminen isommassa mittakaavassa on vasta yleistymässä. Höyryruiskutus on otettu kaupalliseen käyttöön jo 1970-luvun lopussa. Höyryruiskutusta käyttävät järjestelmät ovat tehokkaampia, kuin normaalit järjestelmät. Lisäksi höyryruiskutuksella pystytään säätämään kapasiteettia muuttamalla höyryn ruiskutussuhdetta. Höyryruiskutusta hyödynnettäessä kylmissä lämpötiloissa lämmityksen COP-arvon on havaittu parantuvan jopa 24% ja lämmityskapasiteetin jopa 45% verrattuna järjestelmiin ilman höyryruiskutusta. Puolestaan lämpimissä

olosuhteissa tuotettaessa viilennystä COP-arvossa on nähty parhaimmillaan 16,5% kehitys ja 14,2% kapasiteetin nousu. (Qiao, et al., 2015)

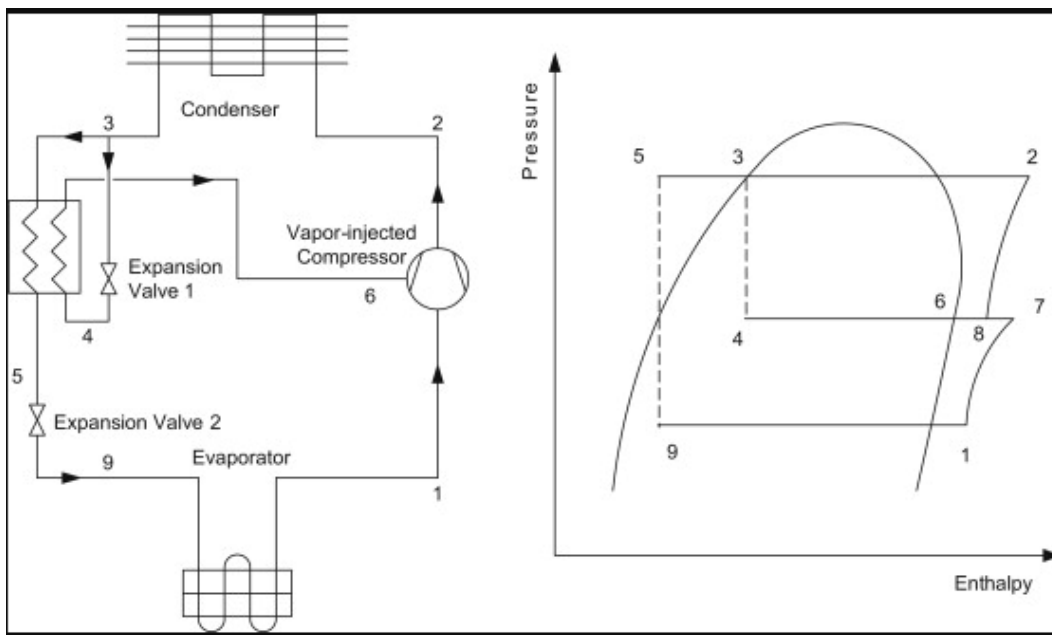
Höyryruiskutusjärjestelmällä varustettuja järjestelmiä on vaikeampi ohjata, kuin tavanomaisia järjestelmiä ja niiden valmistaminen on haastavampaa ja kalliimpaa. Erotussäiliöllä varustettu höyryruiskutusjärjestelmä (Flash tank cycle) eroaa normaalista lämpöpumppujärjestelmästä siten, että siinä on kaksi paisuntaventtiiliä, joiden välissä on kaasun ja nesteen erotussäiliö. Kuvassa 14 on esitetty esimerkki erotussäiliöllisellä höyryruiskutuksella varustettu järjestelmä ja merkitty eri vaiheet numeroin. Pisteiden 3-4 välissä on ensimmäinen paisuntaventtiili, jolla painetta lauhduttimelta tulevan neste-kaasuseoksen painetta lasketaan. Neste-kaasuseos kulkee erotussäiliöön, jossa seoksesta erotettu kaasu ohjataan välisyötön kautta takaisin scroll-kompressorin toiseen vaiheeseen (piste 6). Viileä neste ohjataan jälkimmäiselle paisuntaventtiilille (piste 5) ja siitä edelleen höyrystimen kautta kompressorin ensimmäiseen vaiheeseen. (Qiao, et al., 2015)



Kuva 14. Höyryruiskutus kompressorille (Qiao, et al., 2015)

Höyryruiskutus voidaan toteuttaa myös lisäämällä erotussäiliön tilalle lämmönvaihdin. Vastaava järjestelmä on esitetty kuvassa 15. Tällöin osa kylmäaineesta poistetaan lauhduttimen jälkeen välioton avulla ja sen paine lasketaan paisuntaventtiilillä (piste 3-4). Väliotossa erotettu matalapaineinen kylmäaine ohjataan lämmönvaihtimelle, jossa siihen siirtyy lämpöä

toisen piirin kylmäaineesta ja se höyrystyy, joka aiheuttaa höyrystimelle jatkavan kylmäaineen alijäähtymisen. Höyrystynyt välipiirin kylmäaine ohjataan kompressorin toiseen vaiheeseen. Sisäisen lämmönvaihtimen edut COP-arvoon ja kapasiteettiin syntyvät juuri höyrystimelle kulkevan kylmäaineen alijäähtymisestä, koska se mahdollistaa suuremman entalpiamuutoksen höyrystimessä. Väliiruiskutuksen ansiosta myös kompressorin tarvitsee vähemmän tehoa, jolloin COP-arvo paranee. (Xu, et al., 2011)



Kuva 15. Lämmönvaihtimella varustettu höyryruiskutus (Xu, et al., 2011)

4.5 Modulaaristen ratkaisujen ja suurten lämpöpumppujen ominaisuuksien vaikutus kaukolämpökäyttöön

Modulaarisien lämpöpumppuratkaisujen suurimpana etuna on niiden toimintavarmuus. Modulaarisissa ratkaisuissa tuotanto ei keskeydy täysin, vaikka kompressori tai jokin muu kriittinen komponentti hajoaa, koska modulaarisissa ratkaisuissa järjestelmään on yleensä integroitu useita rinnakkaisia komponentteja.

Käänteisellä kylmäainekierrolla toteutetussa sulatuksessa menetetään koko kylmäainepiirin tuotantokapasiteetti sulatuksen aikana. Tämä tarkoittaa sitä, että modulaarisessa ratkaisussa sulatus voidaan ajoittaa yhdelle kylmäainepiirille kerrallaan ja muut piirit tuottavat edelleen lämpöä. Mikäli järjestelmä muodostuu yksittäisistä suurista lämpöpumpuista, on sulatuksen optimoiminen haastavampaa, koska hetkellinen kapasiteettimenetykset on niissä suurempi. Yhdellä lämpöpumpulla toimivassa järjestelmässä sulatuksen aikana verkostoon ei tuoteta energiaa, mutta yleensä verkostosta otetaan lämpöä sulatukseen. Tällöin sulatusjaksot aiheuttavat suuria lämpötilavaihteluita kaukolämpöverkkoon, jotka puolestaan aiheuttavat erilaisia ongelmia kaukolämpöverkon säädölle ja optimoinnille.

Suuria lämpöpumppuja pystytään hyödyntämään paremmin, jos sulatus on toteutettu tuomalla lämpöä ulkoisesta lähteestä, kuten myöhemmin tässä diplomityössä esitettyssä Vermon ilma-vesilämpöpumpussa. Tällöin suurten kompressorien hyödyntämisessä ei ole suorita esteitä. Kompressorivalinnassa on kuitenkin arvioitava ominaisuuksien lisäksi niiden saataavuus, hinta ja käyttövarmuus. Lämpöpumppujärjestelmän voimakaskaan tehonvaihtelu ei välttämättä aiheuta ongelmia kaukolämpöverkossa, jos vaihtelu voidaan kompensoida muulla lämmöntuotannolla tai lämmön varastoinnilla ja vaihtelu hallitaan älykkäällä ohjauksella.

5 Ilma-vesilämpöpumppuprojektit Espoossa

Tässä osiossa käsitellään Fortumin Espoon kaukolämpöverkon alueella toteuttamia ilma-vesilämpöpumppuprojekteja ja kyseisten pumppujen käyttöönottoon liittyviä tuloksia.

5.1 Espoon kaukolämpöverkko

Espoon kaukolämpöverkkoon kuuluu Espoo, Kirkkonummi ja Kauniainen. Helsingin kaukolämpöverkko ei kuulu hydraulisesti samaan verkkoon, mutta lämpökauppa voidaan käydä Vermon lämpökeskuksella sijaitsevan lämmönvaihdinkeskuksen kautta. Vuonna 2019 Fortum toimitti lämpöä Espoon alueella 2370 GWh. Kaukolämpöverkon pituus on 880 kilometriä (Energiateollisuus, 2020). Verkkoon kuuluu yhdeksän lämpökeskusta ja kymmenen pumppaamo. Kaukokylmäverkko kulkee Suomenojalta Keilaniemeen. Lisäksi Fortum hallinnoi muutamia lämpöpumppuja, joilla tuotetaan kylmää paikallisesti.

5.2 Vermo AWHP-pilottiprojekti

5.2.1 Vermon AWHP-projektin toimintaympäristö

Vermon ilma-vesilämpöpumppuprojektissa asennettiin lämpöpumppujärjestelmä Vermon lämpölaitokselle. Lämpöpumppu kytkettiin kaukolämpöverkkoon ja pumpun jäähdytysominaisuus kytkettiin omaan pienempään kaukokylmäverkkoon. Lämpöpumput tuottavat kylmällä säällä lähes 100 °C asteista kaukolämpöä. Vermon ilma-vesilämpöpumppu eroaa huomattavasti myöhemmin käsiteltävästä Aalto Works lämpöpumpun ratkaisusta.

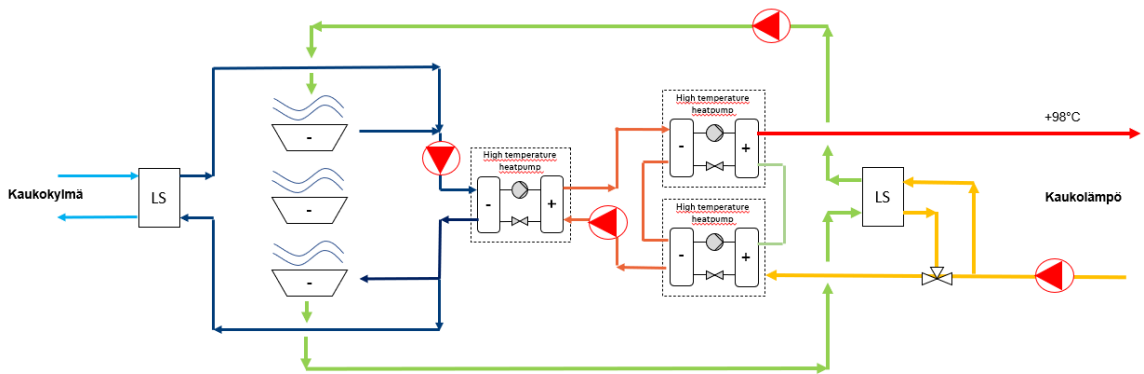
5.2.2 Ilma-vesilämpöpumput Vermon projektissa

Vermon ilma-vesilämpöpumppujen lämmitysteho on nollan celsiusen lämpötilassa noin 1400 kW ja viilennysteho noin 1200 kW. Lämpöpumppulaitos on esitetty kuvassa 16. Mitoituksessa lämpöpumpuille kaukolämmön lämpötilaksi on määritetty nollan celsiusasteen ulkolämpötilassa 85 °C ja lämpöpumpuille palaavaksi kaukolämmön lämpötilaksi 43 °C. Kovimmilla pakkasilla kaukolämmön lähtevän lämpötilan takuuarvo on lähes 100 °C. Lämpöpumput tuottavat kaukokylmää laitokselta lähtevään pienikokoiseen kaukokylmäverkkoon. Kaukokylmän lähtevän lämpötilan mitoitusarvo on 8 °C ja palaavan lämpötilan mitoitusarvo on 16 °C. Tuotannon pakkasraja on -10 °C.



Kuva 16. Vermon ilmalämpöpumpun lämmönkeräimet ja lämpöpumppukontti

Vermon ilma-vesilämpöpumppujärjestelmä koostuu kahdesta vaiheesta ja kolmesta lämpöpumpusta. Ensimmäisessä vaiheessa on taajuussäädettävä ruuvikompressori ja kylmäaineena on ammoniakki (R717). Toisessa vaiheessa järjestelmään on kytketty sarjaan taajuussäädettävällä ruuvikompressorilla varustettu lämpöpumppu, jonka jälkeen on neljällä mäntäkompressorilla varustettu lämpöpumppu. Mäntäkompressorilämpöpumpussa on kaksi kylmäainepiiriä, joissa molemmissa on kaksi mäntäkompressoria. Toinen kompressoreista on taajuussäädettävä kaikissa kylmäainepiireissä. Kylmäaineena toisen vaiheen lämpöpumpuilla on R1234ze. Ensimmäisen ja toiseen vaiheen väliaineena käytetään vettä. Kytkenän tarkoituksena on esilämmittää ensimmäisen vaiheen lämpöpumpulla välipiirin vesi noin 40 celsiusasteen lämpötilaan, jonka jälkeen toisen vaiheen pumpuilla nostetaan kaukolämpöverkon veden lämpötila kaukolämpöverkon tavoitelämpötilaan. Lämpöpumppujen kytkentä on havainnollistettu kuvassa 17.



Kuva 17. Vermon ilma-vesilämpöpumpppujärjestelmän kytkentä

Ensimmäisen vaiheen kompressorin lauhdutin on välipiirissä, jossa se luovuttaa lämpöenergiaa välipiirin veteen. Toisen vaiheen höyrystimet ovat samassa välipiirissä, josta ne keräävät lämpöenergian pumpuille. Toisen vaiheen lauhduttimet puolestaan luovuttavat lämmön kaukolämpövedeen. Järjestelmässä on seitsemän ulkoilmaan asennettua lämmönkeräintä, joista jokaisen päälle on asennettu kuusi ylhäältä alaspäin puhaltavaa puhallinta. Lämmönkeräimien sisällä kulkee glykoli, jonka välityksellä ilmasta kerätty lämpö siirretään ensimmäisen lämpöpumpun höyrystimelle. Kyseisen kytkentätavan vuoksi järjestelmä on siis liuoslauhdutteinen. Lämmönkeräimet näkyvät aiemmassa kuvassa 16 ja puhallimet ovat esitetty kuvassa 18. Järjestelmä on tehty konttiratkaisuna, jossa lämpöpumput ovat sijoitettuna yhteen kahden kontin yhdistelmään, sähkökeskus toiseen konttiin ja lämmönkeräimet ovat ulkoilmassa.



Kuva 18. Lämmönkeräimien päälle asennetut puhaltimet

Höyrystimiä on sulatettava, kun lamellien lämpötila laskee alle ulkoilman kastepisteen, jolloin lamellien pintaan alkaa kertyä jäätä. Sulatustoiminto on toteutettu yhdistämällä kaukolämpöverkon paluupuoli höyrystimiin. Höyrystimiä on seitsemän, joista tuotantokapasiteetin kannalta yksi on ylimääräinen ja sitä käytetään sulatukseen. Sulatusta tehdään yhteen höyrystimeen kerralla, jolloin sulatustoiminto ei laske lämpöpumppujen tehoa. Kaukolämpöverkon paluuvesi ohjataan venttiilien avulla sulatettavaan höyrystimeen. Höyrystimiltä palaava vesi ohjataan edelleen järjestelmän toisen vaiheen lämpöpumpuille, jossa se yhdistyy lämpöpumpuille menevään kaukolämpöverkon paluuveteen. Sulatus tehdään vakiopituksilla sykleillä, mutta myöhemmässä vaiheessa on mahdollista optimoida sulatusjaksoja esimerkiksi ulkolämpötilan tai lämmönsiirtymisen mukaan. Sulatuksesta muodostuva vesi tipuu lämmönkeräimien alapuolelle, josta se ohjataan viemäriin tasoja pitkin. Tasoja sulatetaan myös kaukolämmön paluuedellä.

