CHC-LÄMPÖPUMPPUJEN KÄYTETTÄVYYDEN TEHOSTAMINEN

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiatekniikan diplomityö

2023

Annika Laitala

Tarkastaja(t): Professori Teemu Turunen-Saaresti

TkT Ahti Jaatinen-Värri

Ohjaaja: DI Miika Lindholm

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Energiatekniikka

Annika Laitala

CHC-lämpöpumppujen käytettävyyden tehostaminen

Energiatekniikan maisterityö

2023

61 sivua, 11 kuvaa, 11 taulukkoa ja 2 liitettä

Tarkastaja(t): Professori Teemu Turunen-Saaresti ja TkT Ahti Jaatinen-Värri

Avainsanat: CHC, kylmäaine, netbooster, lämpöpumppu, kaukolämmön paluuveden lämpötila

Diplomityön aiheena oli selvittää Helen Oy:n CHC-lämpöpumppujen käytettävyyden tehostamista tutkimalla annettujen vaihtoehtojen osalta teknillistaloudellinen kannattavuus ja tarkastella yleisellä tasolla kaukolämpöverkon paluuveden lämpötilan laskemisen vaikutuksia. Työssä laskettiin kahden valitun referenssikohteen osalta kannattavuutta lämmöntuottajan näkökulmasta.

Teknisessä osassa tutustuttiin neljään eri kytkentävaihtoehtoon, joilla CHC-lämpöpumppujen käytettävyyttä voisi tehostaa. Näistä kaksi, netbooster-toimiset vaihtoehdot, valittiin tarkempaan kustannusanalyysiin, jossa määritettiin investoinnin kannattavuus 17 vuoden tarkastelujaksolle. Netbooster-kytkennässä otetaan hukkalämpö talteen kaukolämpöverkon paluulinjasta menolinjaan lämpöpumpun kautta ja samalla lasketaan kaukolämmön paluuveden lämpötilaa. Kustannusanalyysissa otettiin huomioon referenssikohteiden prosessitarpeet, käyttökustannukset sekä kunnossapitokustannukset kuukausitasolla. Kannattavuus laskettiin ns. sähkökattilamallilla, jossa ajatellaan lämmön olevan jo kertaalleen tuotettu, koska lämmöntalteenotto tulee kaukolämmön paluuvedestä. Tämä tarkoittaa sitä, että lisätuotanto ajatellaan olevan lämpöpumpun ottaman sähkötehon verran.

Selvitys osoitti, että annetut vaihtoehdot eivät ole kannattavia toteuttaa yksittäisinä kohteina. Sähkömarkkinoiden tilanne vaikuttaa omalta osaltaan suuresti tämän tyyppisen yksittäisen kohteen kannattavuuteen ja vaihtoehdoista saattaa tulla kannattavia, mikäli sähkön käyttöhinnan ennusteet muuttuvat tulevaisuudessa parempaan suuntaan.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Energy Technology

Annika Laitala

Enhancing the usability of CHC- heat pumps

Master's thesis

2023

61 pages, 11 figures, 11 tables and 2 appendices

Examiners: Professor Teemu Turunen-Saaresti and D.Sc. Ahti Jaatinen-Värri

Keywords: CHC, refrigerant, netbooster, heat pump, district heating return water temperature

The subject of this thesis was to examine the enhancing of usability for Helen Ltd's CHC-heat pumps by calculating the technical and economical viability of the given alternatives and to investigate in general level the effects of lowering the temperature of district heating return water. The profitability of two selected reference sites was calculated from the point of view of an energy producer.

In the technical part, four different connection options were introduced, which could be used to enhance the usability of CHC heat pumps. Two of these, the netbooster options, were selected for a more detailed cost analysis, which determined the profitability of the investment for a 17-year period. In the Netbooster connection, waste heat is recovered from the return line of the district heating network to the supply line via a heat pump and at the same time the temperature of the district heating return water is lowered. The cost analysis took into account the process needs, operating costs and maintenance costs of the reference sites on a monthly basis. Profitability was calculated using an electrode boiler model, where it is thought that the heat has already been produced once, because the heat recovery comes from the return water of the district heating. This means that the additional production is considered to be equal to the electrical power taken by the heat pump.

The outcome showed that the given alternatives are not profitable to implement as individual objects. The situation in the electricity market greatly affects the profitability of this type of individual object, and the alternatives may become profitable if the forecasts of the electricity usage price change for the better in the future.

KIITOKSET/ ACKNOWLEDGEMENTS

Kiitokset kaikille työssä auttaneille tahoille, mm. ohjaaja Miika Lindholmille, CHC-osaajille Jarno Siniteräkselle ja Jussi Salmelle. Timo Marttiselle kiitokset paluuveden osalta ja Juhana Laaksolle kaikesta avusta energiajärjestelmän kokonaisuuden hallinnan osalta.

Kiitokset yliopiston puolelta myös professori Teemu Turunen-Saarestille ja tekniikan tohtori Ahti Jaatinen-Värrille työn tarkastamisesta.

Lyhenteet

GWP	lämmityspotentiaali (Global Warming Potential)
ODP	otsonihaitallisuus (Ozon Deployment Potential)
CHC	yhdistetty lämmitys ja jäähdytys (Combined Heating and Cooling)
CFC	täysin halogenoidut kloorifluorihiilivedyt/freonit (Chloro-Fluoro-Carbons)
HCFC	osittain halogenoidut kloorifluorihiilivedyt (Hydro-Chloro-Fluoro-Carbons)
HFC	fluorihiilivedyt (Hydro-Fluoro- Carbons)
HFO	fluorihiiliolefiinit (Hydro-Fluoro- Olefin)
HC	hiilivedyt (Hydro-Carbons)

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

(Kiitokset)

(Symboli- ja lyhenneluettelo)

1 Johdanto 9

1.1 Työn tausta 9

1.2 Aihe ja tavoitteet 10

2 Lämpöpumppu 12

2.1 Lämpöpumpun toiminta 12

2.2 Hyötysuhde (COP) ja laskentaa 14

2.3 Lämpöpumppusovellukset 15

2.3.1 Lämpöpumppusovellukset lämmönlähteen- ja kohteen mukaan 15

2.3.2 Tyypilliset lämpöpumppujen kompressorityypit 16

3 Kylmäaineet 18

3.1 Kylmäaineiden lainsäädännön historia 18

3.2 Kylmäaineiden nykytilanne ja tulevaisuus 20

3.3 Yleistä 21

4 Lämpöpumppujen lainsäädäntö 24

4.1 Painelaitteet 24

4.1.1 Voimassa olevat lait ja asetukset 24

4.1.2 Painelaitedirektiivi PED 2014/68/EU 24

4.1.3 Muut huomioon otettavat standardit 25

4.2 Kylmälainsäädäntö 27

4.2.1 F-kaasuasetus ja tuleva päivitys 27

4.2.2 Pätevyysasetus Vna 766/2016 29
4.2.3 EN-378 Kylmäkoneistot ja lämpöpumput 31
4.2.4 REACH-asetus 1907/2006 ja tuleva mahdollinen rajoitus 32
5 CHC - kytkennät 34
5.1 Perus CHC- kytkentä 34
5.2 CHC boosterikytkentä 35
5.3 Netbooster-kytkentä 35
5.4 Nelisuuntaiskytkentä 36
5.5 KJ-hybridikytkentä 38
6 Vaikutus päästöihin 39
7 KL-verkon paluulämpötilan laskun vaikutukset 41
7.1 Suuren kaupunkialueen (kolmannen sukupolven) kaukolämpöverkko 41
7.2 Paluuvesi kaukolämpöverkossa 42
7.3 Paluulämpötilan laskemisen vaikutukset 44
8 Kannattavuus 45
8.1 Kannattavuuslaskennan perusteet 47
8.1.1 Investointi 47
8.1.2 Käyttömaksut 47
8.1.3 Kunnossapitomaksut 48
8.1.4 Käyttötunnit 48
8.1.5 Lisäinen lämpö 48
8.1.6 Sähköteho 49
8.1.7 Booster-jäähdytysteho 49
8.1.8 Jäähdytysteho 50
8.1.9 Muuta huomioitavaa 50
8.2 Kannattavuuslaskennan tulokset 50
8.2.1 Vaihtoehto 1 51

8.2.2 Vaihtoehto 2 52

9 Johtopäätökset 56

Liitteet

Liite 1. CHC boosterikytkentä

Liite 2. KJ-hybridikytkennän kaavio

1 Johdanto

Energiamurros on käynnissä tätä diplomityötä kirjoittaessa Suomen pääkaupunkiseudun energiatuotantojärjestelmässä, johtuen tavoitteista saavuttaa hiilineutraali energiantuotanto. Pääkaupungin energiantuotantoyhtiö Helen Oy on sulkemassa hiilivoimaloitaan, jotka ovat tuottaneet sähköä ja lämpöä vuosikymmenien ajan Helsinkiin (Helen Oy 2022). Korvaavia energiaratkaisuja on selvitelty pitkään ja näitä on mm. tuulivoima, aurinkovoima, biolämpölaitos, maalämpö, sähkökattilat, lämpöakut sekä lämpöpumput (Helen Oy 2021). Kaukolämpöverkossa on myös paljon potentiaalia hyödynnettäväksi erilaisin ratkaisuin ja yksi paljon pinnalla ollut tutkimuksen aihe on kaukolämpöverkon lämpötason alentaminen ja lämpötilan nostaminen vasta asiakkaan päässä lämpöpumppujen avulla sekä ylipäänsä kaukolämpöverkon tuotannon hajauttaminen lämpöpumpuille (Vivian et al. 2018). Kaukolämmön tuotantotapojen optimoinnilla halutaan vähentää häviöitä sekä tehostaa tuotantoa ja sijoittamalla isoon kaukolämpöverkkoon lämpöpumppuja, voidaan mahdollisesti vähentää keskitetyn tuotannon tarvetta (Levihn 2017).

1.1 Työn tausta

Helen oy on tuottanut energiaa noin 80-luvun puolivälistä asti pääasiallisesti fossiilisilla polttoaineilla ja keskitetysti muutaman tuotantolaitoksen voimin. 2000-luvun puolella on kuitenkin alettu tarkastelemaan erityyppisiä ja hiilineutraaleja vaihtoehtoja ja esimerkiksi Katri Valan lämpöpumppulaitos, joka on otettu käyttöön vuonna 2006, hyödyntää kaupungin jätevedestä saatavaa hukkalämpöä lämmöntuotantoon. Katri Valassa tuotetaan myös kaukojäähdytystä, koska lämpöpumpuilla pystytään tuottamaan lämpöä, sekä jäähdytystä yhtäaikaisesti. Kaukojäähdytys vaatii kuitenkin kaukojäähdytysverkkoon liittymisen, joka ei välttämättä ole aina mahdollista. Tätä varten yritys on tuotteistanut myös kiinteistöjäähdytyksen, jossa kiinteistöön sijoitetaan lämpöpumppu, joka ottaa hukkalämmön talteen kaukolämpöverkkoon ja tuottaa jäähdytystä kiinteistöön tarpeen mukaan. Kaikissa kiinteistökohteissa jäähdytyksen ja kapasiteetin tarpeet eivät ole ympärivuorokautisia, joka tarkoittaa sitä, että lämpöpumppu tuottaa lämpöä kaukolämpöverkkoon vain niinä aikoina, kun kiinteistö tarvitsee jäähdytystä.

1.2 Aihe ja tavoitteet

Tässä työssä keskitytään lämpöpumppuihin, tarkemmin ottaen CHC- (Combined Heating and Cooling) lämpöpumppuihin eli kiinteistölämpöpumppuihin ja pohditaan miten Helen Oy saisi hyödynnettyä laitekannassaan olevia kiinteistölämpöpumppuja paremmin. CHC-peruskytkennässä lämpöpumput tuottavat asiakkaan tarpeen mukaan jäähdytystä kiinteistöön ja sieltä saatava hukkalämpö hyödynnetään lämpöpumpun avulla kaukolämmöntuotannossa. Tämä tarkoittaa sitä, että niiden huipunkäyttöaika keskittyy jäähdytyskauteen. Tässä työssä selvitetään, voidaanko kiinteistölämpöpumppuja käyttää tehokkaammin myös jäähdytyskauden ulkopuolella lisäämällä erilaisia kytkentätapoja CHC-lämpöpumpuille. Esimerkiksi netbooster-kytkentä, jossa talvikaudella otetaan lämpö talteen kaukolämpöverkon paluupuolelta lämpöpumpun höyrystinpiiriin ja tuotetaan lämpöä kaukolämmön menopuolelle.