5.3 Aalto Works

5.3.1 Aalto Works projektin toimintaympäristö

Aalto Works projektissa Otaniemen lämpökeskukselle asennettiin kaksi ilma-vesilämpöpumppua, jotka tuottavat aluelämpöä ja aluejäähdytystä paikallisverkkoon. Paikallisverkkoon on kytketty viisi rakennusta, joihin kaikkiin toimitetaan kaukolämpöä ja kolmeen rakennukseen toimitetaan kaukokylmää. Tavoitteena on kattaa 70 % rakennusten lämmitystarpeesta paikallisverkon kautta. Jäljelle jäävä osuus lämmitystarpeesta toimitetaan normaalisti kaukolämpöverkosta, johon kaikki rakennukset ovat myös kytkettynä. Aluelämpöverkosta ja kaukolämpöverkosta otettavan lämmön suhdetta säädetään kolmitieventtiilillä. Sääto tehdään kuitenkin niin, että kaukolämpöverkosta ei oteta lämpöä lainkaan, jos aluelämpöverkosta saatava lämpö riittää täyttämään kiinteistöjen lämmöntarpeen. Käytännössä kaukolämpöverkon vettä käytetään kuitenkin pieniä määriä käyttöveden lämmittämiseen kaikissa tilanteissa, jotta legionellabakteerin ilmaantuminen järjestelmiin voidaan estää. Paikallisverkon tavoitelämpötila on 45 °C, joka on matala suhteessa normaaleihin kaukolämpöratkaisuihin. Paikallisverkkoon on mahdollista lisätä tulevaisuudessa lisää kiinteistöjä, jos ratkaisu osoittautuu kannattavaksi. Lämpöä tuottaessa lämpöpumput ottavat energiaa talteen ilmasta, mutta koneita voidaan myös käyttää vesi-vesilämpöpumppuina. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että pienillä kylmäkuormilla yksi kylmäainepiiri ottaa energiaa kylmäverkosta ja siirtää sen aluelämpöverkkoon. Tällöin loput kylmäainepiirit keräävät lämpöä ilmasta tarvittavan lämmityskapasiteetin verran. Toisaalta tilanteessa, jossa kylmä- ja lämpökuormat ovat keskenään yhtä suuret lämpöpumput voisivat teoriassa toimia puhtaasti vesi-vesilämpöpumppuina. Hyötysuhteen kannalta järjestelmän käyttö on tehokkainta, kun kylmä- ja lämpökuormat ovat lähellä toisiaan, koska vesi-vesilämpöpumppuprosessi on ilma-vesilämpöpumppuprosessia tehokkaampi. Lämpimällä säällä lämpöpumput puolestaan lauhduttavat kylmäverkosta lämpöä ulkoilmaan.

5.3.2 Ilma-vesilämpöpumput Aalto Works projektissa

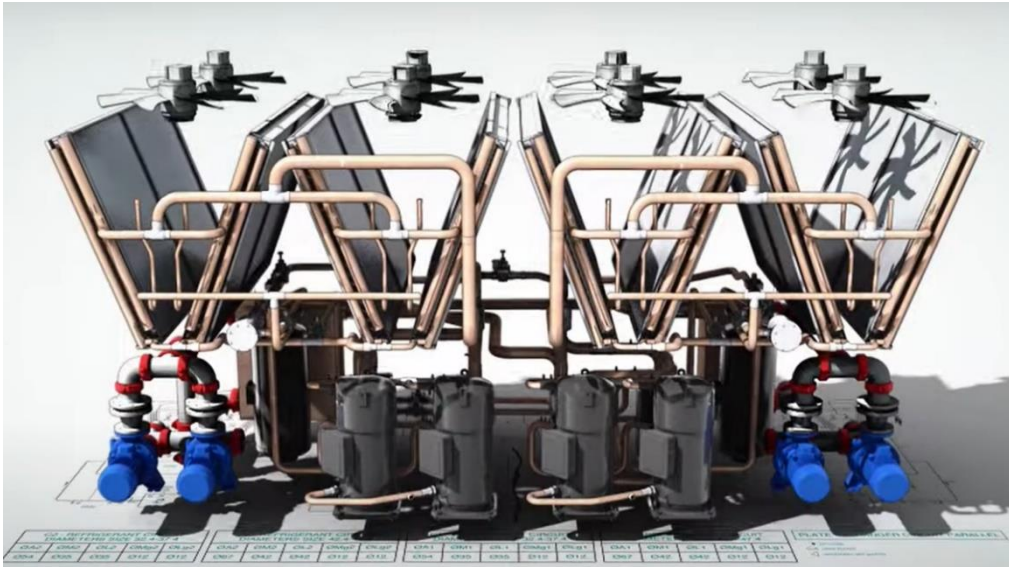
Aalto Works projektin ilma-vesilämpöpumppujärjestelmä koostuu kahdesta lämpöpumpusta. Paikallisverkkoon asennetut lämpöpumput ovat keskenään samanlaiset. Otaniemen lämpökeskuksen pihalle asennetut lämpöpumput on esitetty kuvassa 19. Pumppujen yhteenlaskettu lämmitysteho on 740 kW ja viilennysteho 845 kW. Lähtevän kaukolämmön

tavoitelämpötila on 45 °C ja paluulämpötilan mitoitusarvo on 38 °C. Kaukokylmän tavoitelämpötila on 8 °C ja palaavan kaukokylmän lämpötilan mitoitusarvo on 16 °C. Pakkasraja lämpöpumppujen ilma-vesi -käytöllä on -15 °C. Pelkällä vesi-vesi -käytöllä pakkasrajaa ei ole.



Kuva 19. Lämpöpumput Otaniemen laitosalueella

Lämpöpumput, lämmönvaihtimet ja höyrystimet ovat kaikki sijoitettuna laitteiden sisälle. Lämpöpumpuissa on kaksi kylmäainepiiriä molemmissa koneissa ja kaikissa kylmäainepiireissä on kaksi scroll kompressoria. Järjestelmässä on siten yhteensä neljä kylmäainepiiriä ja kahdeksan kompressoria. Molemmilla koneilla on omat lämmönvaihtimet aluelämpö- ja aluejäähdytyspuolelle. Jäähdytys- ja lämmitysverkossa on molemmissa kaksi kiertopumppua, joista toiset ovat varalla. Kaikki kiertopumput ovat keskenään samanlaisia, joka vähentää varaosien varastointitarvetta. Koneissa on kahdeksan EC-moottorilla varustettua puhallinta, jotka puhaltavat ilman niiden alapuolella oleviin lamellipattereihin. Lamellipatterit on valmistettu alumiinista ja niiden sisällä kulkee kupariputket. Lamellipatterit toimivat höyrystiminä lämpöpumppukäytössä ja lauhduttimina vedenjäähdytyskäytössä. Kylmäaine kulkee lämmönkeräimien sisällä, eli järjestelmä on ilmalauhdutteinen. Molemmissa lämpöpumpuissa käytetään kylmäaineena R410a:ta. Komponenttien sijoittelu koneen sisälle on esitetty kuvassa 20.



Kuva 20. Lämpöpumpputjärjestelmän läpileikkaus (Swegon, 2020)

Lämpöpumpujen määrällä ei ole operoinnin kannalta suurta merkitystä, koska niitä operoidaan kuin koko järjestelmä olisi yksi laite. Tässä tapauksessa toiselle lämpöpumpusta annetaan käyttöarvot ja toinen lämpöpumppu noudattaa samoja asetusarvoja. Koneiden ohjaaminen voidaan toteuttaa kuorman mukaan niin, että molemmat ajavat samansuuruisia kuormia tai vain toinen koneista ajaa, jos kuorma ei ylitä koneen maksimituotantoa.

Lämpöpumput pystyvät toimimaan pelkkänä jäähdytyslaitteena, pelkkänä lämmityslaitteena tai niitä voidaan käyttää samanaikaisesti sekä jäähdytys- että lämmityslaitteena. Pelkkää lämpöä tai kylmää tuottaessa lämpöpumput toimivat puhtaasti ilma-vesilämpöpumppuina. Lämpöä tuottaessa koneen päällä olevat lamellipatterit toimivat höyrystiminä ja kylmää tuottaessa lämpöpumpun kylmäainepiirit toimivat vastakkaisella tavalla ja lamellipatterit toimivat lauhduttimina. Kylmän ja kuumen tuotannossa laitos toimii vesi-vesilämpöpumpuna ja molempien kuormat ovat yhtä suuret. Lämmitys- ja viilennyskuormat eivät kuitenkaan yleensä ole käytännössä yhtä suuret, jolloin loput tarvittavasta tuotannosta toteutetaan ilma-vesi -prosessilla. Talvella viilennyskuorman ollessa lämmityskuormaa pienempi tarvittava energia otetaan ilmasta ja kesällä tilanteen ollessa toisinpäin aluekylmäverkosta siirretään energia takaisin ilmaan.

Ilma-vesilämpöpumppujen höyrystimet tarvitsevat sulatusta, koska kylmällä säällä ilmassa oleva kosteus tiivistyy lamellipattereihin ja jäätyy. Otaniemessä käytettävillä lämpöpumppuilla sulatustoiminto on toteutettu niin, että kylmäpiirin suunta käännetään ja konetta käytetään veden lauhduttimena, jolloin lämpö vapautuu lamelleihin. Vastaavissa koneissa on toisinaan käytetty patterien alaosassa kulkevaa jatkuvaa pientä kuumakaasupiirin kaasun virtausta lisäsulatuksena, mutta Otaniemessä olevassa ratkaisussa sitä ei ole kuitenkaan hyödynnetty. Höyrystimien alaosassa on havaittu jään kertymistä, joten Suomen kylmissä olosuhteissa kuumakaasun käyttäminen patterin alaosan sulattamiseen voisi tuoda lisähyötyä. Kuumakaasupiirin hyödyntäminen patterien sulattamisessa on esitetty kuvassa 21 ja sen alapuolella kuvassa 22 on esitetty lamellien alaosaan kertynyt jää. Ajotapa vaikuttaa merkittävästi laitoksen hyötysuhteeseen, koska täydessä ilma-vesiajossa sulatusjaksoja tarvitaan enemmän. Pelkässä vesi-vesi -ajossa sulatusta ei tarvita lainkaan, koska silloin lamellipattereita ei käytetä höyrystiminä.



Kuva 21. Lamellien alaosan sulattaminen kuumakaasulla (Swegon, 2021)



Kuva 22 Lamellipatterien alaosan jäätyminen.

6 Vermon ja Aalto Worksin pilottilaitoksista saadut kokemukset

Kuten edellä on kerrottu Espoon kaukolämpöverkon yhteyteen toteutetut kaksi pilottilaitosta Vermon AWHP ja Aalto Works -projektit poikkeavat täysin toisistaan sekä teknisiltä ratkaisultaan, käyttötavaltaan, että olosuhteiltaan. Tästä syystä laitoksista tehdyt havainnot ovat erilaisia ja niissä keskitytään erilaisiin yksityiskohtiin.

6.1 Vermon pilottilaitoksesta tehdyt havainnot

6.1.1 Rakentamisen ja käyttöönoton aikana tehdyt havainnot

Vermon ilma-vesilämpöpumpupilottilaitoksen käyttöönotto ajoittui vuoden 2021 helmikuulle, jolloin Etelä-Suomessakin oli kylmän sään jakso. Kyseisen pakkasjakson aikana lämpöpumpuille tehtiin sähköasennuksia ja automaatiotestauksia. Kovat pakkaset hidastavat ulkoilmassa tehtäviä sähköasennuksia. Kaapelien asennus lämmönkeräimille vaati kaapelin lämmittämisen erikseen rakennetussa ja lämmitetyssä teltassa, koska kaapelien kuori ei kestä taivuttamista kovassa pakkasessa. Sähköasennus kovalla pakkasella saattaa jopa tuplata siihen tarvittavan ajan ja tästä syystä kovat pakkaset aiheuttivat käyttöönoton viivästymisen. Lisäksi lämmönkeräimien puhaltimien siivet olivat jäätyneet kiinni ennen niiden käyttöönottoa. Käytön aikana vastaavaa ongelmaa ei pitäisi syntyä, koska Vermossa puhaltimet on ohjelmoitu pyörimään jatkuvasti pienellä teholla, vaikka kuormaa ei olisi tai lämpöpumppujen tuotanto olisi ajettu alas esimerkiksi matalan ulkolämpötilan vuoksi. Ennen koko järjestelmän käyttöönottoa kaikki lämpöpumppujen pääkomponentit koekäytettiin ja toteutettiin tarvittavat painekokeet. Lisäksi ammoniakkipumpun pyörimissuunta tarkastettiin ennen kytkemistä, jotta pumppu ei rikkoudu väärän pyörimissuunnan vuoksi.

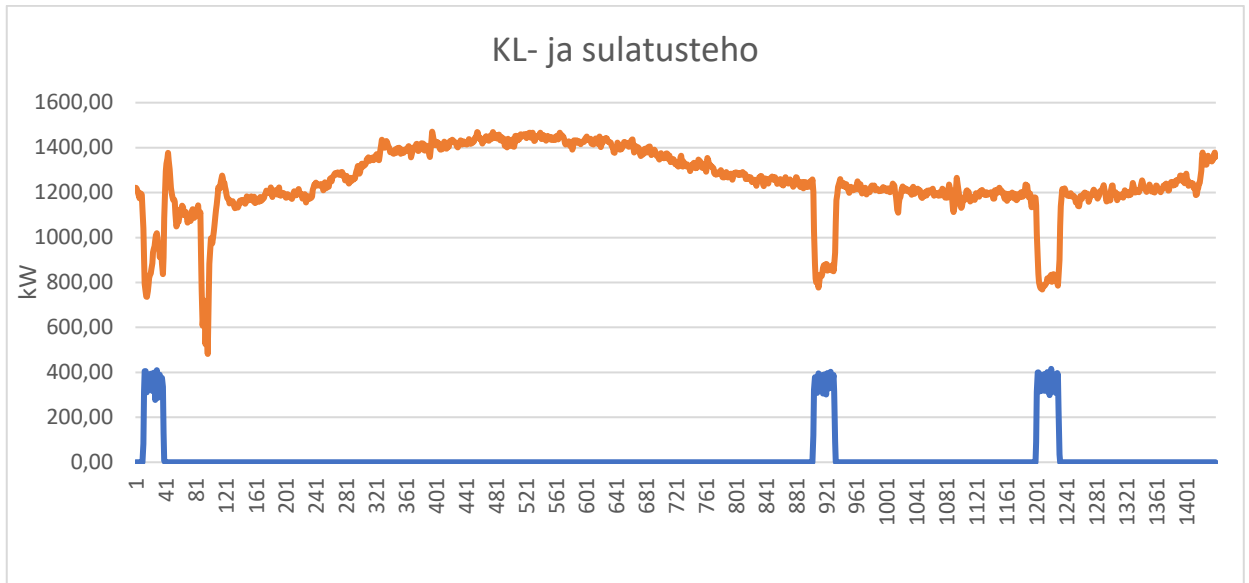
Lämpöpumppujen ensimmäisellä käynnistyskerralla lämpöpumpuille menevän kaukolämpöverkon paluuveden lämpötila oli lähes 90 asteista. Paluuveden korkean lämpötilan aiheutti samaan linjaan kytketyt lämpökattilat. Kyseisten kattiloiden lämmityspiiri kierrättää vettä kattiloiden läpi, mikä nosti lämpöpumpuille menevän veden lämpötilaa. Ongelman väliaikaiseksi ratkaisemiseksi kattiloiden lämmityspiirin venttiilit suljettiin. Putkistomuutokset ovat tarpeen, jotta kattiloiden lämmityspiirin kierto saadaan palautettua normaaliksi lämpöpumppujen käyttöönoton jälkeen.

Kaukolämmön kiertovesipumpun pyörimissuunta oli asetettu väärin asennusvaiheessa. Lisäksi virtausmittauksen tiedossa yläautomaatiolla oli virhe, minkä vuoksi kaukolämmön virtausnopeusautomaatiossa yksikoksi oli asetettu litraa sekunnissa, vaikka todellisuudessa mitattava yksikkö oli kuutiometriä tunnissa. Virtausnopeuden mittaamisen virheestä johtuen kiertovesipumpun väärän pyörimissuunnan havaitseminen oli haasteellista, koska väärään suuntaan pyörivän pumpun läpi kulki pieni virtaus, joka yksikkövirheestä johtuen näytti riittävän suurelta mitoitusarvoihin verrattuna. Liian pieni virtaus aiheutti lämpöpumpuilta lähtevän veden lämpötilan nousemisen, jonka vuoksi lämpöpumput ajoivat itsensä alas. Vastaavien ongelmien välttämiseksi tehtyjen asennusten tarkastaminen ja automaatiotestauksien huolellinen suorittaminen on ensiarvoisen tärkeää.

6.1.2 Laitoksen koekäyttövaiheen aikana tehdyt havainnot

Lämpöpumppukontti on jäädytetty kahdella lämmönkeräimellä, jotka keräävät kontin lämmön hyödynnettäväksi lämpöpumpuilla. Jäädytystä tarvitaan, koska kontin sisällä olevat lämpöpumput, oheislaitteet ja aurinko lämmittävät kontin lämpötilan hyvin korkeaksi. Kontin lämpötila nousi järjestelmää ajettaessa liian korkeaksi, jolloin ensimmäisen vaiheen lämpöpumpun moottorin lämpötila nousi osakuormilla liian korkeaksi. Ongelman korjaamiseksi konttiin lisätään lämmöntalteenottokapasiteettia. Kontin lämpeneminen aiheutti ongelmia lämpöpumppujen käytössä koko käyttöönoton ajan.

Koeajoista saatujen ensimmäisten tulosten pohjalta huomattiin, että lämmönkeräinkentän kapasiteetti ei yllä mitoitusarvoihin. Keräinkentän kapasiteetti oli ylimitoitettu siten, että sulatusjaksoja varten lämmönkeräimiä olisi yksi ylimääräinen ja sulatus voitaisiin toteuttaa ilman koko pumppulaitoksen tehon laskemista. Liian alhaisen lämmönkeräinkapasiteetin takia ajotapaa jouduttiin muuttamaan siten, että kaikkia keräimiä käytetään samanaikaisesti. Ongelman ratkaisemiseksi tulevaisuudessa saatetaan joutua hankkimaan yksi ylimääräinen keräin, jotta kapasiteetti saadaan nostettua mitoituksen mukaiseksi. Kaikkien keräimien ollessa käytössä laitoksen kapasiteetti laskee sulatuksen aikana. Tehon lasku on esitetty kuvassa 23, josta voidaan havaita sulatusjaksojen aikainen tuotantokapasiteetin lasku.



Kuva 23. Kapasiteetin lasku sulatusjakson aikana. Hetkellinen lämmitysteho on kuvattu oranssilla ja sulatus-teho sinisellä.

6.2 Aalto Worksin pilottilaitoksesta tehdyt havainnot

6.2.1 Rakentamisen ja käyttöönoton aikana tehdyt havainnot

Aalto Works ilma-vesilämpöpumpppilottilaitoksen käyttöönotto aloitettiin vuoden 2020 joulukuussa. Laitoksen asennustyöt sujuivat ongelmitta. Muutamia putkistovuotoja jouduttiin korjaamaan, mikä aiheutti hieman viivästystä käyttöönottoon. Lämpöpumput toimitettiin tehtaalta valmiiksi kylmäaineilla täytettyinä ja valmiina käyttöönotettaviksi, joten laitoksen käyttöönotto poikkesi lähtökohtaisesti merkittävästi Vermon laitoksen käyttöönotosta.

6.2.2 Koekäyttövaiheen aikana tehdyt havainnot

Aluelämpöverkon epäpuhtauksien aiheuttamat ongelmat käytölle

Alueverkon virtausnopeudet olivat käyttöönoton aikana noin puolet suunnitteluarvoista, vaikka kiertopumput kävivät kovilla tehoilla. Ongelmaksi paljastui verkoston rakennusvaiheessa putkistoihin kulkeutunut maa-aines ja puiden lehdet. Kaikkien kiinteistöjen lianerottimet avattiin ja puhdistettiin. Puhdistuksen jälkeen virtausnopeudet kasvoivat ja pumpun käyttämä teho laski huomattavasti. Mutapussit tukkeutuivat kuitenkin jatkuvasti ja lianerottimia puhdistettiin useaan kertaan. Aluksi lianerottimista löytyi pienemmän lian lisäksi vierasesineitä, kiviä ja lehtiä. Lianerottimet lisättiin lämpöpumpuille vasta käyttöönoton

jälkeen, joten myös lämpöpumppujen lämmönvaihtimet altistuivat likaantumiselle. Lianerottimien jatkuvien puhdistumisien jälkeen suuremmat partikkelit saatiin poistettua verkosta. Lika oli kuitenkin alkanut hajoamaan ja sekoittumaan veteen, joten kaikki veden epäpuhtaudet eivät enää olleet silmämääräisesti havaittavissa vettä juoksutettaessa. Kuvassa 24 on esitetty vesinäytteet veden juoksuttamisen jälkeen ja 24 tunnin kuluttua juoksuttamisesta. Kuvista näkyy, kuinka partikkelit ovat erottuneet näytteenottoastian pohjalle. Vihreä väri johtuu kaukolämpöveden värjäyksestä, jonka tarkoituksena on helpottaa vuotojen havaitsemista.



Kuva 24. Aluelämpöverkon vesinäyte. Vasemmalla kuva näytteestä näytteenottohetkellä ja oikealla seisotettu näyte, jossa sakka on vajonnut pohjalle.

Veden epäpuhtautta aiheuttavien partikkelien pienen koon vuoksi lika on päässyt kulkeutumaan lianerottimien läpi ja osa siitä on jäänyt kiinteistöjen lämmönvaihtimille. Puhdistuksen yhteydessä lämmönvaihtimia huuhdeltiin useaan kertaan käänteisellä virtauksella, jolloin vesi muuttui hyvin sameaksi. Tämä osaltaan viittaa siihen, että lämmönsiirtimet ovat

altistuneet lialle, joka vaikuttaa jossain määrin kiinteistöjen lämmönvaihtoon ja lämpötilamuutokseen lämmönvaihtimilla. Heikentynyt lämmönvaihto nostaa lämpöpumpuille palaa-
van veden lämpötilaa, joka puolestaan aiheuttaa lämpöpumppujen tehon alenemista. Pienet
partikkelit pääsevät kulkemaan verkossa hyvin vapaasti, joten veden aktiivinen vaihtaminen
puhdistaa vettä tehokkaasti ja vähentää muiden toimenpiteiden tarvetta.

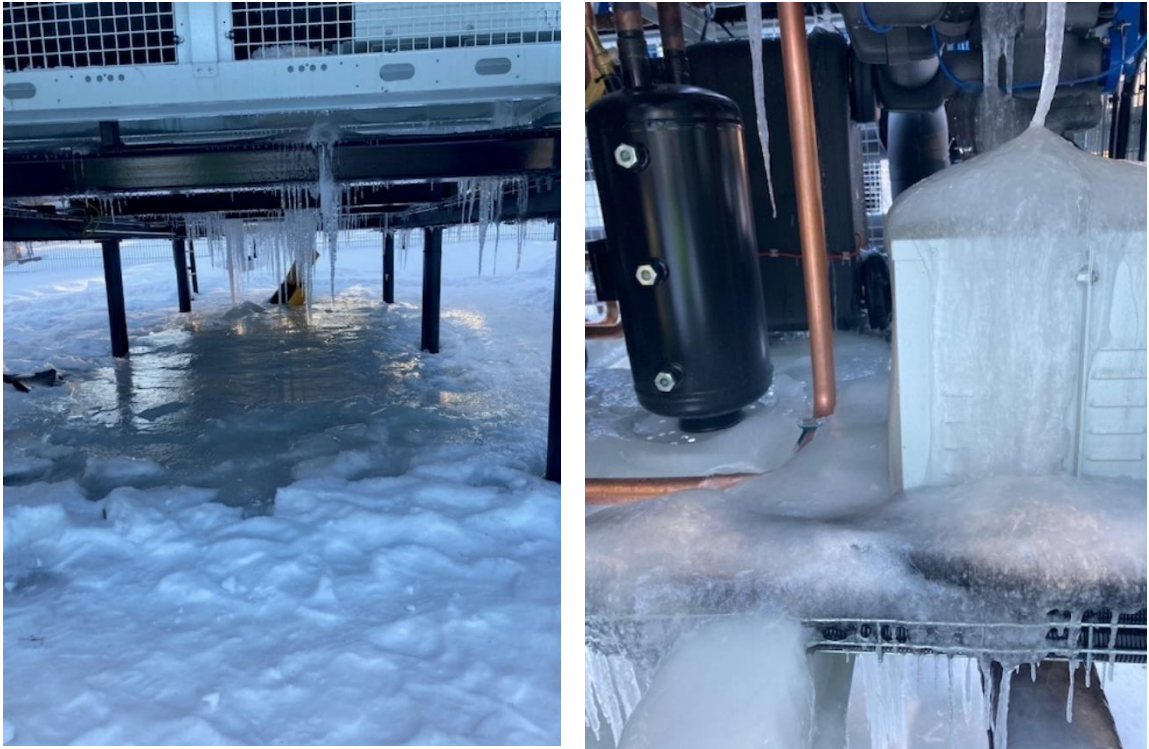
Käyttöönoton kannalta aluelämpöverkon epäpuhtaudet aiheuttivat suurimman ongelman
jäähdytyspuolella, koska likaa kertyi jatkuvasti suurimman jäähdytystarpeen omaavan kiin-
teistön lianerottimeen, vaikka verkon vettä koitettiin vaihtaa suuria määriä. Lianerottimien
tukkeutuminen aiheutti virtausnopeuden laskemisen ja täten lämmönsiirron heikkenemisen.
Ratkaisuksi ongelmaan mutapussi vaihdettiin 100 DN putkikoon mutapussista 150 DN put-
kikoon mutapussiin. Suurempi mutapussi ei tukkeudu yhtä nopeasti ja täten aluelämpöver-
kon veden likaisuus ei vaikuta niin voimakkaasti kaukokylmän toimitukseen kiinteistölle.
Suurempi lianerotinkin vaatii säännöllistä puhdistamista siihen asti, että aluekylmäverkon
vesi on puhdistunut.

Vastaavissa toteutuksissa on tärkeää jatkossa huolehtia aluelämpöverkon puhdistamisesta
ennen käyttöönottoa, koska lian poistaminen pienten lianerottimien kautta vaatii paljon puh-
distuskertoja ja aiheuttaa ongelmia alueverkon elinkaaren alkuvaiheessa. Lisäksi pieniin
alueverkkoihin olisi hyvä asentaa sivuvirtasuodattimet, jotka puhdistavat jatkuvasti vettä
partikkeleista. Lianerottimien valinnalla voidaan myös vaikuttaa tukkeutumiseen. Aalto
Works projektissa käytettyjen lianerottimien suodatusverkot ovat suoraan kiinni lianerotti-
mesta ulosmenevässä putkessa, joten lian tarttuessa verkkoon virtaus häiriintyy herkästi.

Lämpöpumppujen vaikutus lähiympäristöön

Kylmällä ja kostealla säällä lämpöpumppujen sulatus aktivoituu useasti. Sulatuksen ja jään
kertymisen kannalta haastavin lämpötila on lähellä nollaa celsiusastetta. Sulatuksen aikana
lämpöpumput valuttavat paljon vettä, joka tippuu suoraan lämpöpumppujen alle. Isommissa
kokonaisuuksissa on tärkeää suunnitella tehokas vedenpoisto. Vedenpoiston toteutuksessa
tulee huomioida myös mahdollisten kourujen sulatus, jotta kourut eivät jäädy lämpötilan
laskiessa alle 0 °C. Vedenpoiston tärkeys korostuu entisestään laitokseen kasvaessa, koska
silloin myös sulatuksesta aiheutunut veden määrä kasvaa. Lämpöpumppujen alle ja sisään

kerääntyä pakkasella huomattavasti jäätä, joka on esitetty kuvassa 25. Laitoksen toteutuksessa kompressorit, pumput ja lämmönvaihtimet on sijoitettu lämmönkeräimien alle, joka altistaa ne vedelle ja jäälle. Käyttöönoton aikana kertynyt jää ei aiheuttanut lämpöpumpuille ongelmia, mutta on mahdollista, että jää ja vesi vaikuttavat komponenttien kestävyYTEEN. Tämän vuoksi lämpöpumppujen vedenpoistoa parannettiin myöhäisemmässä vaiheessa.



Kuva 25. Pakkaskaleilla sulatus aiheuttaa jään kertymistä lämpöpumpun alapuolelle ja sisälle

Lämpöpumppujen sulatuksen aikana lämmönkeräimet höyrystävät vettä, jolloin lämpöpumpuista nousee höyrypilvi (Kuva 26). Muodostuva höyrypilvi ei aiheuttanut ongelmia Otaniemessä, mutta höyryn muodostuminen korostuu, jos lämpöpumppuja on asennettu enemmän rinnakkain. Otaniemessä lämpöpumppu on sijoitettu lämpökeskuksen taakse, joten se ei näy ainakaan vahvasti laitoksen ulkopuolelle. Sulatuksen yhteydessä muodostuva höyrypilvi on myös hyvä ottaa huomioon, jos suurempia yksiköitä rakennetaan lähelle asuinalueita. Høyrypilvi on paikallisesti esteettinen haitta ja tietyissä olosuhteissa höyry voi tiivistyä lähialueen pinnoille vedeksi ja jäätyä.



Kuva 26. Sulatuksen aikana syntyvä hörypilvi.

Lämpöpumppujen aiheuttamasta melusta on laadittu erillinen selvitys. Mittaukset suoritettiin neljässä pisteessä, joiksi valittiin äänen etenemisen kannalta olennaisimmat suunnat. Mittauspisteet sijaitsivat 9-20 metrin päässä lämpöpumpuista ja 1,5 metrin korkeudella maanpinnasta. Lämpöpumppujen aiheuttamia äänitasoja mitattiin 2-4 minuuttia kaikissa neljässä pisteessä ja ympäristön taustamelua samoissa pisteissä 1-2 minuutin ajan. Melun suuruus on arvioitu laskennallisesti mittauspisteitä pidemmille etäisyyksille. Melutason ohjearvo on asetettu valtioneuvoston päätöksessä 993/1992, jonka mukaan meluraja päivisin on 55 dB ja öisin 50 dB (Valtioneuvosto, 1992). Mitatut keskiäänitasot mittauspisteissä olivat 53-62 dB. Lähimpiin rakennuksiin on kuitenkin pitkä matka mittauspisteistä. Lämpöpumppujen läheisyydessä on virkistysalue, jolla meluraja tulee ensimmäisenä vastaan. Virkistysalueen suuntainen mittauspiste on 9 metrin päästä lämpöpumpulta ja äänitaso on ollut 62 dB. Etäisyys virkistysalueelle on 100 metriä. Äänitaso saadaan ratkaistua yhtälön 1 avulla, jossa L_p on äänitaso, L_w on kohteen ääniteho, k on äänilähteen suuntakerroin, Ω on avaruuskulma, r on etäisyys äänilähteestä ja D on leviämisvaimennus vapaassa kentässä. (Vahanen, 2021)

$$L_p = L_w + D = L_w + 10 \lg \left(\frac{k}{\Omega r^2} \right) \quad (1)$$

Laitoksen äänitaso saadaan ratkaistua yhtälön 2 mukaisesti.

$$L_W = L_P - D = 62 \text{ dB} - 10 \lg\left(\frac{1}{4\pi*(9 \text{ m})^2}\right) = 92,1 \text{ dB} \quad (2)$$

Lopuksi äänitaso 100 metrin päässä sijaitsevalla virkistysalueella saadaan ratkaistua äänitason yhtälöllä 3.

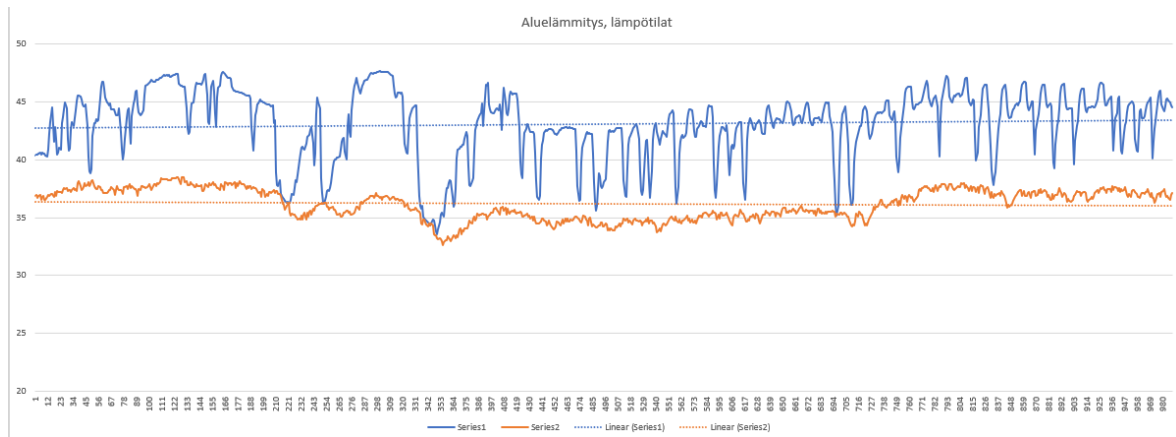
$$L_P = L_W + D = 92,1 \text{ dB} + 10 \lg\left(\frac{1}{4\pi*(100 \text{ m})^2}\right) = 41,1 \text{ dB} \quad (3)$$

Laskennallisesti määritettynä melutaso virkistysalueella on 41,1 dB, joka on selvästi alle valtioneuvoston päätöksessä 993/1992 asetetun 50 desibelin raja-arvon.