Aikaisemmissa tutkimuksissa netbooster-kytkentä on esitetty hieman eri tavalla, kun tässä työssä on tarkoitus. Esimerkiksi Østergaard ja Andersen ovat tutkineet netboosteria Tanskalaisen kaukolämpöverkon alueella. Heidän tutkimuksensa ei ota kantaa kaukolämpöverkon virtausvaatimuksiin tai investoinnin kannattavuuteen, mutta tulosten perusteella booster-pumppujen lisääminen kaukolämpöverkkoon vähensi käyttökustannuksia n. 39% johtuen kaasulaitoksen käytön vähenemisestä ja lämpöpumppujen lämpökerroin talviaikaan, jolloin lämmölle on kysyntää, oli noin 6 luokkaa. (Østergaard ja Andersen 2016)

Quirosa et al. (2022) taas tutkivat Espanjan Toledon kaupunginosan lämmitys- ja jäähdytystuotannon tehostamista booster-lämpöpumppujen avulla, matalan, n. 20–40 °C, kaukolämpöverkon alueella. Tutkimuksen tapauksissa on mukana myös aurinkopaneelit ja lämpö menee suoraan käyttökiinteistöön kaukolämpöverkon sijaan. Tulosten mukaan booster-lämpöpumpun käyttö tapauksessa vähensi vuosittaisia kustannuksia 7,7 %.

Vivian et al. (2018) tutkimuksessa selvitettiin matalalämpöisen, n. 15–45 °C kaukolämpöverkon toimivuutta Italiassa boosterilämpöpumppujen avulla siten, että ne sijoitettaisiin kiinteistöjen lämmönjakokeskuksiin, jolloin lämpötilannosto tapahtuisi siellä päässä. Heidän lähtökohtansa oli selvittää myös asiakkaan kannalta kannattavin vaihtoehto ja vertailla kahta eri rahoitusmallia keskenään: ns. tavallinen tapa (business-as-usual), jossa asiakas ostaa lämmöntuottajalta lämpöä sekä sähköä ja hoitaa laiteinvestoinnit ja toisena

tapana lämmönjakelija ottaisi investointikustannukset sekä sähkön käyttökustannukset kontolleen ja asiakas maksaisi ainoastaan lämmöstä. Tutkimuksessa selvitettiin lämpötilaeron vaikutuksia energiankustannuksiin muutaman eri kiinteistökohteen osalta, sekä verrattiin niitä olemassa oleviin kattilalaitoksiin. Vivian et al. selvitys ei ole ihan vertailukelpoinen tämän diplomityön aiheen kanssa, koska se on tehty loppuasiakkaan kannalta, kun taas diplomityö tehdään kannattavuuden osalta lämmöntuottajan näkökulmasta.

Tämänhetkisen tiedon mukaan, aikaisemmin ei ole tutkittu Helsingin kaukolämpöverkon osalta netbooster-toimintaa CHC-lämpöpumpuissa niiden kannattavuuden osalta. Tässä diplomityössä selvitetään netbooster-toimintaa ja sen kannattavuutta kahdella eri tavalla:

1. kiinteistössä olevan CHC-lämpöpumpun osalta, jonka huipunkäyttöaika keskittyy kesäkauteen siten, että sitä voitaisiin ajaa jäähdytyskauden ulkopuolella hyödyntäen kaukolämmön paluupuolelta otettavaa lämpöä
2. kaukolämpöverkon paluupuolelle asennettavan lämpöpumpun osalta, joka palvelee pelkästään kaukolämpöverkkoa. Lämpöpumppu sijoitettaisiin paikkaan, jossa muuten tuotettaisiin lämpöä lämpökeskukselta niiden minimituotannolla

Työssä on selvitetty molempien kohteiden kannattavuutta. Työssä ei siis oteta kantaa kuinka kannattavaa olisi sijoittaa netbooster-toimisia lämpöpumppuja eri puolille kaukolämpöverkkoa.

Lisäksi työssä perehdytään lämpöpumppujen ja kylmäaineiden tilanteeseen sekä lainsäädäntöön lämpöpumppujen omistajan kannalta ja kerrotaan olennaiset lakien ja asetusten edellyttämät toimenpiteet.

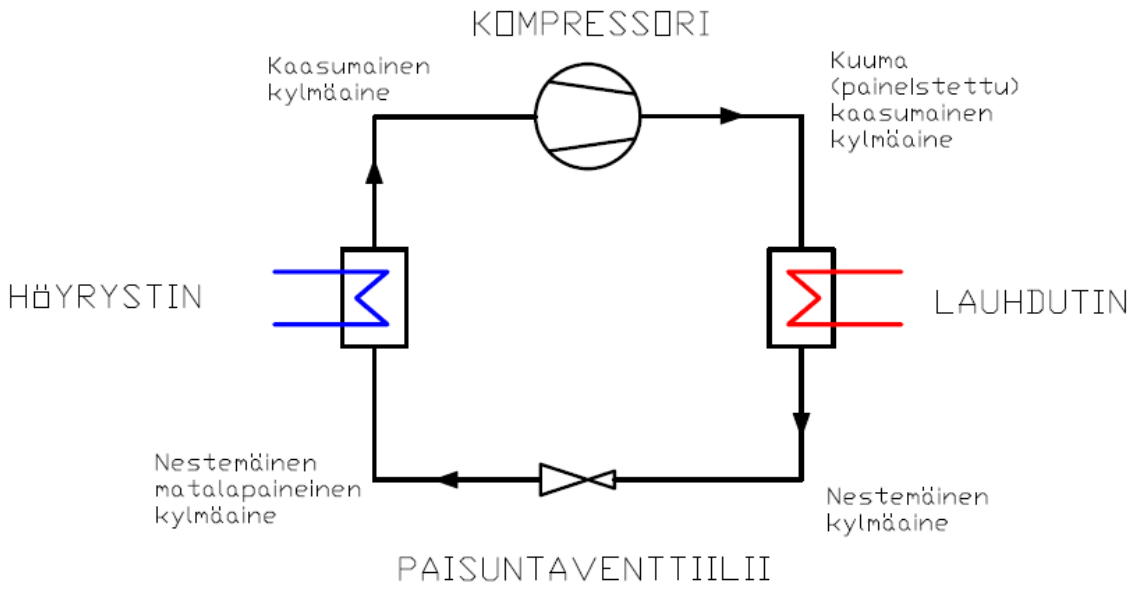
2 Lämpöpumppu

Lämpöpumpulla yleisesti tarkoitetaan prosessia, jossa siirretään energiaa matalalämpöisestä väliaineesta korkealämpöiseen väliaineeseen. Tässä työssä lämpöpumpusta puhuttaessa tarkoitetaan kompressiolämpöpumppua, jonka toimintaperiaatteesta kerrotaan seuraavassa kappaleessa.

2.1 Lämpöpumpun toiminta

Kompressiolämpöpumppu on laite, jonka tarkoituksena on tuottaa lämpöä ottamalla energiaa talteen väliaineesta (lämpöenergia) ja sähköenergiasta kylmäaineen avulla, joka höyrystyy, puristuu ja lauhtuessa luovuttaa lämpöenergian vastaanottavaan väliaineeseen. Yleisiä väliaineen lämmönlähteitä lämpöpumpuille on hukkalämmöt, joita saadaan esimerkiksi prosessien jäähdytysvedestä, kunnallisesta jätevedestä, merivedestä tai kiinteistöjen jäähdytyksestä muodostuvasta hukkalämmöstä.

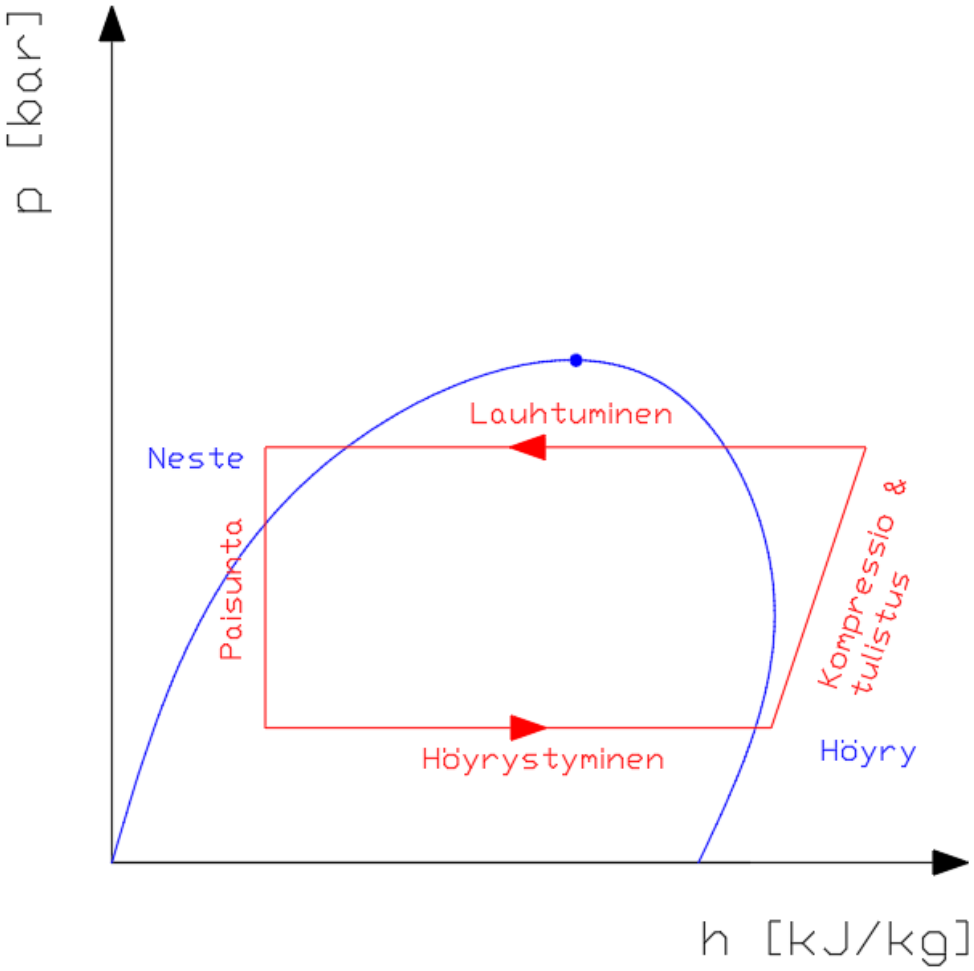
Lämpöpumpun pääkomponentteja ovat höyrystin, kompressori, lauhdutin ja paisuntaventtiili, joissa kylmäaine kiertää putkistojen kautta. Höyrystin ja lauhdutin ovat lämmönvaihtimia, joiden ensiö- ja toisiopuolilla virtaavat väliaineet ja kylmäaine, riippuen toiminnon tarpeista. Lämpöpumpun yksinkertainen periaatekaavio esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Lämpöpumpun komponenttien periaatekaavio

Höyrystimessä väliaine luovuttaa kylmäaineelle lämpöä, jolloin se höyrystyy (sitoo lämpöenergiaa itseensä) ja kulkeutuu kohti kompressoria. Kaasumuotoinen kylmäaine puristuu kompressorissa korkeampaan paineeseen sekä lämpötilaan ja kulkeutuu lauhduttimeen, jossa lämmön vastaanottava väliaine lauhduttaa kylmäaineen taas nesteeksi, jolloin väliaine vastaanottaa kylmäaineesta vapautuvan lämmön.

Kylmäaineen termodynaamista kiertoprosessia kuvataan yleisesti log p,h-piirroksen avulla, kuva 2.



Kuva 2. Log p, h paine-entalpia piirros

2.2 Hyötysuhde (COP) ja laskentaa

Lämpöpumppujen hyötysuhdetta indikoidaan COP (coefficient of performance) – eli tehokertoimella. Kerroin lasketaan seuraavalla kaavalla:

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

, jossa Q on lämpöpumpusta saatu lämpöenergia ja W energian tuottamista varten tehty työ mittaushetkellä.

Yhdistetyissä lämpöpumppusovelluksissa ilmoitetaan $COP_{lämpö}$ ja $COP_{jäähdytys}$ erikseen, jotka lasketaan samalla kaavalla, mutta teho määritetään laskennassa joko Q_h, lämpöteho,

joka saadaan lämpöpumpun lauhduttimesta tai Q_c, jäähdytysteho, joka saadaan lämpöpumpun höyrystimestä.