Lämpöpumppujen optimointiin ja käyttöön liittyvät havainnot

Lämpöpumppujen käyttöönottoaiheessa lämpöpumppujen optimointi ja säätäminen aiheutti monia ongelmia. Kiinteistöjen lämmönvaihtimet on suunniteltu vastaanottamaan 45 °C asteista kaukolämpöä. Mikäli paikallisverkon lämpötila laskee liian alhaiseksi, otetaan puuttuva energia kiinteistöön Espoon kaukolämpöverkosta kiinteistössä olevan erillisten lämmönvaihtimien kautta.

Käyttöönottoaiheessa lämpöpumput syöttivät keskiarvallisesti 45 °C asteista kaukolämpöä, mutta syötettävän kaukolämpöveden lämpötila vaihteli ja laski säännöllisesti alle kyseisen lämpötilan. Vaihtelu lämpötilassa aiheutti sen, että kiinteistöillä automaatio korvasi energiaa vajetta Espoon kaukolämpöverkosta. Tällöin paikallisverkon kaukolämpövesi kulki takaisin lämpöpumpuille lähes saman lämpöisenä. Tämän vuoksi lämpöpumppujen automaatio sai tiedon, että lämpökuormaa ei ole, ja järjestelmä laski lämpöpumppujen tehoa. Lämpöpumppu käy täydellä teholla, kun palaavan veden lämpötila on alle 40 °C ja puolella teholla lämpötilan ollessa 42,5 °C, jos lähtevän lämpötilan asetusarvo on 45 °C. Säästöparametrejä muutettiin niin, että lämpöpumput tuottavat enemmän energiaa, vaikka lämpötila olisi lähelle 45 °C. Tällöin tuotantomäärä ei lähde laskemaan, vaikka kiinteistöt eivät heti vastaanottaisivatkaan lämpöä. Lisäksi ongelman eliminoimiseksi kiinteistöillä laskettiin lämpötilakäyrää hieman, jotta kaukolämpö ei korvaisi aluelämpöä pienissä lämpötilavaihteluissa. Aluelämpöverkon lämpöpumpuilta lähtevän veden lämpötilan vaihtelu on esitetty kuvassa 27.



Kuva 27. Aluelämmityksen lähtevän ja palaavan veden lämpötilat

Kaukolämmön ja aluelämmön suhdetta ohjaavan kolmitieventtiilin automaatiota voitaisiin muuttaa niin, että lämpötilavaihtelussa venttiili aukeaa ja alkaa korvaamaan aluelämpöä kaukolämmöllä viiveellä vasta muutaman minuutin odottamisen jälkeen, jolloin pienet lämpötilavaihtelut eivät vielä suoraan aktivoisi kaukolämmön syöttöä kiinteistöihin. Venttiilin ohjauksen olisi kuitenkin aktivoiduttava, jos lämpötila ei nouse asetetussa ajassa takaisin 45 °C yläpuolelle, tai se laskee alle 40 °C. Kyseiselle automaatiomuutokselle ei kuitenkaan ollut tarvetta, koska kiinteistöjen lämpötilakäyrien optimointi ratkaisi kiinteistöjen pään ongelmat.

Lähtevän veden lämpötilavaihteluiden perimmäinen syy on todennäköisesti lämpöpumppujen sulatusjaksot. Merkittävin syy lämpötilavaihteluille on sulatusjaksot, joiden aikana lähtevän veden lämpötila laskee hetkellisesti kapasiteetin vähenemisen takia. Sulatusjaksoista johtuvan lämpötilan heilahtelujen välttämiseksi laitokset tulisi suunnitella redundanttisiksi, eli ylimääräistä tuotantokapasiteettia tulisi olla saman verran, kun sulatusjakson aikana järjestelmästä katoaa kapasiteettia. Koneet itsessään eivät sulata kuin yhtä piiriä kerrallaan, mutta rinnakkaiset koneet voivat sulattaa yhtä piiriä samanaikaisesti. Täten pahimmassa tapauksessa järjestelmä voi sulattaa kahta kylmäainepiiriä kerralla, jolloin tuotantokapasiteetti vähenee merkittävästi. Täten sulatusjaksojen automatisoinnissa tulee huomioida tasainen lämpötuotanto, eli useamman piirin sulatusjaksot eivät saisi osua samalle ajankohdalle. Sulatuksenaikaisen lämpötilan vaihtelun pienentämiseksi hyödynnettiin jo laitoksen asennusvaiheessa tehtyä ohitusta, jonka avulla osa lähtevästä aluelämpövedestä saadaan ohjattua paluulinjaan. Sääto toteutettiin läppäventtiilillä, joka säätää ohituslinjan virtausta lämpötilan

laskiessa. Venttiilin säätö mahdollistaa sen, että lämpötilan heilahdellessa aluelämpöverkoon pääsee vähemmän alle 45 °C vettä, jolloin kiinteistöt eivät ala ottamaan niin helposti korvaavaa lämpöenergiaa kaukolämpöverkosta. Ohitus aiheuttaa kuitenkin lämpöpumppujen päässä säätöongelmia, koska lämpöpumppujen automaatio ei hyödynnä tietoa veden virtauksesta ja tekee tehosäädön lämpötilaeron avulla. Täten liian lämpimän veden palaaminen lämpöpumpuille aiheuttaa tehon laskemisen, vaikka todellisuudessa aluelämpöverkossa olisikin lämpökuormaa. Laitosta optimoidessa havaittiin, että veden kierrätyksen vähentämisellä lämpötilavaihtelut tasoittuivat, joka vaikutti positiivisesti COP-arvoon.

Lämpimämmällä säällä kiinteistöjen aluelämpöveden ja kaukolämpöveden suhdetta ohjaava lämpötilakäyrä sallii aluelämpöverkon vedelle viileämmän lämpötilan ilman, että se alkaa ottamaan lämpöä kaukolämpöverkosta. Sään lämmitessä yli nollan celsiusasteen lämpöpumput syöttivät toisinaan alle 40 °C aluelämpöä, koska niiden kapasiteetti ei riittänyt lämmittämään vettä 45 °C vakiovirtauksella. Lämpimällä säällä aluelämpöveden lämpötilan muutos kiinteistön lämmönvaihtimilla on suurempi matalamman lämpötilavaatimuksen takia. Täten kiinteistöt hyödyntävät matalammankin lämpötilan tehokkaasti, joka puolestaan nostaa lämpöpumppujen tehon tarvetta. Kyseinen tilanne on hyötysuhteen kannalta kaikkein otollisin, koska lämpöpumput pystyvät käymään täydellä teholla ja samalla tuottamaan varsin matalalämpöistä aluelämpövettä. Yli nollan celsiusasteen lämpötilassa sulatuksen tarve on vähäinen tai sitä ei ole ollenkaan, mikä nostaa osaltaan myös lämpöpumppujen hyötysuhdetta.

Vialliset kylmäaineet

Käyttöönoton jälkeen yksi kylmäainepiiri antoi useasti kylmäainepiirin lämpötilaan liittyviä hälytyksiä. Hälytykset johtuivat kylmäainepiirin lämpötilan noususta. Lämpötilan nousemisen syyksi epäiltiin liian suurta määrää kylmäainetta tai huonoa tyhjiöintiä. Kylmäaineen määrän vähentäminen ei ratkaissut ongelmaa, joten piirin kylmäaine vaihdettiin ja vanha kylmäaine analysointiin. Kylmäaineesta löytyi merkittävä määrä typpeä, mikä viittaa puutteelliseen tyhjiöintiin. Kylmäaineen vaihtamista vaikeutti kovat pakkaset, koska kylmäaine on haastavaa poistaa kylmästä putkistosta. Myöhemmässä vaiheessa selvisi, että myös muissa kylmäainepiireissä oli ongelmia, joten kaikkien kylmäainepiirien kylmäaineet

vaihdettiin. Typpi ei reagoi kylmäaineen tavoin lämpötilan muutoksissa, jolloin se kuluttaa lauhduttimessa lauhduspinta-alaa. Tällöin lämmön siirto lauhduttimessa häiriintyy ja lämpö ei pääse poistumaan tehokkaasti kylmäaineesta lauhduttimessa, mikä aiheuttaa kylmäainepiirissä paineen ja lämpötilan nousemisen. Kylmäaineen lämpötilan nousu puolestaan aiheuttaa lämpötilahälytyksen ja kyseisen kylmäainepiirin pysäyttämisen.

Kylmän sään aiheuttamat ongelmat

Laitoksen käyttöönoton aikana oli kova pakkasjakso, jonka aikana lämpötilat laskivat kylmimmillään -25 °C asteeseen. Pakkasjakson aikana useimmat lämpöpumppujen tyhjennysventtiilit jäätyivät. Jäätymisen vuoksi on tärkeää huolehtia, että kaikki tyhjennysventtiilit ja varoventtiilit ovat saattolämmitettyjä ja ulkoilmassa olevissa putkisto-osuuksissa ei ole saattolämmittämättömiä osuuksia. Aalto Worksin laitteisto on suunniteltu siten, että ilmalämpöpumppujen tulisi toimia vesi-vesilämpöpumppuina kaikissa lämpötiloissa.

Ennen takuukokeita suoritettussa testissä koitettiin tuottaa aluejäähdytystä kovalla pakkasella yhteen kiinteistöistä, jonka viilennystarve on ulkolämpötilasta riippumatta n. 200 kW. Testiä suorittaessa laitoksen oma viilennysjärjestelmä ajettiin hallitusti alas ja korvattiin kaukokylmällä. Testin alkupuolella jäähdytys toimi kiinteistön puolella hyvin. Kaukokylmäverkossa on suuri inertia matalan virtausnopeuden ja suuren tilavuuden vuoksi. Lämmennyt kaukokylmä saavutti lämpöpumput noin 20-30 minuutin viiveellä. Testissä havaittiin, että kylmätuotannolle oli asetettu virheellisesti pakkasraja, jonka vuoksi kylmätuotanto ei käynnistynyt tarpeesta huolimatta. Ongelma saatiin kuitenkin ratkaistua helposti logiikkamuutoksilla.

Kylmällä säällä on mahdollista, että vesi-vesilämpöpumppuprosessin aikana puhaltimet pysähtyvät, koska niiden ei tarvitse siirtää ilmaa lamellipatterien lävitse. Käyttöönoton aikana yksittäisen piirin puhaltimet pysähtyivät vesi-vesi -ajon vuoksi ja jäätyivät paikalleen. Jäätyminen aiheuttaa lämpöpumpuille hälytyksen, joka pysäyttää häiriöön liittyvien puhaltimien kylmäainepiirin toiminnan. Puhaltimet tulee tästä syystä ohjelmoida siten, että ne pyörivät hitaalla nopeudella, vaikka niitä ei tarvittaisikaan lämmöntuotannossa.

6.3 Takuukokeet

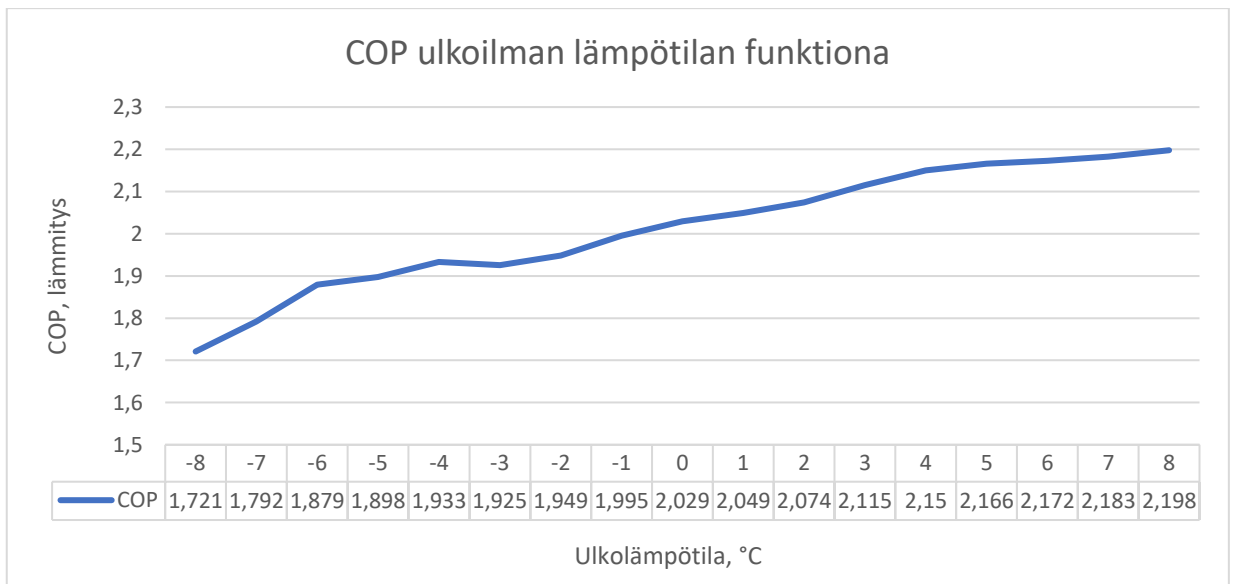
Takuukokeiden tarkoituksena on todentaa, että hankitut laitteet täyttävät hankintasopimuksessa määritetyt kriteerit. Seurattavat parametrit lämpöpumpuille kohdentuvat vahvasti COP-arvoon, lähtevän ja palaavan veden lämpötilaan, tuotettuun lämpöenergiaan ja kulutettuun sähköenergiaan. Ilma-vesilämpöpumppujen tehokkain ajotapa on samanaikainen jäädytys ja lämmitys, mutta niitä voidaan tuottaa myös yksittäin. Lämmityksen ja kylmän samanaikainen tuotanto on tehokkain ajotapa, koska palaavasta kaukokylmästä saadaan otettua lämpöenergia talteen lämpöpumpulla. Lämpöpumppuprosessi on tehokkaampi vesi-vesi -käytössä, kuin ilma-vesi -käytössä. Lisäksi alhaisissa lämpötiloissa ilma-vesilämpöpumppu joutuu sulattamaan höyrystimiä säännöllisesti, jolloin prosessin tehokkuus laskee. Kylmän ja lämmön tarve poikkeavat kuitenkin toisistaan, jolloin lämpöpumppuja täytyy käyttää ilma-vesi ja vesi-vesi -yhdistelminä. Aalto Worksin sopimuksessa on määritetty takuukokeet tehtäväksi myös alhaisten lämpötilojen aikana kylmätuotantoa käyttäen, mikä parantaa laskettua hyötysuhdetta. Vermon sopimuksessa takuukokeille ei ole määritetty erikseen ajotapoja, joten kylmäkuormaa ei tarvita takuukokeita varten.

6.3.1 Vermon takuukokeet

Vermon takuukokeissa seurataan COP-arvoa eri ulkoilman lämpötiloissa. Hankintasopimuksessa on määritetty mittaolosuhteet takuuarvoille, jotka ovat ulkoilman suhteellinen kosteus, laitoksen lämpöteho, kaukolämpöverkkoon menevä ja palaava lämpötila. Takuuarvot on määritetty ulkolämpötilan mukaan -10 celsiusasteesta 20 celsiusasteeseen. Olosuhteet vaihtelevat kokeiden aikana eivätkä ole täysin takuukokeiden takuuarvoissa asetettujen olosuhteiden mukaiset. Olosuhteiden vaikutusta laitoksen hyötysuhteeseen arvioidaan valmistajan toimittamien korjauskäyrien mukaisesti. Korjauskäyrien käyttäminen kuitenkin vaatii sen, että olosuhteet ovat lähellä takuupisteissä asetettuja arvoja. Lisäksi takuuarvoissa on määritetty sulatuksen käyttämä maksimilämpöteho.

Vermon kaikkia takuukokeita ei pystytty tekemään talven 2020-2021 aikana, koska laitoksen rakentaminen, käyttöönotto ja säätöjen tekeminen kestivät odotettua kauemmin. Takuukokeita joudutaan jatkamaan vuoden 2021 aikana. Fortumin uudet ilma-vesilämpöpumput ovat pilottilaitoksia, joten takuukokeita tärkeämpää on kartuttaa kokemusta ja kerätä dataa

laitosten toimivuudesta. Lämpöpumput olivat kuitenkin toiminnassa talvella 2020-2021 pidempiä jaksoja kylmilläkin säällä, joten käyttötietoa saatiin kerättyä varsin paljon laitoksen käytöstä erilaisissa olosuhteissa. Alla olevassa kuvassa 28 on esitetty laitoksen COP-arvo ulkolämpötilan funktiona. Datana laskennassa on käytetty kolmen viikon pituista ajanjaksoa maaliskuu-huhtikuun aikana. Kuvaajassa on otettu huomioon todellinen hyötysuhde siten, että myös sulatukseen tarvittava energia on laskennassa mukana. Kyseinen data ei ole verrattavissa takuuarvoihin, koska olosuhteet ovat vaihdelleet huomattavasti. Kuvaaja antaa kuitenkin suuntaviivat laitoksen hyötysuhteesta todellisissa tilanteissa. On todennäköistä, että laitoksen käyttöä voidaan vielä optimoida ja hyötysuhdetta parantaa pidempiaikaisten käyttökokemusten perusteella.



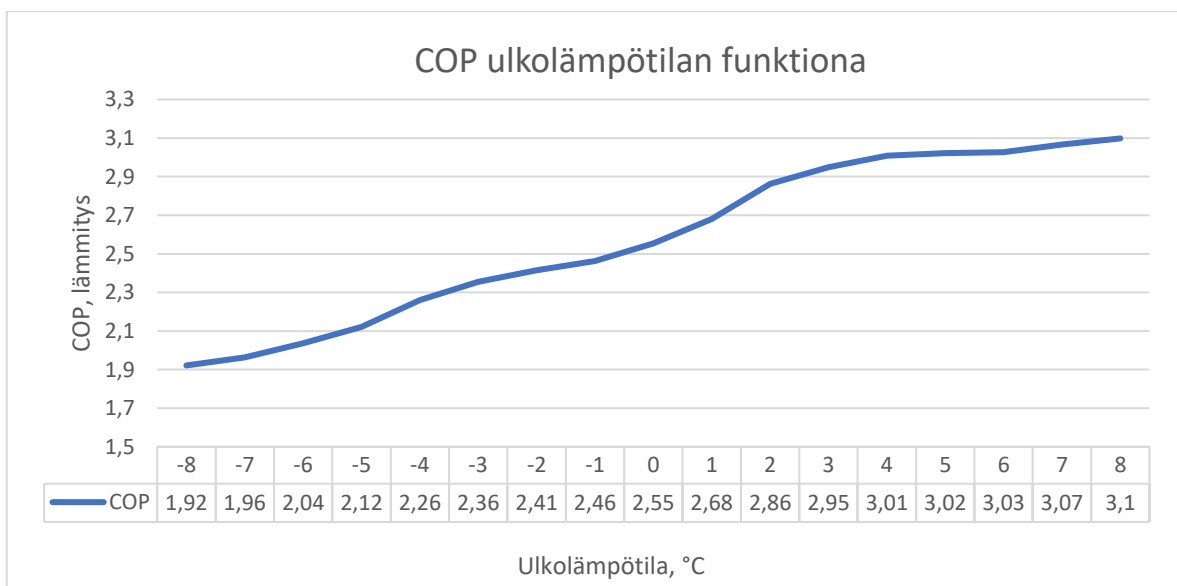
Kuva 28. Vermon laitoksen COP-arvo ulkolämpötilan funktiona kolmen viikon ajanjaksolta maaliskuu-huhtikuun aikana 2021

6.3.2 Aalto Worksin takuukokeet

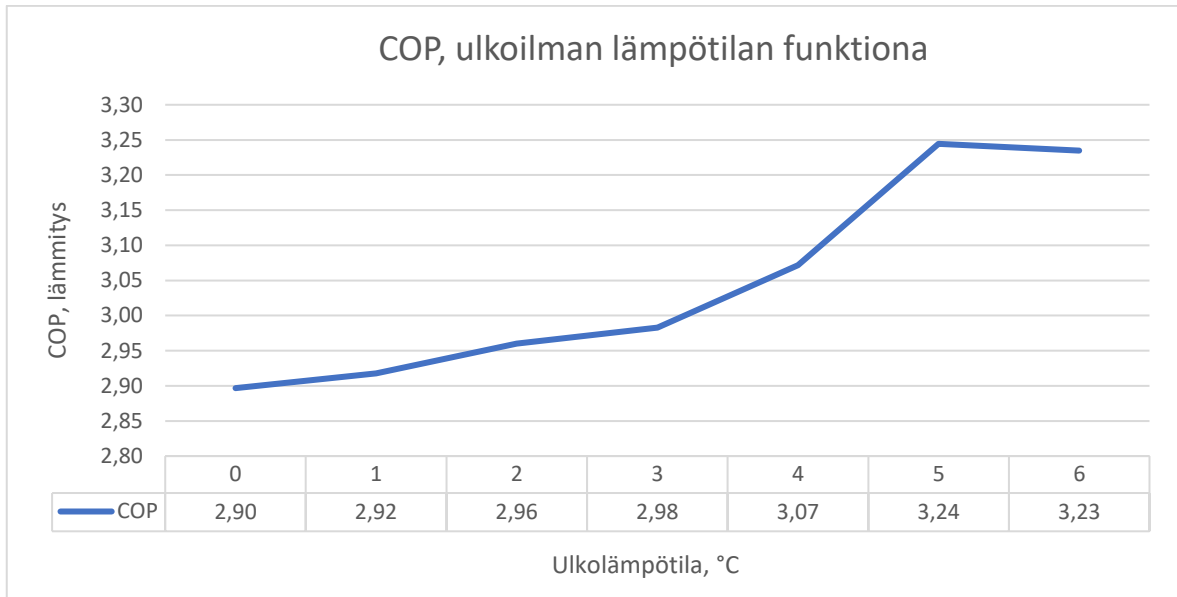
Lämpöpumppujen suorituskykyä arvioidaan takuukokeiden aikana ennalta määrättyjen arviointikriteerien mukaisesti vastaavasti, kuin Vermon takuukokeissa. Arviointikriteereissä vertailevana arvona käytetään ensisijaisesti lämpöpumppujen COP-arvoa eri ulkoilman lämpötiloissa, mutta sopimuksessa on määritelty viiterajat myös ulkoilman suhteelliselle kosteudelle, jäähdytysteholle, aluelämmityksen ja aluejäähdytyksen lähtevän ja palaavan veden lämpötiloille ja vuorokauden lämmitys- ja sähköenergialle. Seurattaviksi mitoituspisteiksi on asetettu ulkolämpötilat: 30 °C, 7 °C, 0 °C ja -7 °C. Mittausjaksoilta seurataan neljän tunnin liukuvaa keskiarvoa. Kyseiset neljän tunnin keskiarvot hyväksytään, jos ulkolämpötila on vähintään vertailulämpötila ja maksimissaan kolme astetta vertailulämpötilaa suurempi. Takuukokeiden ajotapana on yhdistetty kylmän- ja lämmöntuotanto. Hankintasopimuksessa kylmäkuormaksi on sovittu 200 kW, joka mahdollistaa osittaisen vesi-vesi -ajon. 200 kW jäähdytystehon täytyminen on täten tärkeää, koska se vaikuttaa suoraan laitoksen hyötysuhteeseen ja sulatusjaksojen määrään. Lämpöpumppujen sisäisiä kiertopumppuja ei huomioida COP-laskennassa, mutta sulatuksen vaikutus hyötysuhteeseen näkyy mittaustuloksissa. Kiertopumppujen yhteenlaskettu sähköteho on noin 10 kW, jonka vähentäminen sähkötehosta COP-laskentaa tehtäessä -7 °C mitoituspisteessä on noin 7 % ja 0 celsiusasteen mitoituspisteessä noin 5 %. Kiertopumppujen tehon merkitys COP:n laskennassa kasvaa tehon laskiessa, koska kiertopumppuja ajetaan vakioteholla tilanteesta riippumatta.

Aalto Worksin takuukokeet viivästyivät Vermon takuukokeiden tapaisesti laitoksen ongelmien korjaamisen ja optimoinnin vuoksi. Viivästyisestä johtuen lopulliset takuukokeet kylmällä säällä ajetaan vasta tulevana syksynä. Laitoksen optimoinnista, ongelmista ja suorituskyvystä saatiin kuitenkin kerättyä paljon tietoa kylmälläkin säällä, joten pilotoinnin onnistumisen kannalta takuukokeiden siirtäminen ei aiheuta suuria ongelmia. Tulokset kolmen viikon ajanjaksolta maaliskuussa on esitetty kuvassa 29. Kuvaajan arvot eivät ole vertailtavissa takuukokeiden vaatimuksiin, koska pitkän ajan suorituskyvyn seurannassa olosuhteet muuttuvat jatkuvasti. Lisäksi kyseessä on pilottilaitos, joten sen kehitystyö on vielä meneillään ja täten hyötysuhteet tulevat kehittymään lähitulevaisuudessa käyttökokemusten kertyessä. Sään lämpenemisen vuoksi laitoksen toiminnasta alhaisissa lämpötiloissa ei ole saatavissa dataa viimeisten optimointien jälkeen. COP-arvo kasvaa nopeasti ulkolämpötilan ylittäessä nollan celsiusasteen, koska sulatuksen tarve vähenee nopeasti ja lopulta sulatusta

ei tarvita lainkaan. Kylmällä säällä huonon hyötysuhteen aiheuttaa sulatusjaksot ja viileässä ilmassa oleva matala energiamäärä. Kuvaajasta voidaan huomata, että COP-arvo on -8 °C lämpötilassa noin 1,92, nollan celsiusasteen lämpötilassa 2,55 ja 8 °C lämpötilassa noin 3,1. Kyseisen kuvaajan luonnin ajanhetkellä COP-arvo nousi optimitilanteessa nollan celsiusasteen lämpötilassa lähes kolmeen, mutta vaihtelevien olosuhteiden vuoksi COP-arvossa voidaan nähdä suuria vaihteluita. Toisaalta huhtikuun 2021 lopussa kylmäkuorman osuus tuotannosta kasvoi, jonka vuoksi $0\text{--}3$ celsiusasteen ulkolämpötilassa saatiin yli 3,15 COP-arvoja. Kyseisissä tilanteissa kylmäkuorma on ollut noin 200 kW, joka vaikuttaa positiivisesti hyötysuhteeseen. Kuvassa 30 on esitetty COP-käyrä huhtikuun aikana, josta voidaan havaita kasvaneen kylmäkuorman ja optimoinnin suuri vaikutus laitoksen hyötysuhteisiin. Kuvaajia vertailemalla voidaan havaita, että suurin parannus on saavutettu varsinkin lähellä nollaa astetta. Hyötysuhteet tulevat vielä kehittymään laitoksen viimeisimpien optimointien myötä varsinkin kylmällä säällä. Tässä esitettyjen alustavien tulosten perusteella voidaan kuitenkin todeta, että lämmön ja kylmän tuotannon yhdistäminen lämpöpumpuilla on erittäin energia-
tehokasta.



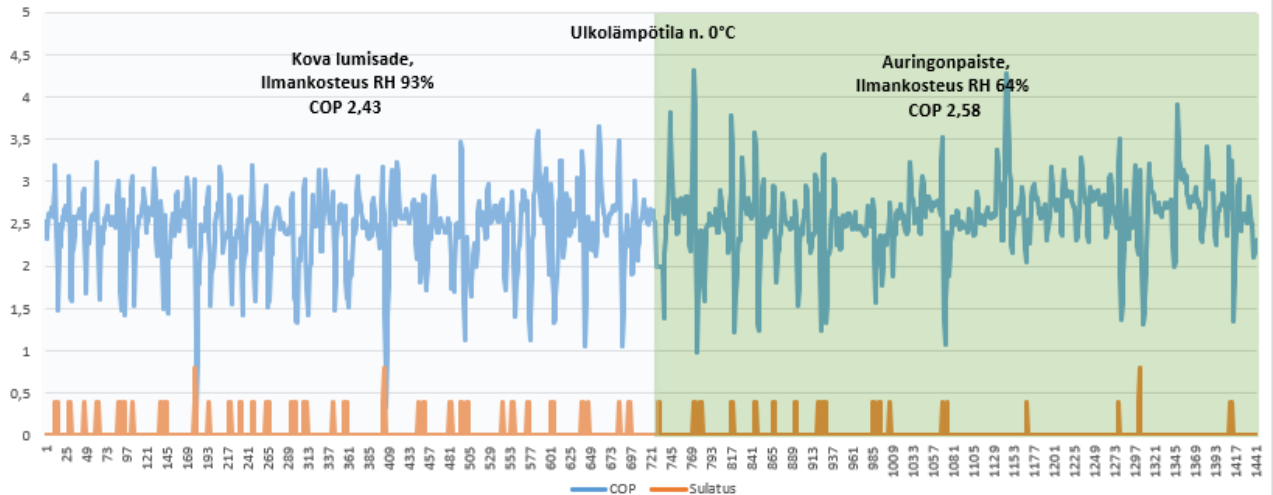
Kuva 29. Aalto Worksin COP-arvo ulkolämpötilan funktiona kolmen viikon ajanjaksolta maaliskuun huhtikuun aikana 2021



Kuva 30. Aalto Worksin COP-arvo ulkolämpötilan funktiona huhti-toukokuun aikana 2021

6.4 Laitosten tehokkuus

Ilma-vesilämpöpumppujen hyötysuhteeseen vaikuttaa moni asia, kuten ulkolämpötila ja il-mankosteus sekä kaukolämpöveden palaavat ja lähtevät lämpötilat. Lisäksi sulatusjaksojen optimoinnilla on suuri merkitys hyötysuhteen kannalta. Alla olevassa kuvassa 31 on havain-nollistettu olosuhteiden ja sulatusjaksojen optimoinnin vaikutus hyötysuhteeseen Aalto Worksin lämpöpumpuilla. Kuvaajassa sininen viiva kuvastaa COP-arvoa ja sen alla olevat oranssit palkit sulatusjaksoja. Kuvan vasemmalla laidalla olevalla sinisellä alueella on ollut kova lumisade ja suhteellinen ilmankosteus on ollut yli 90 %. Oikealla puolella kuvaajaa suhteellinen ilmankosteus on laskenut noin 64 prosenttiin ja aurinko on paistanut. Ilmankos-teuden laskiessa sulatusjaksojen tiheys on vähentynyt huomattavasti, joka näkyy myös jär-jestelmän hyötysuhteessa. Ulkolämpötila on pysynyt noin nollassa asteessa. Toisaalta kor-keampi ilmankosteus tehostaa lämmönsiirtoa lämmönkeräimillä, koska ilman entalpia on suurempi. Tästä johtuen ilmankosteudella on positiivinen vaikutus hyötysuhteeseen ja eten-kin lämmönkeräimien kapasiteettiin lämpimällä säällä, jolloin jäätä ei muodostu. Sulatuksen vaikutus hyötysuhteeseen riippuu ulkolämpötilasta ja ilmankosteudesta. Saatujen mittaustu-lostien pohjalta voidaan karkeasti sanoa sulatuksen laskevan hyötysuhdetta 10-15 % lämpö-tilan ollessa lähellä nollassa astetta.