Lämpöpumppujen tehokerroin voidaan myös laskea teoreettisesti, eli Carnot-hyötysuhteella, lauhduttimesta ulos tulevan lämpötilan ja höyrystimeen sisään menevän lämpötilan avulla:

$$COP_c = \frac{T_l}{T_l - T_h} \quad (2)$$

, jossa T_l on lauhtumislämpötila ja T_h on höyrystymislämpötila. Tämä laskentatapa ei ota huomioon prosessin häviöitä, eikä sijoituspaikkaa. Todellisuudessa lämpöpumppujen COP ei ole teoreettisella tasolla, vaan häviöiden myötä sovelluksesta riippuen on n. 65–75 % teoreettisesta COP:sta.

(Maaskola ja Kataikko 2014, s.17).

2.3 Lämpöpumppusovellukset

Erityyppiset lämpöpumput voidaan lajitella kompressio- ja absorptiolämpöpumppuihin. Tässä työssä keskitytään kompressiolämpöpumppuihin. Toinen lajittelutapa on lämmönlähde- ja kohde. Seuraavassa osiossa kerrotaan ensin jälkimmäisen mukaiset lämpöpumppusovellukset ja sen jälkeen lyhyesti eri kompressorityypit.

2.3.1 Lämpöpumppusovellukset lämmönlähteen- ja kohteen mukaan

<u>Vesi-vesilämpöpumppu</u>

Tämä lämpöpumppusovellus kierrättää höyrystin- ja lauhdutinpiireissään nesteitä. Hyvin tyypillinen sovellus teollisuuden lämpöpumpputoteutuksissa. Prosessin tai kiinteistön hukkalämmöt kerätään usein sisäisen jäähdytyspiirin kautta lämpöpumpulle, josta lämpö luovutetaan esimerkiksi kaukolämpöverkkoon.

Ilma-vesilämpöpumppu

Lämpöpumppusovellus, jossa kiinteistön käyttövettä lämmitetään ulkoilmalla. Toimii yleensä peruslämmityksen lisänä ja voidaan kytkeä esimerkiksi kiinteistön lattialämmitykseen tai patteriverkkoon. (Motiva, 2022)

Tämä lämmitysmuoto on kehittymässä nykypäivänä myös suuren (teollisen) kokoluokan sovelluksiin.

Ilma-ilmalämpöpumppu

Yleisin asuinkiinteistöissä käytetty lämpöpumppu, jossa sisäilmaa lämmitetään ulkoilmalla. Ilmalämpöpumppu toimii yleensä lisälämmitysmuotona peruslämmityksen kanssa. Voidaan käyttää myös jäähdytykseen, jolloin ulkoyksikkö puhaltaa lämpimän ilman ulkoilmaan.

Maalämpöpumppu

Maalämpöpumppu käyttää lämmönlähteenä nimensä mukaisesti maaperää ja joskus keräilyputket asennetaan myös vesistöön. Lämpö kerätään höyrystinpiirissä kiertävään nesteeseen ja luovutetaan taas lauhdutinpiirissä kiertävään nesteeseen. Maalämpöpumpuilla lämmitetään tyypillisesti kiinteistöjen käyttö- ja/tai lämmitysvettä. Maalämpö pientalojen lämmitysmuotona on yleistynyt paljon viime vuosina.

(Motiva 2022)

2.3.2 Tyypilliset lämpöpumppujen kompressorityypit

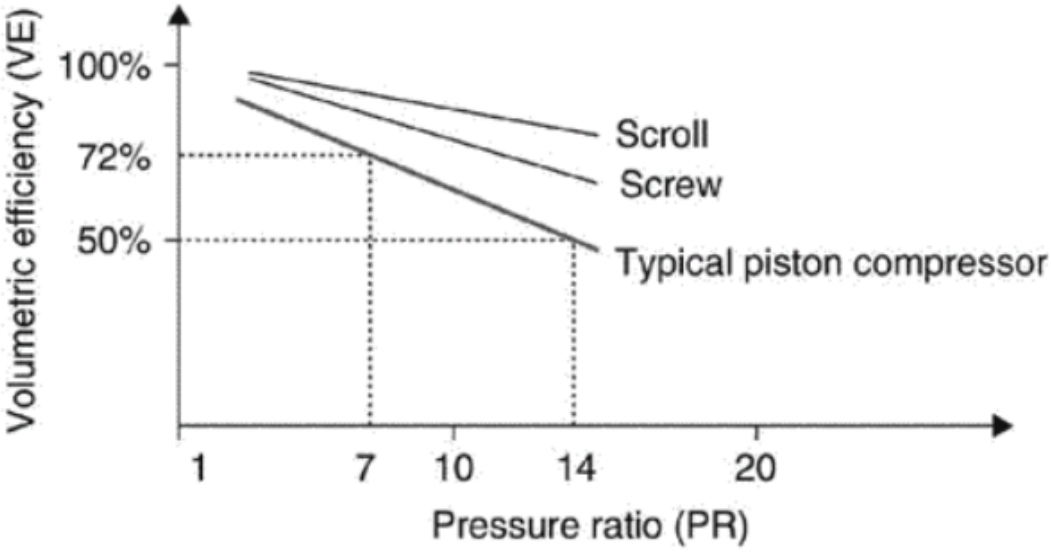
Mäntäkompressori

Mäntäkompressori on vanha ja kestävä kompressorityyppi. Sen lämpötehoalueet ovat tyypillisesti 0,5–1500 kW ja maksimi painesuhde 1:8.

Mäntäkompressorit vievät tyypillisesti paljon tilaa, joten ahtaisiin kohteisiin tämän tyyppistä sovellusta ei yleisesti laiteta. Mäntäkompressoreilla päästään lämpöpumppusovelluksissa n. 100 °C lauhdutinlämpötiloihin (lämpötilan tuotto) ja niiden volumetrinen hyötysuhde on n. 72 %, kuva 3. Volumetrisellä hyötysuhteella (VE) tarkoitetaan kompressorin imupuolen todellisen tilavuusvirran (Vin) suhdetta

kompressorin isku/puristustilavuuteen (Vc), ts volumetrinen hyötysuhde ottaa huomioon kompressorin sisäiset vuodot:

$$VE = \frac{V_{in}}{V_c} \quad (3)$$



Kuva 3. Kompressorityyppien volumetrinen hyötysuhde (Hundy, G.F. 2016. s.73)

Ruuvikompressori

Ruuvikompressorin lämpötehoalueet ovat lämpöpumppusovelluksissa tyypillisesti 0,2–3000 kW ja maksimi painesuhde 1:20.

Ruuvikompressorit ovat kooltaan kompakteja ja toimivat hyvällä hyötysuhteella. Hyötysuhdevertailua mäntäkompressoriin ei pysty tekemään yleisesti, vaan se tulee tehdä tapauskohtaisesti, mutta etuja mäntäkompressoriin verrattuna on mm. pidemmät huoltovälit, suuri painesuhde sekä yksinkertainen ja portaaton tehonsäätö (Aittomäki 2012).

Scroll-kompressori

Scroll- eli kierukkakompressorin lämpötehoalueet lämpöpumppusovelluksissa ovat tyypillisesti muutamista kilowateista noin 100 kW:n ja maksimi painesuhde 1:8.

Scroll-kompressori on hiljainen ja pieneen tilaan sopiva kompressorisovellus.

(Aittomäki 1996).

Turbokompressori

Turbokompressorit toimivat lämpöpumppusovelluksissa yleensä korkeissa lämpötehoalueissa, noin 1500 kW:sta ylöspäin. Turbokompressori voi olla monivaiheinen ja yhden vaiheen painesuhde vaihtelee aineen molekyylipainon ja juoksupyörän rakenteen sekä loppusovelluksen mukaan n. 1.5 ja 5 välillä.

Turbokompressorit ovat tuottoonsa nähden melko kompakteja kooltaan ja vaativat vähän huoltoa. Lämpöpumppusovelluksissa lauhdutinlämpötilat ovat melko korkeita, n. 95 °C luokkaa. (Boyce 2003, s. 8–13)

3 Kylmäaineet

Kylmäaine tarkoittaa lämpöpumpun prosessissa kiertävää väliainetta, joka siirtää lämpöä höyrystimeltä lauhduttimelle. Lämpöpumpuissa käytettävät kylmäaineet muuttavat prosessissa olomuotoaan ja riippuen prosessin vaiheesta joko luovuttavat tai keräävät lämpöä itseensä. Seuraavassa osiossa käsitellään kylmäaineiden lainsäädännön historiaa, nykytilannetta sekä tulevaisuutta.

3.1 Kylmäaineiden lainsäädännön historia

Montrealin pöytäkirja 1987

Ozon Deployment Potential eli otsonihaitallisuus tarkoittaa kylmäaineen vaikutusta otsonikerrokseen. Haitallisuuskerroin tulee kylmäaineen R11 haitallisuudesta, joka on määritelty (mielivaltaisesti) olevan 1. Kylmäaine R11 kuuluu CFC-aineisiin.

CFC-aineiden haitallisuus otsonikerrokselle tunnustettiin 1980-luvulla ja se johti alkuun otsonikerroksen suojelua koskevan Wienin yleissopimuksen allekirjoittamiseen vuonna 1985. Wienin yleissopimus ei edellyttänyt konkreettisia valvontatoimia otsonikerroksen suojelemiseksi, mutta määritteli periaatteet sen suojelemisen aloittamiseksi. (Hundy 2016, s. 42; Ozone Secretariat 2019).

1987 Montrealissa allekirjoitetussa kansainvälisessä pöytäkirjassa sovittiin konkreettisesti CFC- aineiden valmistuksen ja käytön vähentämisestä. Sopimuksen ovat ratifioineet kaikki maailman maat.

Ensin sopimusosapuolten tuli säilyttää CFC-aineiden kulutus ja valmistus samalla tasolla, kuin vuoden 1986 taso aina vuoteen 1992 asti. Vuodesta 1992 eteenpäin CFC-aineiden kulutus ja valmistus tulisi vähentää 0,8 kertaiseksi vuoden 1986 tasosta ja vuodesta 1998 lähtien puolittaa vuoden 1986 tasosta (Montrealin pöytäkirja 1988). Näitä tilastoja valvottiin sopimusosapuolilta yleissopimuksen sihteeristön toimesta. Montrealin pöytäkirjaan tehtiin vuosien saatossa muutoksia ja kiristyksiä mm. vuosina 1990, 1992, 1997, 1999 ja 2016. Nämä muutokset sisälsivät mm. ainelistauksen laajenemisen, muita käytön seurantaan liittyviä täsmennyksiä sekä kaasujen valmistuksen ja käytön vähentämisen aikaisemmista rajoista, lopulta johtaen CFC-aineiden käytön kieltämiseen kokonaan. Vuoden 2016 Kigalin muutoksessa sovittiin myös HFC-aineiden tuotannon ja käytön vähentämisestä.

Suomen Ympäristökeskuksen (2022) mukaan: ”Montrealin pöytäkirjan toimenpiteistä johtuen, otsonikerros on alkanut näyttää merkkejä toipumisesta ja sen odotetaan palautuvan ennalleen n. 50–70 vuodessa”

Kioton pöytäkirja

Kioton pöytäkirjalla tarkoitetaan lisäystä maailmanlaajuiseen UNFCCC:n ilmastonmuutoksen puitesopimukseen, joka tehtiin Kiotossa vuonna 1997 ja astui voimaan kansainvälisesti vuonna 2005. Pöytäkirja rajoittui koskemaan ainoastaan teollisuusmaita, jättäen kehitysmaat sopimuksen ulkopuolelle. Sopimuksen ratifioi yhteensä 192 maata. (UNFCCC, 2023).

Sopimuksessa sitouduttiin vähentämään kasvihuonepäästöjä maakohtaisesti tietty prosenttimäärä (keskimäärin n. 5 %) vuosien 2008–2012 aikana verrattuna vuoden 1990 tasoon. Kylmäaineisiin sopimus liittyi niiltä osin, että vähennettäviin kaasuihin lukeutui fluorihiilivedyt eli HFC-aineet. (Euroopan komissio 2003).

Vuonna 2012 sopimukseen tehtiin Dohan lisäys, joka koski tulevia vuosia 2013–2020. Tänä aikana kasvihuonepäästöjä tuli vähentää n. 20 % verrattuna vuoden 1990 lukuihin. Kylmäaineiden osalta ei tullut lisäyksiä, mutta pöytäkirjan piirissä oleviin kasvihuonekaasuihin lisättiin typpitrifluoridi. (Ympäristöministeriö 2019).

F-kaasuasetus EU-asetus 517/2014

Kioton sopimuksen sitoumusten täytäntöönpanoa varten tehtiin Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus EY 842/2006 (F-kaasuasetus). Asetus keskittyy fluorattuja kasvihuonekaasuja sisältävien tuotteiden ja laitteiden merkintöihin, hävittämiseen, tietojen ilmoittamiseen, käytön valvontaan, markkinoille saattamiseen sekä henkilöstön ja yritysten koulutuksiin ja pätevöitymiseen. (Kapanen 2021; Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus 2006).

F-kaasuasetus 517/2014 kumosi edellisen 842/2006 asetuksen. Asetus sisältää HFC-kylmäaineita sekä HFO-aineita sisältäviä velvoitteita. Asetus sisältää myös mm. vuotojen estämisen, markkinoille saattamisen ja käytönvalvonnan, markkinoille saatettujen fluorihiilivetyjen määrän vähentämisen sekä tietojen ilmoittamisen. (F-kaasuasetus 2014).

Asetuksessa on määritetty fluorihiilivetyjen markkinoille saattamisen vähentäminen vuosien 2015–2030 aikana, jotka on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Fluorihiilivetyjen markkinoille saattamisen vähentämisen aikataulu ja prosenttiosuudet vuoden 2015 tasosta [EUROOPAN PARLAMENTIN JA NEUVOSTON ASETUS (EU) N:o 517/2014. Liite V]

Vuodet	Prosenttiluku, jolla lasketaan fluorihiilivetyjen markkinoille saattamista koskevat enimmäismäärät ja vastaavat kiintiöt
2015	100 %
2016–2017	93 %
2018–2020	63 %
2021–2023	45 %
2024–2026	31 %
2027–2029	24 %
2030	21 %

3.2 Kylmäaineiden nykytilanne ja tulevaisuus

Kylmäaineet ovat kokeneet paljon muutoksia lainsäädännön ja muuttuvan energiamarkkinan takia viimeisen seitsemän vuoden aikana. Niiden käytön, kustannusten

ja saatavuuden ennustaminen on ollut melko vaikeaa. Vuosien 2016–2018 aikana nähtiin kylmäaineiden heikentynyt saatavuus ja sitä kautta huima hintojen nousu F-kaasuasetuksen GWP-arvon säätelyn takia. Esimerkiksi R134a kylmäaineen osalta, korvaavien tuotteiden saatavuus on edelleen ollut heikkoa, mutta sentään hintojen jyrkkä nousu on saatu tasattua vuoteen 2023 alkuun mennessä. (Seinelä 2018; Kapanen 2019; Kapanen 2022).

R134a kylmäaine on ollut niin teollisuuden, kuin pienempien lämpöpumppujen osalta yksi käytetyimpiä kylmäaineita ja teollisuuskokoluokan lämpöpumppujen osalta sen korvaajaksi on todennäköisesti tulossa R1234ze. R1234ze:ssä on kuitenkin vielä saatavuusongelmia ja esimerkiksi vuonna 2021 sen valmistustehtaan sijainnin yli pyyhkäisi hurrikaani, joka keskeytti tuotannon ja näin ollen kylmäaineen toimitukset viivästyivät merkittävästi (NY Times 2021). Tämä toi esille sen, kuinka haavoittuvia kylmäainemarkkinat ovat tällä hetkellä ja sen myötä alkaa tulla lieveilmiöitä, mm. laittomien kylmäaine-erien ilmestyminen (Seinelä 2018).

F-kaasuasetuksen ennestään asettamat ja sen päivityksen myötä tulevat tiukemmat rajoitukset ja kiellot tulevat mitä luultavammin kasvattamaan luonnollisten kylmäaineiden käyttöä tulevaisuudessa, mutta tällä hetkellä kylmäaineita käyttävien sovellusten osalta tunnutaan menevän vuosi kerrallaan. Pitkän tähtäimen päätöksiä ei vielä tehdä, vaan odotetaan, että päästään lähemmäs vuotta 2030 ja mennään mahdollisimman pitkälle nykyisillä mahdollisilla kylmäaineilla ja niiden regeneroinnilla sekä huoltojen sallimien rajoitusten puitteissa.

3.3 Yleistä

Kylmäaineet voidaan jakaa niiden ominaisuuksien perusteella hiilivetyihin ja luonnollisiin kylmäaineisiin. Taulukossa 2 on annettu esimerkit tyypillisistä/yleisimmistä kylmäaineesta kustakin kategoriasta ja niiden tyypillisimmät ominaisuudet.

Taulukko 2. Eri kylmäaineiden ominaisuuksia (SFS-EN 378-1:2016+A1:2020)

		Kylmäaineen numero	Kemiallinen kaava	Turvallisuus luokka	PED sisältöryhmä	GWP (100 vuoden ajanjakso)	ODP
Hiilivedyt	CFC	R12	CCl2F2	A1	2	10 900	1
	HCFC	R22	CHClF2	A1	2	1 810	0,055
	HFC	R134a	CH2FCF3	A1	2	1 430	0
	HFO	R1234ze	CF3CF = CHF	A2L	2	7	0
Luonnolliset kylmäaineet	HC	R600 (butaani)	CH3CH2CH2CH3	A3	1	4	0
	IC	R717 (ammoniakki)	NH3	B2L	1	0	0

CFC kylmäaineilla tarkoitetaan täysin halogenoituja kloorifluorihiilivetyjä, jotka sisältävät klooria, fluoria ja hiiltä. CFC-aineiden otsonihaitallisuuskerroin tulee kylmäaineesta R11, jonka ODP on asetettu 1:ksi sen otsonikerrosta tuhoavan ominaisuuden vuoksi (Hundy 2016, s.45). CFC-aineen R12 lämmityspotentiaali on erittäin korkea, yli 10 000. R12 kylmäaineella onkin oman ryhmänsä korkein lämmityspotentiaali. CFC-aineiden käyttö on kielletty uusissa kylmälaitteissa sekä huollossa.

HCFC kylmäaineilla tarkoitetaan osittain halogenoituja kloorifluorihiilivetyjä. Näillä aineilla on huomattavasti pienempi otsonin haitallisuuskerroin, mutta ei kuitenkaan täysin nolla. Myös lämmityspotentiaali on alhaisempi, kun CFC-aineilla. HCFC-aineiden käyttö on kielletty uusissa kylmäaineissa ja nykyään myös huollossa.

HFC kylmäaineet ovat halogenoituja fluorihiilivetyjä, joiden otsonihaitallisuus on nolla, mutta lämmityspotentiaali edelleen melko korkea. HFC aineiden käyttö uusissa laitteissa tai huolloissa ei pääosin ole vielä kielletty, mutta F-kaasuasetus on määrännyt joillekin laitteille (mm. kotitalouksien jääkaapit, kaupalliseen käyttöön tarkoitetut jääkaapit ja pakastimet) vuodesta 2020 alkaen maksimi GWP-arvon, joka rajoittaa näiden kylmäaineiden käyttöä kyseisissä sovelluksissa.

HFO aineet eli halogenoidut fluorihiiliolefiinit, joiden otsonihaitallisuus on nolla ja lämmityspotentiaali alhainen. HFO aineille ei tätä työtä kirjoitettaessa ole asetettu rajoituksia tai kieltoja, mutta niitä on odotettavissa päivitysten myötä.

HC kylmäaineet ovat hiilivetyjä eli luonnollisia kylmäaineita. Näiden otsonihaitallisuus on nolla ja lämmityspotentiaali nolla tai lähes nolla. Yleisimmät hiilivedyt ovat isobutaani ja propaani. Luonnolliset kylmäaineet eivät kuulu f-kaasuasetuksen piiriin.

IC eli epäorgaaniset yhdisteet, jotka ovat myös luonnollisia kylmäaineita. Näiden otsonihaitallisuus on nolla ja lämmityspotentiaali nolla tai lähes nolla. Yleisimmät epäorgaaniset yhdisteet ovat ammoniakki ja hiilidioksidi. (Kapanen, 2017).

PED sisältöryhmä määritellään myös CLP-asetuksessa vaarallisen sisällön, eli ryhmän 1 tai vaarattoman sisällön eli ryhmän 2 aineisiin. Ryhmän 1 aineet käsittävät sisällöltään räjähtäviksi, erittäin helposti syttyviksi, helposti syttyviksi tai syttyviksi sekä erittäin myrkyllisiksi, myrkyllisiksi tai hapettavaksi luokiteltavat aineet ja ryhmään 2 kuuluu kaikki muut aineet, jotka ei kuulu ryhmään 1.

Turvallisuusluokalla tarkoitetaan kylmäaineen vaaraluokitusta EU:n CLP- asetuksen (EY N:o 1272/2008) mukaan. Luokitukset löytyvät standardeista ISO 817 sekä EN 378, johon ne on jaoteltu syttyvyyden ja myrkyllisyyden perusteella kahdeksaan luokkaan, taulukko 3.

Taulukko 3. Kylmäaineiden turvallisuusluokat syttyvyyden ja myrkyllisyyden perusteella (ISO 817)

Syttyvyys	**Turvallisuusluokka**	
	Alhaisempi myrkyllisyys	Korkeampi myrkyllisyys
Korkeampi syttyvyys	A3	B3
Syttyvä	A2	B2
Alhaisempi syttyvyys	A2L	B2L
Ei syttyvä	A1	B1

4 Lämpöpumppujen lainsäädäntö

Lämpöpumppujen valmistuksessa sekä käytössä on otettava huomioon sen käytön vaatimat turvallisuuteen liittyvät lait ja asetukset. Näistä olennaisimpina tässä työssä nostetaan esille painelaitteiden lainsäädäntö sekä kylmälainsäädäntö, jota kylmäaineiden osalta jonkun verran edellisessä kappaleessa käsiteltiin. Tässä osiossa keskitytään enemmän lämpöpumppuja koskeviin velvoitteisiin omistajan ja käyttäjän näkökulmasta.

4.1 Painelaitteet

4.1.1 Voimassa olevat lait ja asetukset

Seuraavat lait ja asetukset määrittävät lämpöpumppujen valmistusta ja käyttöä.

- Painelaitelaki 1144/2016
- Asetus kattilalaitosten käytönvalvojien pätevyyskirjoista 891/1999
- Valtioneuvoston asetus painelaitteista 1548/2016
- Valtioneuvoston asetus painelaiteturvallisuudesta
- Valtioneuvoston asetus yksinkertaisista painesäiliöistä 1550/2016 (Kapanen, 2023)

4.1.2 Painelaitedirektiivi PED 2014/68/EU

Teollisuuskokoluokan lämpöpumpuissa saattaa olla rekisteröitäviä painelaitteita. Käytännössä lämpöpumppujen painelaitteilla tarkoitetaan lämmönvaihtimia. Rekisteröitäviä ne ovat, mikäli suurimman sallitun käyttöpaineen ja tilavuuden tulo ylittää 3000 baarilitraa vaarattomilla kylmäaineilla ja 1000 baarilitraa vaarallisilla kylmäaineilla (PED 2014). Sisällöltään vaarattomat aineet kuuluvat direktiivin mukaan ryhmään 2 ja vaaralliset kemikaaliasetuksen 675/1993 mukaan ryhmään 1. Kylmäaineiden vaarallisuusluokitusta varten sisältöryhmät löytää standardin SFS-EN 378-1 liitteestä E.

Painelaitteen käyttäjän ja omistajan tulee rekisteröitävien painelaitteiden osalta huolehtia mm. painelaitteen sijoitussuunnitelman tarkastuttamisesta, painelaitteen rekisteröinnistä, käytönvalvojan sekä varavalvojan nimeämisestä ja määräaikaistarkastuksista sekä kunnossapidosta. (Tukes, 2023a).

Suoraan PED ei ota tähän asiaan kantaa, mutta painelaitteen hankintavaiheessa on tärkeää ottaa huomioon turvallisuusvaatimukset ja määrittää hankinta-asiakirjoihin vaaditut standardit sekä painelaitelain ulkopuolelle jäävät, halutut painelaitteisiin liittyvät asiakirjat. Painelaitedirektiivin mukaan käyttäjälle on toimitettava ainoastaan käyttöohjeet, joista selviää turvallisuuden kannalta olennaiset asiat ja painelaitelain mukaan painelaitteesta on toimitettava EU-vaatimustenmukaisuusvakuutus.