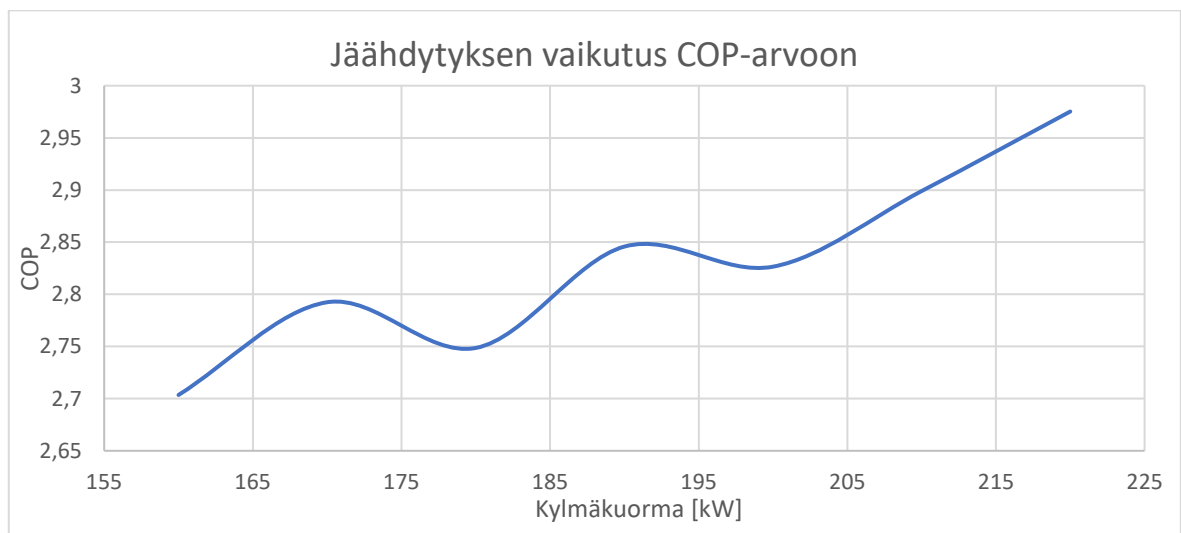
Kuva 31. Ilmankosteuden vaikutus hyötysuhteeseen

Toisaalta Aalto Worksin hyötysuhteeseen merkittävin vaikutus tulee kylmäkuormasta. Alla olevassa taulukossa 2 on esitetty COP-arvoja hieman alle 200 kW kylmäkuormalla nollan asteen ulkolämpötilassa vaihtelevalla lämpökuormalla. Suhteellinen kosteus kaikissa tilanteissa on noin 90 %. Tuloksista voidaan huomata, että hyötysuhde on suurimmillaan tilanteessa 2. Kyseisessä tilanteessa ainoastaan toinen lämpöpumppu on ollut käytössä käyden täydellä kuormalla. Tavoitelämpötila tilanteessa on ollut lähtevällä vedellä 45 celsiusastetta, mutta sitä ei ole saavutettu, koska koneen kapasiteetti ei ole riittänyt nostamaan lämpötilaa kuin n. 39 celsiusasteeseen. Lämpötilan laskemisella ei sinällään ole merkitystä, jos kiinteistöt saavat hyödynnettyä verkoston lämmön. Matalamman kaukolämpöveden tuottaminen on tehokkaampaa ja täten lämpötilan optimointi onkin tärkeää lämpöpumppujen toiminnan kannalta. Mittaustuloksien pohjalta havaittiin, että yhden asteen muutos lähtevän veden lämpötilassa vaikuttaa COP-arvoon noin 1-2 %. Tilanteessa kylmäkuorma on ollut 179 kW ja kokonaislämpökuorma pieni, koska vain toinen koneista on ollut käytössä. Tästä syystä kylmäkuorman määrä suhteessa lämmöntuotantoon on normaalia tilannetta suurempi ja täten merkittävämpi osuus tuotannosta saadaan tehtyä vesi-vesilämpöpumppuprosessilla. Täten pienen tuotantomäärän aiheuttama kylmäkuorman ja lämmöntuotannon suhde sekä lähtevän veden matala lämpötila nostavat COP-arvoa huomattavasti. Tilanteen 1 ja 3 suurin ero on lähtevän veden lämpötilassa ja ero lämmöntuotannon määrässä, joiden avulla voidaan selittää eroavaisuudet hyötysuhteissa.

Taulukko 2. Lämpöpumppujen toiminta eri tilanteissa

Tilanne:	1	2	3
Ulkolämpötila	0	0	0
Ilmankosteus, RH%	n. 90	n. 90	n. 90
Jäähdytysteho, kW	178,85	179,31	180,93
Lähtevän jäähdytysveden lämpötila, C	11,00	10,99	11,20
Palaavan jäähdytysveden lämpötila, C	7,69	7,92	8,07
Lämmitysenergia MWh/24	14,45	8,10	12,84
Lähtevän lämmitysveden lämpötila, C	48,03	38,78	45,12
Palaavan lämmitysveden lämpötila, C	34,22	33,48	32,54
Sähköenergia, MWh	5,64	2,72	4,58
Lämmityksen hyötösuhde, COP	2,56	2,98	2,80

Kuvassa 32 on esitetty Aalto Worksin COP-arvo kylmäkuorman funktiona. Mittausdata kuvaajassa on käytetty huhtikuun tunteja, jolloin ulkolämpötila on ollut 0 ja 2 celsiusasteen välillä ja lämmitysteho 450-550 kW. Kuvaajasta voimme havaita jo aiemmin todetun kylmäkuorman positiivisen vaikutuksen hyötysuhteeseen. Toisaalta on myös huomioitava, että lämpimässä ulkoilman lämpötilassa kylmäkuorman tarve on suurempi, sulatuksen tarve vähäisempi ja ilma-vesilämpöpumpun hyötösuhde parempi. Täten kahden asteen liukuma käsitellyssä mittausdatassa väärentää hieman kuvaajaa, jonka vuoksi todellinen kylmäkuorman vaikutus on hieman esitettyä pienempi.



Kuva 32. Kylmäkuorman vaikutus COP-arvoon

Aalto Worksin tarkoituksena on toimittaa lämpöä vain tietyille kiinteistölle ja alueverkon lämmöntuotannon omavaraisuus on tärkeässä roolissa. Omavaraisuuteen vaikuttaa tuotantokapasiteetin lisäksi kiinteistöjen kyky vastaanottaa lämpöä. Järjestelmän omavaraisuus on parhaimmillaan 0-10 celsiusasteen ulkolämpötilassa, koska silloin lämpöpumppujen kapasiteetti riittää täyttämään kiinteistöjen lämmöntarpeen lähes kokonaan. Tällöin omavaraisuus on noin 90 %, josta puuttuva osuus johtuu käyttöveden lämmittämisestä kaukolämmöllä. Sään lämmitessä omavaraisuus alkaa laskea, koska kiinteistöjen lämmitykselle ei ole tarvetta, mutta käyttövettä lämmitetään edelleen kaukolämmön avulla. Mittausdatan perusteella sään viiletessä alle nollan celsiusasteen aluelämpöverkon lämmöntuotannon omavaraisuus alkaa laskea, mutta siihen pystytään vaikuttamaan optimoimalla kiinteistöjen lämpötilakäyriä, jotta kiinteistöt vastaanottavat lämpöpumppujen tuottaman 45 celsiusasteisen lämmön. Toisaalta on myös tärkeää, että lämpöpumpuilla tuotetaan mahdollisimman tasalämpöistä vettä, jotta kiinteistöt pystyvät hyödyntämään sen. Kovimmilla pakkasilla lämpöpumppujen teho alkaa laskea ja kiinteistöjen lämmöntarve nousee nopeasti. Tällöin omavaraisuusaste laskee, koska järjestelmän kapasiteetti loppuu kesken.

Vermon ilma-vesilämpöpumppu on kytketty kaukolämpöverkkoon. Kaukolämpöverkon vesimäärä ja energiakapasiteetti on erittäin suuri ja merkittäviä hetkellisiä vaihteluita ei synny samalla tavalla kuin Aalto Worksin alueverkossa. Kaukolämpöverkoston palaavan veden lämpötila voi kuitenkin vaihdella pidemmällä aikavälillä. Merkittävimmät hyötysuhteeseen vaikuttavat muuttuvat tekijät ovat ilmakeuhuus, ulkolämpötila ja lämpöpumpuille palaavan kaukolämpöveden lämpötila. Hyötysuhteet Vermossa puolestaan ovat selvästi Aalto Worksia heikommat, koska kaukolämpöveden lämpötila nostetaan kaukolämpöverkon lämpötilaan eikä käytössä ole kylmäntuotannosta vapautuvaa lämpöä. Korkean verkostolämpötilan vuoksi lämpöpumpulta lähtevän veden lämpötilan nosto joudutaan tekemään useassa portaassa. Mittausajanjaksolla Vermon hyötysuhteessa ei havaittu suuria muutoksia johtuen järjestelmän toteutustavasta. Täten kappaleen 6.3.1 sisältö kuvastaa hyvin Vermon järjestelmän suorituskykyä.

6.5 Käytön tarkkailu, tarkastukset ja huolto

Ilma-vesilämpöpumppuja ei ole aiemmin hyödynnetty Suomessa laajassa mittakaavassa. Fortumin kaukolämpöverkossa on muutamia lämpöpumppuja, joiden ylläpidosta on saatu kokemuksia. Ilma-vesilämpöpumput kuitenkin poikkeavat aiemmin hyödynnetyistä vesi-vesilämpöpumpuista. Fortumin rakentamien pilottilaitosten suunniteltu käyttöikä on noin 20 vuotta.

Pilottilaitosten käyttöönotto on edellyttänyt varsin suurta työmäärä sekä laitosten toimittajilta että tilaajalta. Ratkaistavat kysymykset ovat liittyneet lämpöpumppujen ja niihin liittyvien laitteistojen toimintaan, mutta myös pumppujen toimintaan osana kaukolämpö- ja kaukokylmäverkkoja. Oletettavaa on, että pilottilaitoksista saatujen kokemusten ansiosta mahdollisesti myöhemmin asennettavien ilma-vesilämpöpumppujen käyttöönotto sujuu vaivattomammin. Oleellista on, että kaukolämpölaitoksen käytöstä vastaavat henkilöt ovat alusta asti kiinteässä yhteistyössä laitosten toimittamisesta ja rakentamisesta vastaavien henkilöiden kanssa, jotta lämpöpumppujen käyttö saadaan käytännön tasolla integroitua mahdollisimman tehokkaaksi osaksi lämmöntuotantoa. Lämpöpumppujen ja verkoston toiminnan yhteensopivuus ja käytön optimoiminen osoittautui koeajojen aikana niin ratkaisevaksi, että ne saattavat ratkaista lämpöpumpuista saatavan hyödyn. Hyvin toimiessaan ilma-vesilämpöpumput ovat tehokkaita, eikä niiden käyttö edellytä jatkuvaa käyttöhenkilökunnan huomiota.

Ilma-vesilämpöpumppujen huollon ja käytön resurssitarve selviää vasta käyttökokemusten saamisen myötä. Käytönaikaisia kustannuksia voidaan vähentää sijoittamalla lämpöpumput kohteisiin, joissa on muutenkin kaukolämpölaitoksen toimintoja ja käyttöhenkilökunta on lähellä. Tällöin laitosten silmämääräiset tarkastukset, toiminnan tarkkailu ja esimerkiksi varotoimenpiteenä tapahtuneet lämpöpumppujen uudelleenkäynnistykset voidaan tehdä kustannustehokkaasti. Kattavalla lämpöpumppujen toiminnan automaattisella seurannalla ja oikein asetetuilla hälytysrajoilla voidaan varmistaa korkean kokonaishyötysuhteen säilyminen tuotannossa. Automaattisesti tehtävän tiedonkeruun perusteella laitosten käyttöä tulee kehittää ja optimoida viimeistään sen jälkeen, kun tietoa on kertynyt koko vuoden kierron ajalta erilaisista sääolosuhteista.

Ilma-vesilämpöpumppujen lamellit ja puhaltimet täytyy puhdistaa niiden likaantuessa. Lisäksi puhaltimien toiminta on hyvä tarkastaa säännöllisin väliajoin. Aalto Worksissa käytetään HFC-kylmäainetta, joten kylmäaineiden vuototarkastus tulee tehdä vuoden välein. Tarpeelliset puhdistus- ja huoltotoimenpiteet on hyvä tehdä samalla. Lisäksi levylämmönvaihtimet tulee puhdistaa, mutta niiden puhdistamisen voi toteuttaa muita toimenpiteitä harvemmin. Normaalina rutiinitarkastuksena on hyvä tarkastaa kompressorit öljyvuotojen varalta ja samalla seurata äänitasoja. Käyttöhenkilökuntaa varten olisi hyvä laatia tarkastuslistat, joihin kirjattaisiin tarkastettavat kohteet, kirjattavat havainnot ja aikataulut sekä toimintaohjeet erilaisten ongelmien varalta.

Lämpöpumppujen tarkastusten ja puhdistusten lisäksi oheislaitteiden huolto on suoritettava valmistajien ohjeiden mukaisesti. Näihin laitteisiin kuuluu mm. pumput ja taajuusmuuttajat. Rutiininomaiset tarkastukset voidaan toteuttaa käyttöhenkilökunnan toimesta. Ilma-vesilämpöpumppujen käyttöä ja huoltoa on koulutettava käyttöhenkilökunnalle. Lämpöpumppujen ohjaaminen itsessään on pyritty tekemään mahdollisimman helpoksi ja muutettavana asetusarvona on vain halutut lähtevän veden lämpötilat. Koulutus molempien uusien laitosten osalta annetaan käyttöhenkilökunnalle useammassa osassa. Ensimmäisessä osassa esitellään laitoksen pääkomponentit ja käyttöperiaatteet. Toisessa osiossa käyttöhenkilökunnalle koulutetaan laitoksen käyttöä. Käyttö on itsessään hyvin yksinkertaista, koska laitokset on automatisoitu lähes täysin. Suurimmat haasteet tulevat ongelmatilanteissa, jotka vaativat toimenpiteitä paikan päällä. Laitoksissa on paljon laitteita, joita ei olla hyödynnetty ennestään Fortumin lämmöntuotannossa. Kylmäainepiireihin liittyvät viat on selvitettävä ulkoisen kylmälaitteisiin koulutetun toimijan avustuksella.

Pilottilaitoksien toimittajat ovat asettaneet laitoksille huoltosuosituksia. Huoltosuositusten sisällöt ja huoltotiheydet vaihtelevat laitoksien välillä huomattavasti. Eroavaisuudet huoltosuosituksissa voidaan osittain selittää komponenttien ja toteutustapojen eroavaisuuksilla. Osasyynä suurille eroille on kuitenkin teknologian uutuus, jonka vuoksi vastaavien laitosten käytöstä ei olla saatu aiempaa kokemusta, jonka pohjalta huoltosuositukset voidaan määrittää. Muutamia keskeisiä laitosten toimittajien esittämiä Aalto Worksin ja Vermon pilottilaitosten tarkkailu- ja huoltovälisuosituksia on vertailtu taulukossa 3.