Rekisteröimättömiä painelaitteita koskee painelaitelain yleiset turvallisuusvaatimukset, ja käytännössä nämä eivät poikkea paljon rekisteröitävien painelaitteiden vaatimuksista. Esimerkiksi sijoitussuunnitelmaa ei arvioi hyväksytty tarkastuslaitos, mutta omistajan on varmistuttava painelaitteen turvallisesta sijoittamisesta riskiarvioinnin avulla (Tukes, 2011). Kunnossapitotarkastukset tulee rekisteröimättömille painelaitteille tehdä myös määräajoin.

4.1.3 Muut huomioon otettavat standardit

EN 13445 lämmittämättömät painesäiliöt

Standardin 5 osaa määrittelee vaatimukset lämmittämättömien paineastioiden materiaaleille, suunnitteluun, valmistukseen sekä tarkastukseen ja testaukseen. Lämmittämättömillä paineastioilla tarkoitetaan paineenalaisia astioita, joiden suurin sallittu paine on suurempi, kuin 0,5 bar ylipainetta, ja jotka eivät ole kosketuksissa liekin kanssa tai kuulu polttoprosessiin, joten tätä standardia sovelletaan lämpöpumppujen lämmönvaihtimien valmistukseen, mutta ei ota kantaa siihen liitettävien putkistojen valmistukseen.

EN 14276 Kylmäkoneistojen ja lämpöpumppujen painelaitteet

Tämä standardi on nimensä mukaisesti suunnattu kylmäkoneiden ja lämpöpumppujen paineastioille ja tunnistaa kylmäkoneiden paineastioiden eritystarpeet. Standardi koostuu

kahdesta osasta: ”Osa 1: Säiliöt. Yleiset vaatimukset” ja ”Osa 2: putkistot. Yleiset vaatimukset.” Paineastioilla tämän standardin mukaan tarkoitetaan paineenalaisia astioita, joiden sisäinen paine on alimmillaan -1 bar. Tämä standardi on standardin EN 13445 vertainen, mutta usein näitä verrataan ristiin kohteen mukaan ja paineastia valmistetaan soveltuvimman mukaan

EN 13480 metalliset teollisuusputkistot

Tämä standardisarja käsittää kahdeksan osaa: ”Part 1: General (Suomenkielistä voimassa olevaa ei ole)”, ”Osa 2: Materiaalit”, ”Osa 3: Suunnittelu ja laskenta”, ”Osa 4: Valmistus ja asennus”, ”Osa 5: Tarkastus ja testaus”, ”Part 6: Additional requirements for buried piping (Suomenkielistä voimassa olevaa ei ole) ”, ”Part 7: Guidance on the use of conformity assessment (Suomenkielistä voimassa olevaa ei ole) ”, ”Part 8: Additional requirements for aluminium and aluminium alloy piping (Suomenkielistä voimassa olevaa ei ole) ”. Standardia käytetään teollisuuden kohteisiin tulevien lämpöpumppujen paineenalaisten (suurin sallittu paine on suurempi, kuin 0,5 bar ylipainetta) metallisten putkistojen sekä niiden kannakoinnin valmistamiseen turvallisesti. Putkistoon, jonka suurin sallittu paine on suurempi, kuin 0,5 bar ylipainetta sovelletaan tätä standardia ja mikäli paine on sen alle, valmistus tehdään hyvän konepajankäytännön mukaan. Hyvä konepajakäytäntö tarkoittaa PED soveltamisohjeiden mukaan: ”painelaitteet suunnitellaan ottaen huomioon kaikki niiden turvallisuuteen vaikuttavat asiaankuuluvat tekijät. Lisäksi se tarkoittaa, että painelaite valmistetaan, tarkastetaan ja toimitetaan käyttöohjeineen, siten että sen turvallisuus on taattu aiotun käyttöiän ajan, kun sitä käytetään ennakoitavissa tai kohtuullisesti ennakoitavissa olosuhteissa.” (PED soveltamisohje I-01: Hyvä konepajakäytäntö, s.218).

Energiateollisuuden julkaisu K1: Rakennusten kaukolämmitys, Määräykset ja ohjeet

Ohjeisiin on koottu kaukolämpöasiakkaiden rakennusten lämmityksen teknisen toteutuksen lainsäädäntö.

4.2 Kylmälainsäädäntö

4.2.1 F-kaasuasetus ja tuleva päivitys

F-kaasuasetuksessa määritetään (fluorattujen kasvihuonekaasujen) kylmäaineiden käyttöä, huoltoa, vuotojen estämistä, käytönvalvontaa, vähentämistä sekä pätevöitymistä koskevat rajoitteet.

Teollisuuskokoluokan lämpöpumpuissa käytettävien kylmäaineiden osalta F-kaasuasetus rajoittaa tällä hetkellä GWP- arvoltaan 2500 tai yli olevien HFC-aineiden käyttöä siten, että niiden käyttö on kielletty vuodesta 2020 lähtien uusissa laitteissa ja vuodesta 2030 lähtien huolloissa. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että uusia teollisuuden lämpöpumppuja hankkiessa tulee määrittää matalan GWP-arvon kylmäaine ja omistuksessa olevien lämpöpumppujen vaihtamista matalan GWP- arvon kylmäaineelle kannattanee alkaa jo suunnittelemaan.

F-kaasuasetus edellyttää myös vuotojen estämistä mm. vuototarkastuksilla sekä vuotojen havaitsemisjärjestelmillä riippuen kylmäainetäytöksestä (joka tarkoittaa yhdessä laitteen piirissä olevaa kylmäainemäärää) ja sen vastaavasta kasvihuonekaasupäästön määrästä (hiilidioksidiekvivalenttitonni). Taulukossa 4 on kerrottu täytösten ja päästöjen rajat ja niihin liittyvät vuodontarkastukset.

Taulukko 4. F-kaasuasetuksen mukaiset vuodontarkastusten aikavälit

Kasvihuonekaasupäästö [t CO_2-ekv.]	**Tarkastusväli [kk]**	**Tarkastusväli, jos vuotojen havaitsemisjärjestelmä asennettu [kk]**
5 ≤ 50	12	24
50 ≤ 500	6	12
≥ 500	3	6

Vuotojen havaitsemisjärjestelmä, joka antaa mahdollisesta vuodosta hälytyksen laitteen haltijalle tai huoltavalle taholle, tulee asetuksen mukaan asentaa laitteisiin, joiden kylmäaineet sisältävät vähintään 500 t CO_2 -ekv.

Hiilidioksidiekvivalenttitonnimäärä lasketaan kertomalla kylmäaineen määrä tonneissa sen GWP-arvolla. Taulukossa 5 on kerrottu muutaman kylmäaineen osalta määrät, joiden ylittyessä tulee asentaa vuotojen havaitsemisjärjestelmä.

Taulukko 5. Vuotojen havaitsemisjärjestelmän asennusrajoja eri kylmäaineille

Kylmäaine	**GWP arvo**	**500 t CO2-ekv. täytösraja**
R450a	604,7	826,9 kg
R134a	1 430	349,7 kg
R1234ze	7	71 428,6 kg

Kaikista laitteista, jotka sisältävät f-kaasuja, on pidettävä huoltopäiväkirjaa, joka sisältää tiedot laitteen sisältämästä kylmäaineesta ja sen määrästä, huoltojen aikana tehdyt kylmäaineen lisäykset tai poistot ja mistä lisätyt tai poistetut kylmäaineet on saatu/kierrätetty (regeneroitua vai uutta). Päiväkirjaan myös merkitään kaikki tehdyt huoltotoimenpiteet ja ajankohdat sekä niiden suorittajan tiedot, ml. pätevyys. Mikäli laite poistetaan käytöstä, tulee sekin kirjata päiväkirjaan.

F-kaasuasetus määrittää myös sen, että f-kaasuja ostavilla yrityksillä on oltava Turvallisuus ja -kemikaaliviraston antama pätevyys toiminnanharjoittamiseen. Pätevyyksistä kerrotaan pätevyysasetus- kappaleessa tarkemmin.

(F-kaasuasetus 2014).

F-kaasuasetukseen on tulossa päivitys, jonka EU Komission ilmastoasioiden pääosasto on aloittanut vuonna 2020. Uudelleentarkastelun myöstä on näillä näkymin tulossa muutoksia mm. seuraavien osalta:

- Montrealin pöytäkirjassa on tällä hetkellä tiukemmat f-kaasujen kiintiöiden vähennystavoitteet, kun vuoden 2014 f-kaasuasetuksessa. Uudelleen tarkastelun myötä f-kaasuasetus yhdenmukaistettaisiin Montrealin pöytäkirjan kanssa

- kiellettyjen kylmäaineiden määrän laajentaminen. Kiellot koskisivat laitteita, joissa HFC-aineiden käyttö ei ole välttämätöntä ja korvaavia kylmäaineita on käytetty jo vastaavissa sovelluksissa. Joltain osin kieltolaajennus koskisi myös HFO-aineita

- Nykyisessä f-kaasuasetuksessa huoltokielto koskee vähintään f-kaasun 40 t CO2 täytösmäärällä varustettuja laitteita. Uudelleentarkastelussa tämä vähimmäisraja poistettaisiin ja huoltokielto koskisi kaikkia täytösmääriä, mukaan lukien lämpöpumput, jäähdytyslaitteet sekä aikaisemmasta vapautetut (armeija ja – 50 °C) laitteet

- kylmäaineiden laiton maahantuonti on vilkastunut hintojen nousun myötä. Uudelleen tarkastuksessa ehdotetaan markkinavalvonnan, käytännössä viranomaisten ja tullin, vahvistamista sekä lisää määräyksiä kylmäaineita myyville ja välittäville yrityksille

- pätevyyksien osalta uudelleentarkastelussa otettaisiin huomioon myös luonnolliset kylmäaineet, joihin nykyinen asetus ei ota kantaa

Alun perin f-kaasuasetuksen päivityksen piti astua voimaan vuoden 2022 lopussa, mutta se ei toteutunut ja näillä näkymin se hyväksyttäisiin vasta vuoden 2024 aikana (Kapanen 2021).

4.2.2 Pätevyysasetus Vna 766/2016

Pätevyysasetuksessa määritetään f-kaasujen kanssa työskentelevien henkilöiden pätevyysvaatimukset.

Asetuksessa säädetään Tukesin rekisterin mukaisen toiminnanharjoittajan vastuuhenkilön seuraavat taulukon 6 mukaiset pätevyysvaatimukset, jotka koskevat kiinteitä jäähdytys-, ilmastointi- ja lämpöpumppulaitteita ja pätevyyttä edellyttäviä toimia, mm. asennus, kunnossapito, huolto, korjaaminen, käytöstä poistaminen ja talteenotto.

Taulukko 6. Kylmäalan vastuuhenkilön pätevyystaulukko (Tukes, Henkilöpätevyydet ja pätevyysvaatimukset)

Vähintään kolme kiloa kylmäainetta sisältävät laitteet	**Alle kolme kiloa kylmäainetta sisältävät laitteet**
vähintään kahden vuoden työkokemus kylmäalalta	yhden vuoden tekninen työkokemus esimerkiksi lvi-, putki- tai sähköasennustöistä
kylmäalalle soveltuva teknikon, insinöörin tai diplomi-insinöörin tutkinto	tutkinnon osa kylmäaineiden käsitteleminen (talotekniikan ammattitutkinto, kylmäasennuksen osaamisala) suoritettuna
kylmäasentajan ammattitutkinto	tutkinnon osa lämpöpumppujen asentaminen ja huoltaminen (talotekniikan ammattitutkinto, lämmitys-laiteasennuksen osaamisala) suoritettuna
kylmämestarin erikoisammattitutkinto	tutkinnon osa kylmäteknisten laitteiden asennus-, huolto- ja korjaustyöt (kotitalouskoneasentajan ammattitutkinto) suoritettuna

Vastuuhenkilön tehtäviin kuuluu vastata toiminnanharjoittajan osalta ympäristönsuojeluvaatimusten noudattamista sekä asentajien pätevyyksistä. Vastuuhenkilö ei kuitenkaan voi tehdä asennus-, huolto-, kunnossapito- tai korjaustöitä ilman, että hänellä on myös asentajan pätevyys.

Asentajan (tai henkilön) pätevyysvaatimukset, jotka koskevat kiinteitä jäähdytys-, ilmastointi- ja lämpöpumppulaitteita, kylmäkuljetuskuorma-autojen ja kylmäkuljetusperävaunujen jäähdytysyksiköitä, laivojen ja vesialusten jäähdytys-, ilmastointi- ja lämpöpumppulaitteita, on kerrottu taulukossa 7.

Taulukko 7. Kylmäalan asentajan pätevyystaulukko (Tukes, kylmäala, Henkilöpätevyydet ja pätevyysvaatimukset)

Vähintään kolme kiloa kylmäainetta sisältävät laitteet	**Alle kolme kiloa kylmäainetta sisältävät laitteet**
kylmäasentajan ammattitutkinto (talotekniikan at; kylmäasennuksen osaamisala)	kylmäteknisten laitteiden asennus-, huolto- ja korjaustyöt (kotitalouskoneasentajan ammattitutkinto)
kylmäasentajan ammattitutkinnosta vähintään tutkinnon osat kylmäaineiden käsitteleminen sekä 1 valinnainen asennus- ja huolto-osa (5 vaihtoehtoista erikoistumisalaa)	lämpöpumppujen asentaminen ja huoltaminen (talotekniikan ammattitutkinto, lämmitys-laiteasennuksen osaamisala)
talotekniikan perustutkinnosta osat kylmäkomponenttien ja putkiston asentaminen sekä kylmälaitoksen käyttöönottaminen	pienkylmälaitteiden ja ilmalämpöpumppujen asennus (talotekniikan perustutkinto, putkiasennuksen osaamisala

Asentajan pätevyydet suorittanut henkilö voi tehdä f-kaasuja sisältäville kylmälaitteille asennus-, kunnossapito-, huolto- ja korjaustöitä, käytöstä poistoja, vuototarkastuksia sekä kylmäaineiden talteenottoja (Pätevyysasetus 2016).

4.2.3 EN-378 Kylmäkoneistot ja lämpöpumput

Standardi *SFS-EN 378 Kylmäkoneistot ja lämpöpumput. Turvallisuus- ja ympäristövaatimukset* käsittää 4 osaa, joista ensimmäinen käsittelee perusvaatimuksia, määritelmiä, luokitusta ja valintakriteereitä. Käytännössä laitteiden omistajan kannalta tässä osassa kiinnostavia ovat oleskelutilojen pääsyluokat (mikäli kylmälaite sijoitetaan muualle, kuin konehuoneeseen), kylmäkoneiston sijaintipaikan luokittelu, täytösrajoja koskevat vaatimukset, kylmäaineiden nimitykset ja luokittelu, turvaluokitus ja tiedot sekä kylmähuoneissa työskentelevien ihmisten suojelu. Näiden tietojen avulla määritetään jo mahdollisen kylmälaitteen hankintaa suunnitellessa, mihin laite voidaan vai voidaanko ollenkaan turvallisesti asentaa, millä kylmäaineella sekä minkälaiseen tilaan.

Standardin osa 2: Suunnittelu, rakenne, testaus, merkintä ja dokumentointi määrittää kylmälaitteeseen liittyvien putkistojen ja apulaitteiden turvallisuusvaatimuksia, asettaa

vaatimukset laitekokonaisuuksille, testauksille, käyttöönotolle sekä vaadittavalle dokumentaatiolle.

Osassa 3: Asennuspaikka ja henkilökohtainen suojaus, löytyy kaikki tarvittava, kun aletaan suunnittelemaan ja asentamaan kylmälaitetta lopulliseen sijaintiin. Osassa määritetään laitteiden sijoittamisen vaatimukset, kuten ilmanvaihto, valaistus, hätätilanteen vaatimukset, samaan tilaan sijoitettavien asioiden vaatimukset, sähköasennukset- ja laitteet, kylmäainehaistelijoiden vaatimukset. Vaadittavat henkilösuojaimet, niiden sijoittaminen, kunnossapito ja sopivuus löytyy myös. Omistajan on velvoitettava ja valvottava, että laitteen toimittava ja asentava taho sekä sijoituspaikkaan rakentava tai ylläpitävä taho noudattaa tätä standardin osaa.

Standardin osa 4 käsittelee kylmälaitteen käyttöä, huoltoa ja korjausta sekä kylmäaineen talteenottoa. Osassa määritetään kylmälaitteen käytön ohjeistaminen sekä käytönaikainen ylläpidettävä dokumentaatio, miten turvallinen kunnossapito- ja korjaus suoritetaan (mm. kylmäainetyypin vaihto) ja kylmäaineen talteenottoa, uudelleenkäyttöä ja hävittämistä koskevat vaatimukset. Tästä osasta löytyy myös öljyn tyhjentämisen vaatimukset sekä kylmäaineen vaatimusten mukainen käsittely ja varastointi. Osan liite D kertoo käytönaikaisen tarkastuksen vaatimukset ja syttyviä kylmäaineita sisältävien laitteiden korjausten erityisohjeet.

(SFS-EN 378).

4.2.4 REACH-asetus 1907/2006 ja tuleva mahdollinen rajoitus

Reach-asetus tarkoittaa Euroopan parlamentin ja neuvoston asetusta kemikaalien rekisteröinnistä, arvioinnista, lupamenettelyistä ja rajoituksista. Suomessa Tukes toimii REACH-asetuksen toimivaltaisena viranomaisena ja valvoo siten kemikaalien osalta, aiheuttavatko ne riskejä terveydelle tai ympäristölle ja raportoi tiedot Euroopan kemikaalivirastoon, ECHAan. Käytännössä tämä asetus liittyy kylmälaitteisiin ja tarkemmin teollisuuden lämpöpumppuihin siten, että laitteissa käytettävät kylmäaineet tulee olla valmistajan puolelta rekisteröityjä sekä niistä kuuluu olla käyttöturvallisuustiedote olemassa ja toimitettuna omistajalle.

Kylmälaitteen omistaja käsitetään REACHin kannalta jatkokäyttäjänä ja jatkokäyttäjiä koskee mm. seuraavat velvollisuudet: käyttöturvallisuustiedotteessa esitettyjen asioiden tarkastaminen ja siinä annettujen turvallisen käytön ohjeiden ja riskienhallinnan noudattaminen. Joissain poikkeustapauksissa jatkokäyttäjän tulee laatia kemikaalista kemikaaliturvallisuusarviointi, mutta lämpöpumpuissa kylmäaineiden osalta tätä vaatimusta ei yleensä ole, sillä käyttö ei poikkea maahantuojalta saadun käyttöturvallisuustiedotteen altistumisskenaarioista.

REACH-asetus ei vaikuta muihin kemikaali- tai työturvallisuuslakeihin- ja asetuksiin, vaan toimii niiden rinnalla.

(Laitinen et al. 2008, ECHA 2023)

Esitys PFAS yhdisteitä sisältävien aineiden rajoittamisesta

Neljä EU:n jäsenvaltiota: Tanska, Saksa, Ruotsi ja Alankomaat sekä Norja ovat jättäneet ECHAlle ehdotuksen PFAS-aineiden rajoituksesta vuoden 2023 alussa. Ehdotus rajaisi PFAS-yhdisteitä sisältävien aineiden valmistusta, markkinoille saattamista sekä käyttöä. Osa f-kaasuista sisältävät näitä PFAS-yhdisteitä.

PFAS-yhdisteillä tarkoitetaan per- ja polyfluorattuja alkyyliyhdisteitä eli hiilivetyketjuja, joiden kaikki vetyatomit tai osa on korvattu fluorilla. Kestävän hiili-fluorisidoksen takia PFAS-yhdisteet hajoavat ympäristössä erittäin hitaasti. (THL, 2023). PFAS-yhdisteitä käytetään kylmäaineiden lisäksi monissa päivittäisissäkin tuotteissa, kuten vaatteissa, paistinpannuissa, kosmetiikassa ja sammutusvaahdoissa (Ruokavirasto, 2023).

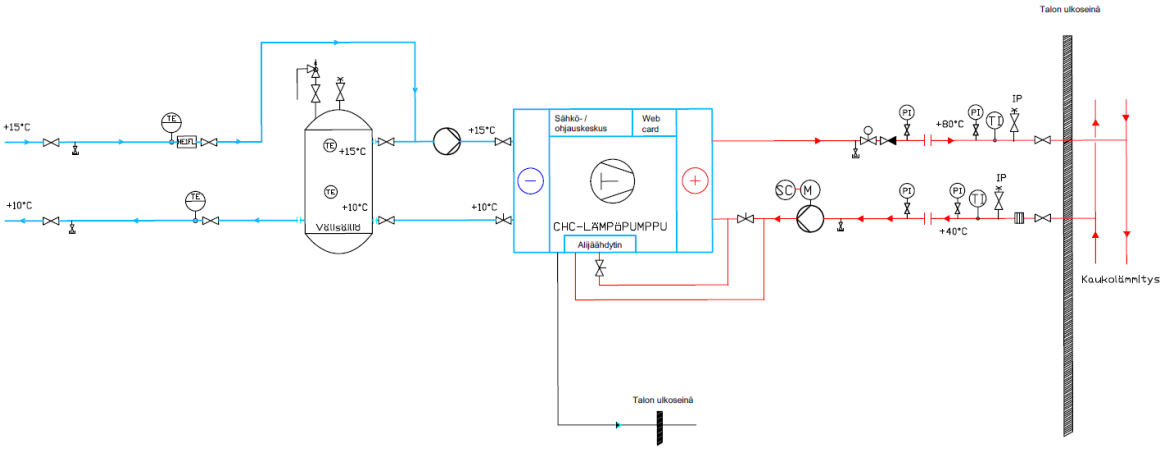
Ehdotuksen rajausten mukaan PFAS-yhdisteille tulisi täyskielto siitä lähtien, kun asetus astuisi voimaan, näillä näkymin vuonna 2025. Mm. seuraavat kylmäaineet sisältävät näitä yhdisteitä: R404a, R410a) R134a, R1234yf, R1234ze sekä näiden aineiden seokset. (Restriction report, Annex XV 2023, s. 248). Tämän tyyppinen täyskielto toisi isoja vaikutuksia lämpöpumppumarkkinoille ja käyttäjille. Ehdotuksessakin taitaa olla mainittu, että mikäli käytettävä kemikaali on välttämätön, esimerkiksi turvallisuuden takia, tai jos korvaavia aineita ei ole saatavilla, voidaan jotain poikkeuksia sallia. Lämpöpumppujen osalta tämä ei taida tulla kyseeseen, koska kylmäaineita löytyy esimerkiksi myös luonnollisena.

5 CHC - kytkennät

CHC on lyhenne sanoista combined heating and cooling, joka tarkoittaa yhdistettyä lämmön ja jäähdytyksen tuotantoa. Tässä raportissa keskitytään CHC-lämpöpumppuihin, joilla tuotetaan esimerkiksi liikekiinteistöihin lämpöä ja jäähdytystä. Nämä lämpöpumput vaihtelevat lämmitysteholtaan muutamasta sadasta kilowatista maksimissaan muutamaan megawattiin, riippuen kohteesta. Seuraavissa kappaleissa käydään läpi muutamat eri CHC-kytkentätyypit.

5.1 Perus CHC- kytkentä

Peruskytkennällä tässä raportissa tarkoitetaan CHC-lämpöpumppua, joka on kytketty lauhdutinpuoleltaan kl-verkkoon ja höyrystinpuoleltaan kiinteistön/asiakkaan jäähdytyspiiriin. Kiinteistön jäähdytysverkon lämpimältä puolelta tulee höyrystimelle esimerkiksi n. 15 asteinen vesi, joka viilennetään n. 10 asteiseksi lämpöpumpun avulla. Näin saadaan otettua jäähdytyspiiristä lämmöt talteen ja ajettua kaukolämpöverkkoon 80 asteista vettä. Kuvassa 3 sininen osuus kuvaa kiinteistön/asiakkaan pään liitäntää lämpöpumpun höyrystinpiiriin ja punainen osuus lauhdutinpuolen liitäntää kaukolämpöverkkoon.