Taulukko 3. Esimerkkejä Aalto Worksin ja Vermon pilottilaitosten tarkkailu- ja huoltovälisuosituksista

Toimenpide	Aalto Works	Vermo
Kompressorien öljynvaihto	-	Vaihtelee komperssori- peittäin
Kompressorien öljyvuotojen visuaalinen tarkastus	1 kuukausi	1 viikko
Kylmäaineen määrän tarkastus	1 kuukausi	1 vuosi
Puhaltimien kunnan ja puhtauden visuaalinen tarkastus	1 vuosi	1 kuukausi
Puhaltimien puhdistus	1 vuosi	tarvittaessa (tai 1 vuosi)
Ulkolamellien visuaalinen tarkastus	-	1 viikko
Ulkolamellien pesu ja roskien poisto	1 vuosi	tarvittaessa
Yksikön äänitason tarkkailu	4 kuukautta	1 vuosi

F-kaasua sisältävän laitteen omistajan velvollisuutena on huolehtia laitteen asennuksen, huollon ja tarkastuksen suorittavan henkilön pätevyydestä. Laitteen omistajan täytyy huolehtia, että vuototarkastukset tehdään ajallaan ja sen tulee ylläpitää huolto- ja tarkastuspöytäkirjaa. Hermeettisesti suljettuja alle 10 t CO₂ ekvivalenttia sisältäviä F-kaasua sisältävillä kylmäkoneilla ei ole lakisääteistä tarkastusvelvoitetta. (Ympäristö, 2021)

Kylmäaineiden GWP-arvo ja kylmäaineen määrä määrittää kylmäkoneiden tarkastusvälit F-kaasuja käyttäville laitteille. Tarkastusvälejä voidaan lyhentää hyödyntämällä vuodonilmaisinta. Tarkastusväli laitteille, joiden kylmäaineen määrä vuotaessaan aiheuttaa 5-50 t CO₂-ekvivalenttimäärän päästöjä on vuosi tai vuodonilmaisimella varustetuille järjestelmille kaksi vuotta. Vastaavasti 50-500 t CO₂-ekvivalenttimäärän aiheuttaville järjestelmille tarkastusväli on 6 kuukautta ja vuodonilmaisimella varustetuille järjestelmille 12 kuukautta. Suurin luokka on 500 t CO₂-ekvivalenttipäästöistä ylöspäin, jolloin tarkastusväli on 3 kuukautta tai vuodonilmaisimella varustetuissa järjestelmissä 6 kuukautta. Vuodonilmaisimella on asetettu pakolliseksi suurimman luokan järjestelmissä vuoden 2017 alusta alkaen. Taulukossa 4 on esitetty eri kylmäaineiden määriä vastaavat tarkastusvälit. (Ympäristö, 2014)

Taulukko 4. Fluorattujen kasvihuonekaasuja hyödyntävien kylmälaitteiden tarkastusvälit eri kylmäaineilla ja määrillä (Ympäristö, 2014)

Kylmäaine	GWP	5 t CO ₂ -ekv (kg), tarkastusväli 12 kk (vuodonilmaisimella 24 kk)	50 t CO ₂ -ekv (kg) tarkastusväli 6 kk (vuodonilmaisimella 12 kk)	500 t CO ₂ -ekv (kg) (tarkastusväli 3 kk) vuodonilmaisin pakollinen -> tarkastusväli 6 kk
R-23	14 800	0,34	3,37	33,78
R-32	675	7,41	74,07	740,74
R-134a	1 430	3,50	34,96	349,65
R-245fa	1 030	4,85	48,54	485,44
R-404A	3 922	1,27	12,75	127,49
R-407C	1 774	2,82	28,18	281,85
R-407F	1 825	2,74	27,40	273,97
R-410A	2 088	2,39	23,95	239,46
R-417A	2 346	2,13	21,31	213,13
R-422A	3 143	1,59	15,91	159,08
R-422D	2 729	1,83	18,32	183,22
R-426A	1 508	3,32	33,16	331,56
R-437A	1 805	2,77	27,70	277,01
R-507	3 985	1,25	12,55	125,47

7 Johtopäätökset

Ilma-vesilämpöpumppuja hyödynnetään jo nykyisin laajasti kiinteistöjen lämmittämiseen ja jäähdyttämiseen, mutta suurista kaukolämpöverkkoon kytketystä ilma-vesilämpöpumpuista on Suomessa vain vähän kokemuksia. Tästä syystä Fortumin Espoon kaukolämpöverkkoon kytketyistä pilottilaitoksista saatavat kokemukset ovat erityisen tärkeitä. Ilma-vesilämpöpumppujen hyödyntäminen Suomessa on huomattavasti haastavampaa kuin lämpimissä maissa, koska ilma-vesilämpöpumppujen lämmönkeräimiä täytyy sulattaa alhaisissa lämpötiloissa, kylmästä ilmasta saadaan vähemmän energiaa ja kaikkein kylmimmissä tilanteissa laitteita ei voida hyödyntää lainkaan.

Fortum aloitti vuonna 2020 kaksi ilma-vesilämpöpumppupilottiprojektia, jotka valmistuivat alkuvuonna 2021. Ilma-vesilämpöpumput rakennettiin Vermoon ja Otaniemeen. Laitokset ovat hyvin erilaisia keskenään. Vermon laitoksella tuotetaan korkealämpöistä kaukolämpöä kaukolämpöverkkoon ja siitä syystä lämmönnosto tehdään lämpöpumpuilla kahdessa portaassa. Aalto Worksissa lämpöä tuotetaan pieneen aluelämpöverkkoon yhdessä lämpöpumpuportaassa, jonka tavoitelämpötila on 45 celsiusastetta. Vermon lämpöpumppu on nestehöyrysteinen, eli lämmönkeräimissä kiertää neste, jonka energia siirretään erillisessä höyrytimessä kylmäaineeseen. Aalto Works on ilmahöyrysteinen laitos, eli kylmäaine kiertää ulkoilmassa olevissa höyrytimissä.

Tässä diplomityössä esitetyt pilottilaitoksista saadut tulokset ovat alustavia ja lopulliset tulokset saadaan vasta kun laitosten käytöstä on pidempiaikaista kokemusta ja saatujen kokemusten perusteella niiden käyttö on optimoitu. Laitosten hyötysuhteita vertaillen voidaan huomata, että Aalto Worksin COP-arvo on huomattavasti suurempi, kuin Vermossa. Tämä johtuu pääosin Aalto Worksin matalasta tavoitelämpötilasta, joka saavutetaan yhdessä lämpöpumppuportaassa. Aalto Worksin etuna on myös jatkuva kylmäkuorma, joka vaikuttaa positiivisesti hyötysuhteeseen. Lisäksi ilmahöyrysteinen järjestelmä on hieman tehokkaampi, kuin nestehöyrysteinen. Tämä johtuu nestehöyrysteisen järjestelmän suuremmista häviöistä ja sähkönkulutuksesta. Ilmahöyrysteisen järjestelmän haittapuolena on suurempi kylmäainemäärä, joka vuotaessaan voi aiheuttaa erinäisiä ongelmia riippuen käytettävän kylmäaineen GWP-arvosta, ODP-arvosta, myrkyllisyydestä ja syttyvyydestä. Ilmahöyrysteisessä järjestelmässä lämmönkeräinkenttä saadaan puolestaan rakennettua hieman

pienemmäksi. Tulevaisuudessa kaukolämpöverkon lämpötilan laskulla voitaisiin parantaa tuotannon tehokkuutta. Lämpötilan laskeminen olisi kuitenkin erittäin haastavaa ja kallista, koska kaukolämpöverkkoon kuuluvat laitteet, tuotanto ja kiinteistöjen lämmönvaihtimet on suunniteltu korkealle lämpötilalle. Lämpötilan nostaminen ilmavesilämpöpumpulla yhdessä portaassa kaukolämpöverkon lämpötilaan on teoriassa mahdollista sopivalla kylmäaineella, mutta käytännön tasolla se on mahdollista vain lämpimällä säällä. Tämä johtuu kompressorien maksimipainesuhteesta (Sweco, 2019).

Aalto Worksin lämpöpumppu on kokonaisuudessaan tehdasvalmisteinen järjestelmä. Vermon laitos on puolestaan räätälöity laitos, joka on rakennettu eri toimittajien valmistamista pääkomponenteista. Myös pumppujen ohjaus toteutetaan erillisessä pääautomaatiossa. Näistä syistä Vermon laitoksen optimointi on helpompaa, koska tilaaja pääsee suoraan käsiksi laitoksen automaatioon ja voi tehdä haluamansa muutokset tarpeiden mukaan. Tehdasvalmisteisen koneen optimointi on valmistajan automaation takana, joten muutoksien tekeminen vaatii toimittajan osallistumisen. Toisaalta tehdasvalmisteisissa koneissa valmistajalla on mahdollisuus kehittää koneen toimintaa jatkuvasti ja täten laitoksen optimointia on voitu miettiä ja testata ennen laitoksen käyttöönottoa.

Aalto Works on liitetty aluelämpöverkkoon, joka on rakennettu kyseisen projektin yhteydessä. Aluelämpöverkon epäpuhtaudet aiheuttivat verkon ja lämpöpumpun käyttöönottovaiheessa paljon ongelmia. Epäpuhtaudet jäivät pääsääntöisesti kiinteistöjen lianerottimiin, mikä aiheuttaa virtauksen häiriintymistä ja saatavilla olevan lämmitys- ja viilennyskapasiteetin laskemista. Suuren likamäärän vuoksi lianerottimet tukkeutuivat nopeasti ja verkoston puhdistaminen niiden kautta oli hyvin haastavaa. Orgaaninen aines alkoi myös hajota pienemmiksi partikkeleiksi, jolloin se kulkeutui lianerottimien läpi ja on mahdollisesti aiheuttanut lämmönvaihtimien likaantumista. Pienten partikkeleiden poistamiseksi aluelämpöverkosta vettä jouduttiin vaihtamaan suuria määriä. Edellä mainituista syistä tulevissa hankkeissa on tärkeää suojata verkostoa likaantumiselta rakentamisvaiheessa ja tehdä riittävät huuhtelut ennen aluelämpöverkon käyttöönottoa. Varsinaisessa kaukolämpöverkossa ongelma on pienempi, koska vesimäärät ovat paljon suurempia. Lämpöpumput kytketään kuitenkin usein pienempään jäähdytysverkostoon, jolloin vähintään jäähdytysverkoston puhtaus on varmistettava ennen käyttöönottoa.

Aluelämpöverkon lämpötilavaihtelut vaikeuttivat lämpöpumppujen käyttöä. Suuressa kaukolämpöverkossa ongelma on pienempi, koska suuren virtauksen ja energiamäärän vuoksi lämpötilavaihtelut ovat hitaita. Pienemmissä aluelämpöverkoissa lämpötilavaihtelut puolestaan korostuvat, varsinkin lämpöpumppujen sulatusjaksojen aikana. Lämpötilavaihtelut vaikuttavat suoraan lämpöpumppujen tehoon ja toisaalta aluelämpöverkkoon kytkettyjen kiinteistöjen kykyyn hyödyntää saatavaa lämpöä. Lämpötilavaihtelujen eliminoimiseksi lämpöpumppujen yhteyteen tulisi rakentaa riittävän suuri lämpöakkuna toimiva puskurisäiliö. Toisaalta lämpötila kannattaa optimoida mahdollisimman matalaksi, koska lähtevän veden lämpötila vaikuttaa suoraan hyötysuhteeseen. Aalto Worksin mittausdatan perusteella havaittiin, että yhden asteen ero lähtevän veden lämpötilassa vaikuttaa 1-2 % lämpöpumppujen hyötysuhteeseen.

Kylmä sää vaikuttaa merkittävästi lämpöpumpun toimintaan. Sään viiletessä ilmassa on vähemmän energiaa, jolloin ilma-vesilämpöpumppujen kapasiteetti laskee, ja kylmällä säällä lämmönkeräimien pintaan tiivistyy vettä, joka jäätyy. Sulatus voidaan toteuttaa monella tavalla, mikä vaikuttaa oleellisesti laitoksen hyötysuhteeseen. Aalto Works projektissa sulatus toteutetaan käänteisellä kylmäainekierrolla, jossa lauhduttimen ja höyrystimen paikat vaihdetaan keskenään ja lamellia sulatetaan aluelämpöverkon energialla. Vermossa sulatus toteutetaan kaukolämpöverkon paluueden energialla. Vermon lämmönkeräinkenttä on ylimitoitettu, jolloin sulatusjakson aikana lämmönkeräimien kapasiteetti ei laske, koska ylimääräinen keräin otetaan käyttöön sulatuksen aikana. Suurimpana järjestelmän etuna on vakaa tuotantokapasiteetti. Sulatusjaksojen optimointi on myös helppoa, koska sulatuksen automaatio ei ole toimittajan järjestelmän sisällä. Aalto Worksin tapauksessa kapasiteetti laskee aina sulatettavan kylmäainepiirin kapasiteetin verran ja lisäksi sulatukseen käytetty energia poistuu aluelämpöverkosta. Sulatusjaksojen ajoitus tapahtuu laitteiden oman automaation sisällä, jolloin loppukäyttäjän on haastavaa vaikuttaa niiden optimointiin. Toisaalta käänteisellä kylmäainekierrolla toteutettu sulatus on erittäin nopea tapa sulattaa lamellit. Vermon laitos on vesihöyrysteinen, minkä vuoksi käänteisen kylmäainekierron käyttö sulatuksessa ei onnistuisi kyseisessä järjestelmässä tehokkaasti.

Ilma-vesilämpöpumppujen käytöstä osana kaukolämpöverkkoa saatiin positiivisia kokemuksia pilottihankkeissa. Suomen kylmät olosuhteet laskevat ilma-vesilämpöpumppujen tehokkuutta ja kylmimmillä ulkoilman lämpötiloilla niitä ei voida hyödyntää lainkaan. Espoon alueella alle -10 celsiusasteen ulkolämpötiloja on kuitenkin harvoin ja siten kylmästä säästä johtuvat tuotannon keskeytykset eivät nouse merkittävään rooliin. Ilma-vesilämpöpumppuja hyödynnettäessä suuremmassa mittakaavassa on kuitenkin huomioitava lämmönvarastoinnin ja -tuotannon reservikapasiteetin tarve alhaisten ulkolämpötilojen vuoksi. Suomessa käytettävä korkea kaukolämpöverkon lämpötila huonontaa lämpöpumppujärjestelmien hyötysuhdetta huomattavasti. Ilma-vesilämpöpumput ovat helposti monistettavissa, joten niiden rakentaminen eri puolille kaukolämpöverkkoa on yksinkertaista. Ilma-vesilämpöpumput tarvitsevat paljon tilaa ja aiheuttavat jonkin verran melua, jonka vuoksi niiden sijoittaminen tiheään asutuille alueille voi olla haastavaa. Ilma-vesilämpöpumput kykenevät tuottamaan kaukolämpöä joustavasti ja niiden huolto ja operointi on yksinkertaista. Tämän tutkimuksen perusteella ilma-vesilämpöpumput toimivat osaratkaisuna vähäpäästöisessä kaukolämpötuotannossa.

8 Yhteenveto

Kylmän ilmaston vuoksi lämmöntuotannon osuus kasvihuonepäästöistä on Suomessa suuri. Energiantuotannossa on käynnissä globaali murros ja sen osana myös Suomen kaukolämmöntuotanto joutuu uudistumaan. Sanna Marinin hallitus on linjannut Suomen hiilineutraaliuden tavoitteeksi vuoden 2035. EU:n ja Suomen kansalliset ilmastotavoitteet haastavat kaukolämpölaitokset tutkimaan erilaisia vaihtoehtoja lämmöntuotannon uudistamiseksi osana koko energiajärjestelmän murrosta ja hiilineutraaliuden saavuttamiseksi nopealla aikataululla. Fortum on sitoutunut lopettamaan kivihiilen käytön Suomessa vuoden 2025 loppuun mennessä. Tuotantokapasiteetin muuttamiseksi hiilineutraaliksi Fortum on käynnistänyt Espoo Clean Heat -ohjelman, jonka tarkoituksena on kehittää Espoon kaukolämmön tuotantoa vähäpäästöiseksi ja saavuttaa hiilineutraalius vuoden 2030 loppuun mennessä. Lisäksi Fortum asettanut tavoitteeksi Euroopan tuotannon hiilineutraaliuden vuoteen 2035 mennessä.

Kaukolämpölaitosten tulee pystyä toimittamaan asiakkailleen lämpöä varmasti kaikissa tilanteissa. Lämmöntuotannon tulee olla ympäristöystävällistä ja hiilineutraalia, mutta samaan aikaan toimitetun lämmön hinnan on oltava kohtuullista ja kilpailukykyistä. Suomen ilmastossa kaukolämpöverkkoon tuotetun lämpöenergian lisäksi keskeistä on varmistaa riittävä lämmöntuotantoteho kaikkein kylmimpinäkin pakkasjaksoina. Kaukolämmöntuotanto tulee muuttumaan poltosta enemmän sähkön hyödyntämiseen mm. lämpöpumppuja käyttämällä. On arvioitu, että lämpöpumppujen, lämpövarastojen ja CHP tuotannon yhdistelmä, jossa ylimääräin tuotettua sähköä varastoidaan lämpönä kaukolämpöverkoston yhteydessä, voidaan toteuttaa kustannustehokkaasti (Averfalk H. et, al. 2017, Mathiesen B. ja Lund H. 2009). Ilma-vesilämpöpumput tulevat olemaan merkittävässä roolissa matkalla kohti Espoon kaukolämmöntuotannon hiilineutraaliutta. Ilma-vesilämpöpumput eivät kuitenkaan kykene tuottamaan lämpöä alhaisimmissa ulkolämpötiloissa, joten niiden rinnalle tarvitaan myös muita tuotantotapoja. Lämpöpumppujen suurena etuna on niiden mahdollistama kylmätuotanto, jolloin kaukokylmää voidaan myydä asiakkaalle kaukolämmön tavoin.

Fortum on toteuttanut Espoon alueelle kaksi ilmavesilämpöpumppuprojektia. Vermon laitos on toteutettu kaksivaiheisena, koska lämpötilan nostaminen kaukolämpöverkon lämpötilaan ei onnistu yhdessä vaiheessa. Vermon laitos on vesihöyrystein, jonka vuoksi sen toteutus

poikkeaa huomattavasti ilmahöyrysteisestä Otaniemen järjestelmästä. Vesihöyrysteisessä järjestelmässä lämmönkeräimissä kiertää erillinen neste, jonka välityksellä lämpö siirretään lämpöpumpuille. Ilmahöyrysteisessä järjestelmissä lämmönkeräimissä kiertää kylmäaine, joten se toimii kylmäainepiirin höyrystimenä. Otaniemen järjestelmä tuottaa matalalämpöistä lämmitystä, jolloin lämpötilan nosto pystytään tekemään yhdessä vaiheessa. Otaniemen lämpöpumppu on tehdasvalmisteinen ja Vermon lämpöpumppu on erillisistä komponenteista räätälöity laitos. Molemmat projektit olivat pilottiprojekteja, joten niistä ei ollut ennestään laajaa kokemusta. Tästä syystä oli ennakoitavissa, että laitosten käyttöönottoon liittyy haasteita, jotka on ratkaistava koekäyttöjen aikana.