Kuva 4. CHC-lämpöpumpun peruskytkentä

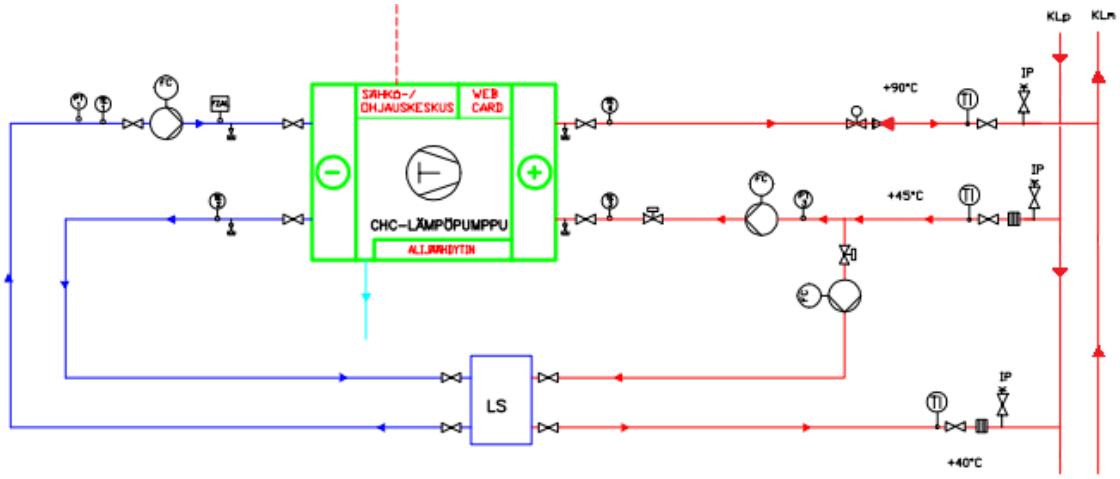
Peruskytkennässä lämpöpumpulla tuotetaan kaukolämpöä niinä aikoina, kun kiinteistöllä/asiakkaalla on tarve saada jäähdytystä. Tämä osuu yleensä kesäaikaan, jolloin CHC-lämpöpumppujen käyttöaika peruskytkennällä rajoittuu n. 500 tuntiin vuodessa.

5.2 CHC boosterikytkentä

Boosterikytkentä tai Netbooster-kytkentä CHC-kohteessa tuottaisi samaan tapaan jäähdytystä asiakkaan jäähdytyspiiriin ja kaukolämpöä verkkoon jäähdytystarpeen aikana, mutta siinä olisi mahdollisuus tuottaa lämpöä verkkoon myös silloin, kun kiinteistökohteessa ei ole jäähdytystarvetta, ottamalla kaukolämpöverkon paluupuolesta normaalisti jäähdytyspiiristä saatava hukkalämpö. Liitteessä 1 näkyy CHC-netboosterin kytkentätapaehdotus olemassa olevaan kiinteistölämpöpumppuun: siinä sininen puoli kuvaa jälleen asiakkaan jäähdytyspuolta höyrystinpiirissä ja punainen kaukolämpöverkon puolta lauhdutinpiirissä. Lisäksi siinä on kl-verkon paluupuolelta otettu haara levylämmönsiirtimelle, jossa 45 asteisesta paluuvedestä otetaan lämpöä talteen höyrystinpiiristä otetulle haaralle. Matala-asteisempi kaukolämmön paluuvesi palautettaisiin takaisin verkkoon paluupuolelle ja höyrystinpiiriin talteen otettu lämpö lämpöpumpun avulla kl-verkon menopuolelle 90 asteisena.

5.3 Netbooster-kytkentä

Netbooster-lämpöpumppu on mahdollista myös liittää pelkästään boosteritoimintoa varten kaukolämpöverkon paluupuolelle ottamaan lämpö talteen ns. paluu-paluukytkennällä. Tässä tapauksessa tuotettaisiin jäähdytystä kaukolämpöverkon paluuputkeen ja lämpö otettaisiin talteen kaukolämpöverkon menoputkeen. Paluupuoli kytkettäisiin lämmönsiirtimen kautta lämpöpumpun höyrystinpiiriin ja lämpöpumpun lauhdutinpiiri samaan tapaan, kuin aikaisemmassakin tapauksessa.

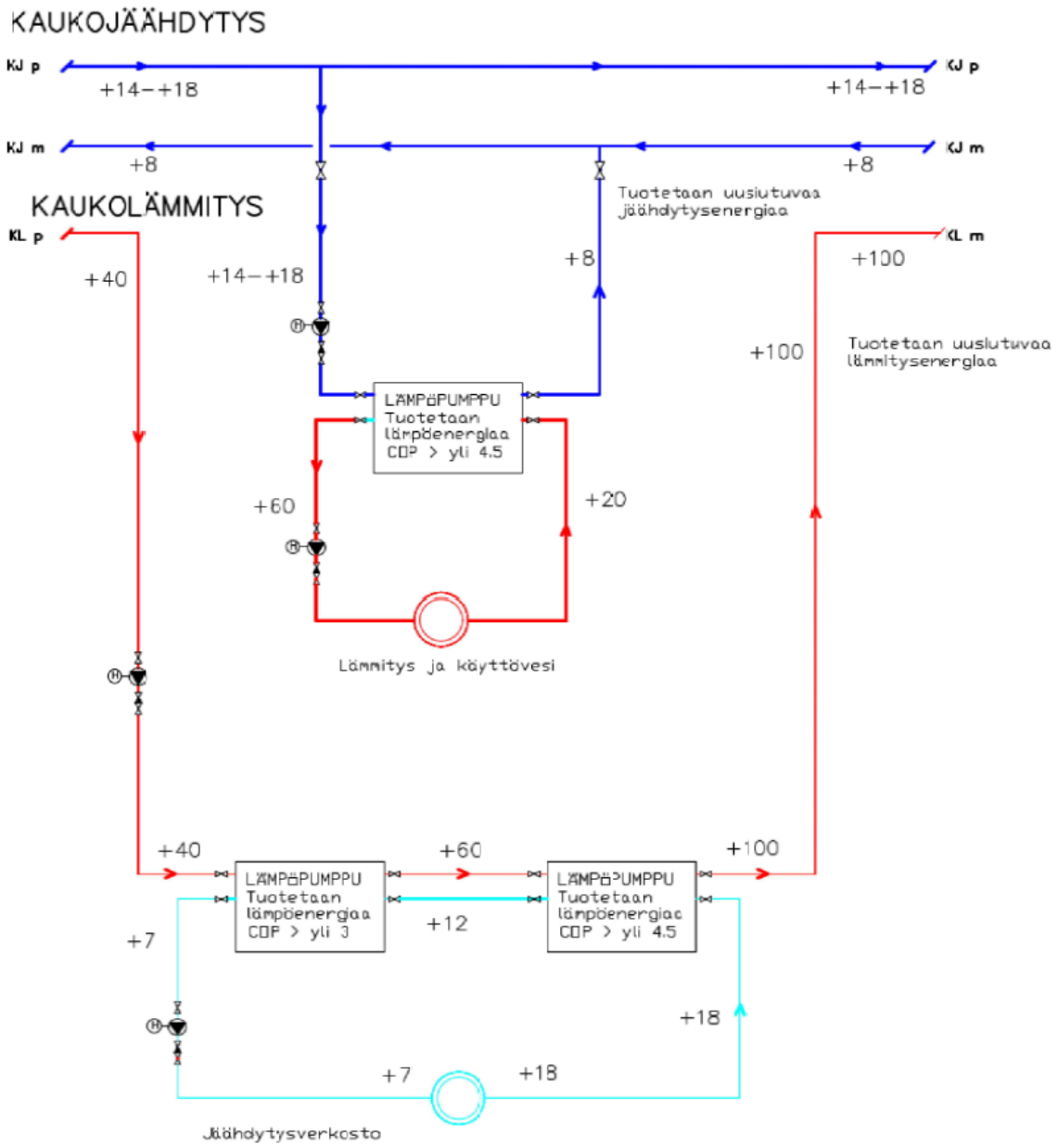


Kuva 5. Netbooster-lämpöpumppu, paluu-paluukytkennällä

5.4 Nelisuuntaiskytkentä

Tässä kytkentämallissa tuotettaisiin kaukolämpöä ja - jäähdytystä verkkoihin sekä asiakkaalle lämmintä käyttövettä sekä jäähdytystä. Kokonaisuus muodostuisi useammasta lämpöpumpusta:

- kaukojäähdytyksen lämpöpumppu, jolla otetaan hukkalämmöt talteen kaukojäähdytysverkon paluupuolelta höyrystinpiirissä, joka siirrettäisiin lauhdutinpiiriin, joka on kytketty asiakkaan lämmitys- ja käyttövesiverkostoihin
- kaukolämmityksen lämpöpumppumoduuli, jonka lauhdutinpiiristä tuotetaan asiakkaan jäähdytysverkosta talteen otetulla hukkalämmöllä lämpöä kaukolämpöverkkoon ja vastaavasti höyrystinpiiri tuottaa jäähdytystä asiakkaan jäähdytysverkostoon



Kuva 6. Lämpöpumppukokonaisuus nelisuuntaiskytkennällä

Tämän tyylinen kytkentä sopisi hyvin esimerkiksi isoon liiketilaan, jolloin jäähdytystarve olisi ympärivuotinen. Pienemmissä kohteissa lämpöpumput asiakkaan jäähdytysverkkoon toimisivat vaan kesäisin, mutta lämmitykselle ja käyttövedelle on ympärivuotinen tarve.

5.5 KJ-hybridikytkentä

Kaukojäähdytyksen hybridikytkennässä lämpöpumppu olisi liitetty asiakkaan jäähdytysverkkoon höyrystinpiiristä ja se tuottaisi lauhdutinpiiristä lämmintä käyttövettä asiakkaalle. Kesän helteillä jäähdytystä priimattaisiin kaukojäähdytysverkosta lämpöpumpun lisäksi. Kaukojäähdytyksen hybridikytkennän kaavio esitetty liitteessä 2.

Tämän tyyppisessä kytkennässä asiakkaan etu olisi se, että päästäisiin välttämään lämpöpumpun ylimitoitus kesähelteiden takia. Lämpöpumppu tuottaisi jäähdytykseen ja lämmitykseen peruskuormaa ympärivuotisesti ja helteiden aikana jäähdytysverkkoa priimattaisiin kaukojäähdytyksen avulla.

6 Vaikutus päästöihin

Joskus isojen kaupunkien kaukolämpöverkoissa lämpökeskuksia ajetaan lämpöverkon oikeiden lämpötilan (80-120 ℃) ja paineen (8-16 bar) osalta olosuhteiden ylläpitämiseen, vaikka varsinaista lämpötehon tarvetta ei olisi. Tämä tapa perustuu ns. kolmannen sukupolven kaukolämpöverkkoon, jossa lämmöntuotanto on ollut enemmän keskitetty isoihin yhteis- ja erillistuotantolaitoksiin, jotka sijaitsevat verkon laitamilla ja joiden tuotantoa tuetaan kylmempinä aikoina lämpökeskuksilla. Tämän raportin tapauksessa CHC-boostereilla korvattaisiin mahdollisesti näitä lämpökeskusten ajotilanteita, jolloin voidaan ajatella, että fossiilisten polttoaineiden käyttö vähenee siltä osin ja tätä kautta epäsuorasti CO2-päästöt vähenevät.

Seuraavan taulukon 8 laskennassa verrataan referenssikohteena olevan CHC-lämpöpumpun vuotuista lisäisen lämmön tuottoa megawattitunneissa tuotantolaitosten CO2- päästöihin. (Lisäisen lämmön periaatteet on kerrottu tarkemmin kappaleessa 8.1.5.) Lämpöpumpun on ajateltu käyvän vuoden ympäri, huollot huomioon ottaen. Tuotantolaitosten CO2-päästöjen osalta on selvitetty, kuinka paljon tulee päästöjä siitä polttoainemäärästä, jolla tuotetaan yksi megawattitunti kaukolämpöä. Vertailupolttoaineena on käytetty maakaasua, jonka päästökerroin on 0,2 tonnia CO2:sta MWh kohden ja tuottavina laitoksina on käytetty lämpökeskusta, jonka hyötysuhde on 0,9 luokkaa sekä yhteistuotantolaitosta, joista on suhteutettu kokonaistehon vaatima polttoainetarve lämmöntuotantoon. Vuodesta 2030 lähtien päästöt vähenevät, sillä tuotantomuodot muuttuvat hiilineutraalimmiksi. Tämä on huomioitu laskennassa. Tuotto on hieman vähäisempää vuosina 2030 ja 2037, sillä näille vuosille osuu kompressorihuollot, joka vähentää käyttötunteja.