Otaniemessä Aalto Works -projektin koekäyttövaiheen ongelmat kohdistuivat pääsääntöisesti aluelämpöverkon veden likaisuuteen ja lämpötilan vaihteluun. Veden puhdistus osoittautui jälkikäteen haastavaksi ja täten tulevaisuudessa vastaavissa projekteissa on tärkeää huolehtia aluelämpöverkon putkien suojauksesta asennuksen aikana ja riittävästä huuhte-
lusta ennen käyttöönottoa. Lähtevän veden lämpötilavaihtelut aiheuttivat kiinteistöjen päässä ongelmia lämmön vastaanottamisessa tilanteissa, joissa lämpötila laski alle mitoitusarvon. Tämä aiheutti veden palaamista lämpimänä, jonka vuoksi laitoksen kapasiteetti laski ja toisaalta myös hyötysuhde huononi. Merkittävänä syynä lämpötilavaihteluille oli lämpöpumppujen sulatusjaksot, koska järjestelmän lämmöntuotantokapasiteetti laski sulatusjaksojen aikana huomattavasti. Sulatusjaksojen aiheuttama kapasiteetinlasku johtui sulatustavasta, jossa energia lamellien sulatukseen otetaan aluelämpöverkosta. Aluelämpöverkosta otettavan sulatusenergian lisäksi sulatuksen aikana sulatettava kylmäainepiiri ei tuota lämpöä. Lähtevän veden lämpötilavaihteluiden vähentämiseksi ilma-vesilämpöpumppujärjestelmiin olisi järkevä asentaa riittävän suuri lämpöakkuna toimiva puskurisäiliö, mikäli lämpötilan vaihtelua ei saada muuten vähennettyä. Lisäksi järjestelmät voitaisiin rakentaa redundanttisiksi, jotta sulatusjaksot eivät vähentäisi laitoksen kapasiteettia. Otaniemessä lämpöakun jälkiasentaminen olisi ollut haastavaa, joten lämpötilaheilahteluja pyrittiin eliminoidaan optimoimalla kiinteistöjen lämpötilakäyriä, sulatusjaksoja ja järjestelmän vesikiertoa.

Vermo -projektissa suurimmaksi ongelmaksi muodostui lämmönkeräimien kapasiteettiva-
jaus ja ensimmäisen portaan lämpöpumpun moottorin ylikuumentuminen. Molemmat ongelmat johtuvat laitoksen osien alimitoituksesta. Pilotointilaitoksessa komponenttien

mitoitukseen liittyvät ongelmat ovat ennakoitavissa olevia, koska todellista käyttötilannetta on ennalta haastavaa mallintaa ja suunnitella. Vermon järjestelmän lämmönkeräimet olivat mitoitettu redundanttisiksi ja sulatus toteutettiin kaukolämmön paluuveden energialla, jolloin sulatusjaksojen aikana laitoksen kapasiteetin ei pitäisi laskea. Käyttöönoton aikana laitosta jouduttiin ajamaan täydellä lämmönkeräinkapasiteetilla puutteellisen kapasiteetin vuoksi, joka aiheuttaa sulatusjaksojen aikana kapasiteetin laskun.

Tässä diplomityössä esitetyt pilottilaitoksista saadut hyötysuhteeseen ja käyttöön liittyvät tulokset ovat alustavia ja lopulliset tulokset saadaan vasta, kun laitosten käytöstä on pidempiaikaista kokemusta ja saatujen kokemusten perusteella niiden käyttö on optimoitu. Lämpöpumppujen ja verkoston toiminnan yhteensopivuus ja käytön optimoiminen osoittautuivat koekäyttöjen aikana niin merkittäväksi, että ne saattavat ratkaista lämpöpumppujen kannattavuuden. Hyvin toimiessaan ilma-vesilämpöpumput ovat tehokkaita, eikä niiden käyttö edellytä jatkuvaa käyttöhenkilökunnan huomiota. Käyttöhenkilökunta tulee kuitenkin kouluttaa huolehtimaan laitoksen toiminnan seuraamisesta ja huollosta. Käyttöhenkilökuntaa varten olisi hyvä laatia tarkastuslistat, joihin kirjattaisiin tarkastettavat kohteet, kirjattavat havainnot ja aikataulut sekä toimintaohjeet erilaisten ongelmien varalta.

Lähteet:

AGA. 2021. Refrigerants, Product data summary. [Verkkoaineisto], [Viitattu 31.3.2021].

Saatavissa:

https://www.linde-gas.fi/fi/images/Product_Data_Summary_tcm634-175814.pdf.

Averfalk, H., Ingvarsson, P., Persson, U., Gong M. & Werner S. 2017. Large heat pumps in Swedish district heating system. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 79, 1275-1284.

Calefa. 2019. Suomen aurinkoisin kunta Puumala lämpiää auringolla ja lämpöpumpuilla.

[Verkkoaineisto], [Viitattu 7.4.2021]. Saatavissa:

<http://www.calefa.fi/fi/ajankohtaista/suomen-aurinkoisin-kunta-puumala-lampiaa-tulevaisuudessa-auringolla-ja-calefan-lampopumpuilla/>.

Dong, K., Sun, R., & Dong, X. 2018. CO2 emissions, natural gas and renewables, economic growth: Assessing the evidence from China. Science of The Total Environment. Vol.640-641, 293-302.

Eduskunnan päätös, N:o 416/2019. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 14.5.2021]. Saatavissa:

<https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2019/20190416>.

Energiateollisuus ry. 2020. Kaukolämpötilasto 2019. [Verkkodokumentti], [Viitattu

7.4.2021]. Saatavissa: https://energia.fi/files/5384/Kaukolampotilasto_2019.pdf.

Energiavirasto. 2019. Selvitys tehoreservin tarpeesta vuosille 2020-2022. [Verkkodoku-

mentti], [Viitattu 5.4.2021]. Saatavissa: <https://energiavirasto.fi/documents/Selvitys-tehoreservin-tarpeesta-2020-2022.pdf>.

Espoo. 2016. Espoon ilmasto-ohjelma 2016-2020. [Verkkodokumentti]. [Viitattu

30.3.2021]. Saatavissa: <https://www.espoo.fi/download/noname/%7B70AB6BEF-E617-4FCA-B94D-61461D78A097%7D/76309>.

Espoo. 2019. Espoon kaupungin kestävän energian ja ilmaston toimintasuunnitelma. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 30.3.2021]. Saatavissa: <https://www.espoo.fi/download/no-name/%7BED4C444A-543F-42E7-8545-DCE5F071B726%7D/121480>.

Espoo. 2021. Tavoitteena Hiilineutraali Espoo 2030. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 30.3.2021]. Saatavissa: <https://www.espoo.fi/ilmasto>.

EU-asetus, N:o 517/2014. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 14.5.2021]. Saatavissa: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R0517&from=RO>.

EY-asetus, N:o 1005/2009. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 14.5.2021]. Saatavissa: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009R1005&from=EN>.

Fortum. 2021. Toimitusjohtajan liiketoimintakatsaus 2020. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 30.3.2021]. Saatavissa: <https://www.fortum.fi/media/22134/download>.

Fortum. 2021b. Espoo Clean Heat 2020. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 30.3.2021]. Saatavissa: <https://www.fortum.fi/espoo>.

Fortum. 2021c. Geotermistä lämpöä kehitetään Espoon Otaniemessä. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 27.4.2021]. Saatavissa: <https://www.fortum.fi/geotermista-lampoa-kehitetaan-espoo-otaniemessa>.

Gasservei, Technical data sheet, R1234ze. 2020. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 7.4.2021]. Saatavissa: <https://gas-servei.com/shop/docs/technical-data-sheet-r-1234ze-gas-servei.pdf>.

Grassi, W. 2018. Heat Pumps, Fundamentals and Applications. Cham: Springer International Publishing AG. [E-kirja]. [Viitattu 23.2.2021]. Saatavissa: <https://www.springer.com/gp/book/9783319621982>.

Hallituksen esitys HE 167/2020. Hallituksen esitys eduskunnalle laeiksi energiaverotusta koskevan lainsäädännön muuttamisesta. [Verkkoaineisto], [Viitattu 4.4.2021]. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/esitykset/he/2020/20200167>.

Helin, K., Syri, S., & Zakeri, B. 2018. Improving district heat sustainability and competitiveness with heat pumps in the future Nordic energy system. *Energy Procedia*. Vol. 149, 455-464.

Holma, A., Leskinen, P., Myllyviita, T., Manninen, K., Sokka, L., Sinkko, T. & Pasanen, K. 2018. Environmental impacts and risks of the national renewable energy targets – A review and a qualitative case study from Finland. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 82, 1433-1441.

Kapanen, K. 2017. Suomen kylmäaineyhdistys ry, Kylmäainetilanne.

Kestävän elvytyksen työryhmä. 2020. Kestävä elvytys - kohti koronakriisistä toipuvaa, menestyvää ja ekologisesti kestävää Suomea. Helsinki: Ympäristöministeriö. [Verkkodokumentti], [Viitattu 8.4.2021]. Saatavissa: <https://www.ym.fi/download/none/%7B52A8DB7C-465B-450F-B36B-CED62718A951%7D/159562>.

Kontu K. 2020. Customer-centred development paths for district heating industry. Aalto yliopisto. [Verkkodokumentti], [Viitattu 7.4.2021]. Saatavissa: <https://aalto-doc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/42464/isbn9789526089102.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

Lun, Y. H. & Tung, S. L. 2019. Heat Pumps for Sustainable Heating and Cooling. Cham: Springer International Publishing AG. [E-kirja], Saatavissa: <https://www.springer.com/gp/book/9783030313869>.

Mathiesen B. and Lund H. 2009. Comparative analyses of seven technologies to facilitate the integration of fluctuating renewable energy sources. *IET Renewable Power Generation*. Vol. 3, 190-204.

Pöyry Management Consulting Oy. 2018. Kivihiilen käytön kieltämisen vaikutusten arviointi. Raportti työ- ja elinkeinoministeriölle. [Verkkodokumentti], [Viitattu 7.4.2021]. Saatavissa:

https://tem.fi/documents/1410877/2132296/Selvitys_++Kivihiilen+kielt%C3%A4misen+vaikutukset/8fb510b4-cfa3-4d9f-a787-0a8a4ba23b5f/Selvitys_++Kivihiilen+kielt%C3%A4misen+vaikutukset.pdf.

Pöyry Management Consulting Oy. 2019. Huoltovarmuus energiamurroksessa. Raportti Huoltovarmuuskeskukselle. Loppuraportti 29.5.2019. [Verkkodokumentti], [Viitattu 7.4.2021]. Saatavissa: <https://docplayer.fi/144134866-Raportti-huoltovarmuuskeskukselle-loppuraportti.html>.

Qiao, H., Aute, V. & Radermacher, R. 2015. Transient modeling of a flash tank vapor injection heat pump system – Part I: Model development. International Journal of Refrigeration. Vol. 49, 169-182.

SFS-EN 378-1. 2016. Refrigerating systems and heat pumps, Safety and environmental requirements.

Sitra. 2020. Turpeen rooli ja sen käytöstä luopumisen vaikutukset Suomessa. [Verkkoaineisto], [Viitattu 7.4.2021]. Saatavissa: <https://media.sitra.fi/2020/06/31150012/turpeen-rooli-ja-sen-kaytosta-luopumisen-vaikutukset-suomessa-tekninen-raportti.pdf>.

Song, M. & Deng, S. 2019. Defrosting for Air Source Heat Pump - Research, Analysis and Methods. [E-kirja]. [Viitattu 30.4.2021]. Saatavissa:

<https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt0122RMI4/defrosting-air-source/reverse-cycle>.

ST1. 2021. Puhdasta geolämpöä maan syvyyksistä. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 27.4.2021]. Saatavissa: <https://www.st1.fi/geolampo>.

SULPU. 2020. Myydyt lämpöpumput, kappaleina, euroina, kumulatiivisesti ja tyypeittäin 2020. SULPU lämpöpumpputilasto 2020. [Verkkodokumentti], [Viitattu 7.4.2021]. Saatavissa:

<https://www.sulpu.fi/documents/184029/0/SULPU%20%20%C3%A4mp%C3%B6pumpputilasto%202020%20%20kuvaajat.pdf> .

Sweco. 2019. Ilmasta-veteen lämpöpumput kaukolämmön tuotannossa. [Viitattu 27.4.2021]

Swegon. 2021. BlueBox, Omicron Rev S4. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 10.5.2021]. Saatavissa: <http://www.arfit.pt/public/uploads/files/07daa65b97bb0ceba0bb155713340a3c.pdf>.

Swegon. 2020. Omicron REV S4 family – L2. [Viitattu 10.5.2021].

Swep. 2020. Log P/h diagrams for refrigerants. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 23.2.2021]. Saatavissa:

<https://www.swep.net/refrigerant-handbook/appendix/appendix-b/>.

Swiss Federal Office of Energy SFOE. 2008. History of Heat Pumps, Swiss Contributions and International Milestones. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 30.3.2021]. Saatavissa:

<https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/21381633>.

Tan, H., Tao, T., Xu, G., Zhang, S., Wang, D. & Xiangui Luo. 2014. Experimental study on defrosting mechanism of intermittent ultrasonic resonance for a finned-tube evaporator. Experimental Thermal and Fluid Science. Vol. 52, 308-317.

Tielinen A. 2020. Kaukolämmöstä maalämpöön vaihtamisen taloudellinen kannattavuus asuinalossa. Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT. Diplomityö. Lappeenranta. [Verkkodokumentti], [Viitattu 7.4.2021]. Saatavissa: https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/161968/Diplomity%C3%B6_Tielinen_Annamaria.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Tilastokeskus. 2020. Sähkön ja lämmön tuotanto 2019. [Verkkodokumentti], [Viitattu 7.4.2021]. Saatavissa: https://www.stat.fi/til/salatu/2019/salatu_2019_2020-11-03_fi.pdf.

Työ- ja elinkeinoministeriö. 2021. Ilmasto- ja energiastrategia. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 30.3.2021]. Saatavissa: <https://tem.fi/ilmasto-ja-energiastrategia>.

Vahanen. 2021. Ympäristömelumittaus: AW-lämpöpumppulaitos, Mittausraportti ja -pöytäkirja. [Viitattu 30.3.2021].

VALOR Partners Oy. 2016. Suuret lämpöpumput kaukolämpöjärjestelmässä. Loppuraportti 29.8.2016. [Verkkodokumentti], [Viitattu 7.4.2021]. Saatavissa: https://energia.fi/files/993/Suuret_lampopumput_kaukolampojarjestelmassa_Loppuraportti_290816_paivitetty.pdf.

Valtioneuvoston päätös melutason ohjearvosta. 1992. 993/1992. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 14.5.2021]. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/1992/19920993>.

Valtioneuvosto. 2021. Hiilineutraali ja luonnon monimuotoisuuden turvaava Suomi. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 30.3.2021]. Saatavissa: <https://ym.fi/suomen-kansallinen-ilmastopoliitikka>.

Xu, X., Hwang, Y. & Radermacher, R. 2011. Refrigerant injection for heat pumping/air conditioning systems: Literature review and challenges discussions. International Journal of Refrigeration. Vol. 34, 402-415.

Ympäristö. 2014. Fluorattuja kasvihuonekaasuja sisältävien laitteiden tarkastusvälejä ja niitä vastaavia kylmäainemääriä. [Verkkoaineisto], [Viitattu 30.3.2021]. Saatavissa: <https://www.ymparisto.fi/fkaasut>.

Ympäristö. 2021. F-kaasua sisältävän laitteen omistajan velvollisuudet. [Verkkoaineisto], [Viitattu 7.4.2021]. Saatavissa:

<https://www.ymparisto.fi/fkaasut/omistaja#Vuototarkastukset>.

Ympäristövirasto. 2021. Suomen kansallinen ilmastopolitiikka. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 30.3.2021]. Saatavissa: <https://ym.fi/suomen-kansallinen-ilmastopolitiikka>.