Taulukko 8. CHC-lämpöpumppujen käytön vaikutus CO2-päästöihin

Vuosi	Lisäisen lämmön tuotto [MWh/a]	Korvattavan kaukolämmön päästökerroin / MWh [t CO2 / MWh_KL]	Vähenevien CO2 päästöjen määrä vuodessa [t CO2 / MWh_KL/a]
2024	4904	0,114	561
2025	4904	0,114	561
2026	4904	0,114	561
2027	4904	0,114	561
2028	4904	0,114	561
2029	4904	0,114	561
2030	4824	0,077	373
2031	4904	0,077	380
2032	4904	0,077	380
2033	4904	0,077	380
2034	4904	0,077	380
2035	4904	0,077	380
2036	4904	0,077	380
2037	4824	0,077	373
2038	4904	0,077	380
2039	4904	0,077	380

Laskennasta nähdään, että vuotuisten CO2- päästöjen määrä vähenee keskimäärin 443 t per megawattitunti kaukolämpöä. Vertailuna voidaan laskea yhden 50 MW lämpökeskuksen vuotuiset päästöt, jos ajateltaisiin sen käyttötuntien olevan n. 1000h/a ja sen käyvän jatkuvasti täydellä teholla, jolloin tuotannoksi tulee 50 000 MWh/a. Vuotuisiksi kokonaispäästöiksi vuoden 2024 päästöillä saadaan 5 700 t CO2. Yhdellä boosterilämpöpumpulla saataisiin vähennettyä edeltävän tyyppisen lämpökeskuksen päästöjä n. 10 %. Mikäli boosterilämpöpumppuja sijoitettaisiin kaukolämpöverkkoon enemmän ja optimaalisille paikoille, saavutettaisiin mitä luultavammin suuremmat päästövähenemät. Boosteripumppujen sijoittamista kokonaisuuden kannalta ei tässä työssä ole tarkemmin selvitetty, joten tämä saattaisikin olla hyvä jatkotutkimuksen aihe.

7 KL-verkon paluulämpötilan laskun vaikutukset

Kaukolämpöveden paluulämpötila vaikuttaa moneen asiaan kaukolämpöverkon, tuotantolaitosten ja loppukäyttäjien kokonaisuudessa. Seuraavissa kappaleissa kerrotaan perinteisestä pohjoismaisesta suuren kaupungin (esimerkiksi Helsinki ja Tukholma) kaukolämpöverkosta sekä matalamman paluulinjan lämpötilan mahdollisista vaikutuksista tämän tyyppiseen kaukolämpöverkkoon.

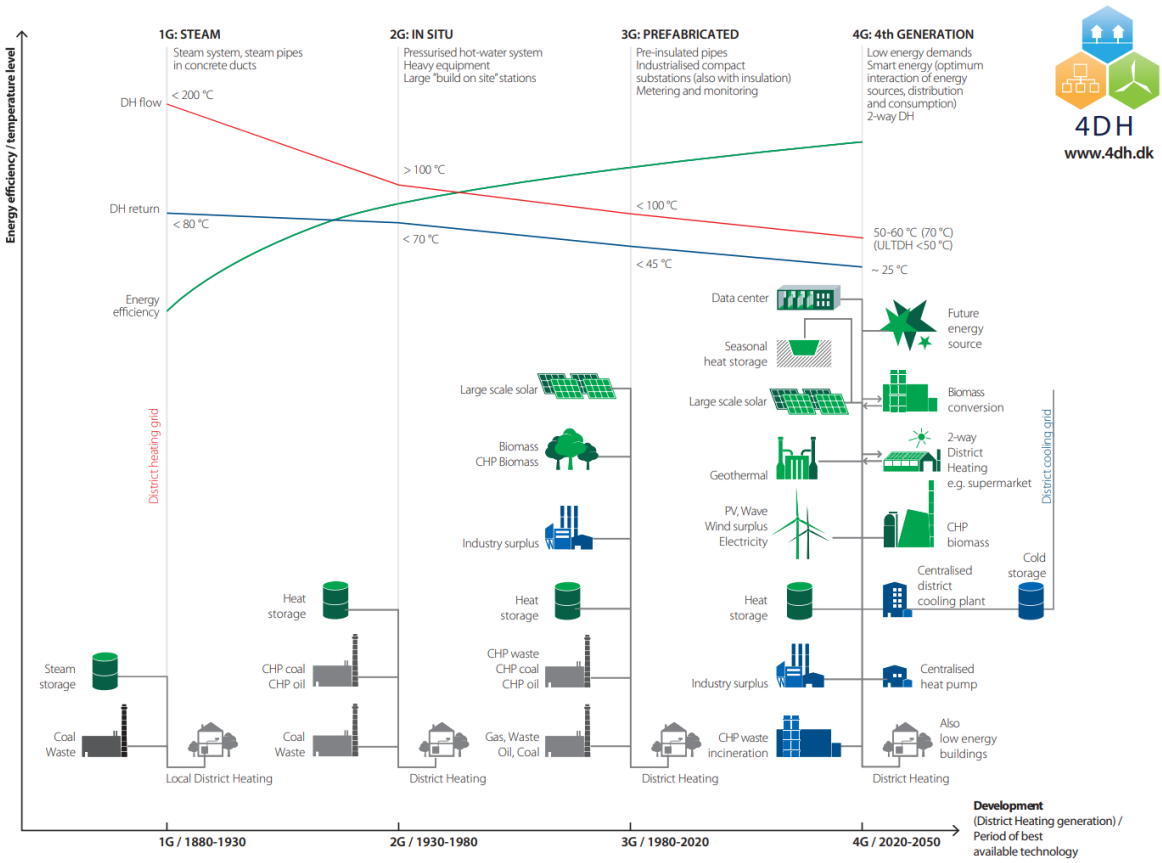
Seuraavassa kappaleessa ja kuvassa 7 tuodaan myös esille kolmannen ja neljännen sukupolven kaukolämpöverkot. Kolmannen sukupolven kaukolämpöverkolla tarkoitetaan verkkoa, jonka menoveden lämpötila on yleensä noin 100 °C ja lämpö tuotetaan keskitetyillä yhteistuotantolaitoksilla, jotka sijaitsevat kaupungin laitamilla. Verkon tuotannossa saattaa olla myös hajautetun tuotannon laitoksia, jotka tuottavat pienillä, esim. 1–10 MW tehoilla lämpöä verkkoon suurten laitosten lisäksi.

Neljännen sukupolven kaukolämpöverkkoihin tuotetaan lämpöä nk. hajautetun tuotannon mallilla, jolloin lämmöntuotanto tapahtuu enemmän pienemmistä tuotantolaitoksista, jotka hyödyntävät hukkalämpöä esimerkiksi konesaleista sekä lämpökeskuksista, jotka käyttävät polttoaineenaan biomassaa.

7.1 Suuren kaupunkialueen (kolmannen sukupolven) kaukolämpöverkko

Perinteinen eli kolmannen sukupolven kaukolämpöverkko muodostuu yleensä meno- ja paluuputkien järjestelmästä, joka saa loppukäyttäjälle siirrettävän lämpötehonsa erilaisista tuotantolaitoksista. Pohjoismaissa tyypilliset lämpötilatasot ovat menoputkelle 80–120 °C ja paluuputkelle 45–60 °C. Tuotantolaitoksen sijaitsevat kaupungin laitamilla ja ne ovat yleensä satoja megawatteja tuottavia yhdistettyjä lämmön- ja sähköntuotantolaitoksia (CHP). Talven huippupakkasilla verkon kapasiteettia on tukemassa lämpökeskuksia, joiden avulla saadaan tuotettua tarvittava teho rakennusten lämmittämiseen myös kaukolämpöverkon laitamille. Tuotettu lämpöteho siirretään suurilla eristetyillä runkoputkilla (~DN400-DN1000) eri puolille verkkoa, joissa putkisto haarautuu pienempiin putkiin vieden lämpötehoa loppukäyttäjien lämmönjakokeskuksille. Suurissa

verkoissa tarvitaan usein myös välipumppaamot paineen ja virtauksen ylläpitämiseen. Seuraavassa kuvassa 7 on esitetty kaukolämmön kehittyminen vuosien varrella, sekä sen mahdollinen tulevaisuus. Kuvan kohdassa 3G on edelllä kuvattu kolmannen sukupolven kaukolämpö.



Kuva 7. Kuvassa on esitetty kaukolämmön kehittyminen ja mahdollinen tulevaisuus (Thorsen, JE, Lund, H & Mathiesen, BV 2018, "Progression of District Heating – 1st to 4th generation")

7.2 Paluuvesi kaukolämpöverkossa

Kaukolämpöverkon ollessa suuren kaupungin alueella, joudutaan talvipakkasilla pumppaamaan korkean lämpötilan (n. 115 °C) menovettä pitkälle verkon reunoille. Talvella yleensä myös paluupuolen lämpötila on suhteellisen korkea, n. 60 °C, johtuen loppukäyttäjän laitteistoissa olevasta jäähtymästä. Putkistokoko on suuri suuren virtaaman takia ja verkkoon on asennettava välipumppaamoita. Suurissa kaukolämpöverkoissa

paluuvettä ei yleensä säädetä, vaan paluulämpötilan muutokset tapahtuvat menolämpötilaa säätämällä ja loppukäyttäjien laitteita optimoimalla. Putkistoissa on lämpöhäviöitä, koska lämpötilaero ympäröivään maa-ainekseen on suuri.

Tuotantolaitoksilla kaukolämmön paluuvesi kiertää erilaisille prosessiin liittyville lämmönvaihtimille, riippuen tuotantomuodosta. Polttoon perustuvilla laitoksilla paluuvesi saattaa kiertää savukaasupesureille ja lämpöpumppulaitoksilla se menee lämpöpumppujen lauhdutinpiiriin.

Savukaasupesureilla tarkoitetaan laitetta, jolla puhdistetaan savukaasuista pienhiukkasia, lasketaan lämpötilaa sekä lauhdutetaan vesihöyry vedeksi. Kaukolämmön paluuvettä savukaasupesureissa käytetään savukaasujen lauhduttamiseen lämmönvaihtimen avulla. Paluuveden ollessa liian kuumaa, voi lauhtumisen sijaan alkaa tapahtua haihtumista, mikäli lämpötila ei alita savukaasujen kastepistettä. (Caligo-esite) (Huhtinen 2000).

Lämpöpumput on yleensä optimoitu tietylle lämmöntuotantolämpötilalle, riippuen lämmönlähteen lämpötilatasoista. Tuotettu lämpötila saattaa vaihdella (jonkun pienen marginaalin sisällä) sisään tulevien lämpötilojen ja siten lämpöpumpun sisäisen prosessin paineen vaihteluiden myötä. Tästä syystä yleensä lämpöpumpputoimittajat ilmoittavat höyrystimeen ja lauhduttimeen sisään tulevalle vedelle minimi- ja maksimilämpötilat ja sen toimintapisteet valitaan tietylle lauhduttimeen sisään menevälle, eli kaukolämmön paluuveden lämpötilalle. Lämpöpumppu tuottaa vähemmän lämpötehoa, mikäli lämpötilaero lauhduttimen yli pienenee mitoituksesta, jos virtaus pysyy vakiona. Jos virtausta joudutaan kasvattamaan saman tehotason säilyttämiseksi, se vaikuttaa kokonaistehokertoimeen, koska kiertopumppua joudutaan käyttämään suuremmalla teholla sekä lämpöpumpun kompressori joutuu tekemään enemmän töitä saavuttaakseen tarvittavan lauhtumispaineen kylmäaineelle.

Loppukäyttäjien (kulutuskohde/asiakas) päässä kaukolämpövesi kiertää kulutuskohdekohtaisten lämmönvaihtimien läpi, jonka toisiopiirissä kiertää kiinteistön lämmitysverkon vesi. Paluuveden lämpötilaan tässä tapauksessa vaikuttaa siis loppukäyttäjän lämpimän veden tarve. Suomessa on olemassa lainsäädäntö, joka edellyttää, että loppukäyttäjän lämmityskierrossa lämmitysvesi ei saa olla alle 55 °C, legionellabakteerin muodostumisen takia eikä lämmityslaitteista saatava vesi saa olla yli 65 °C (Ympäristöministeriö 2017).

7.3 Paluulämpötilan laskemisen vaikutukset

Seuraavassa osuudessa on luettelomaisesti kerrottu paluulämpötilan mahdolliset vaikutukset:

- Laskemalla paluupuolen lämpötilaa saataisiin pienennettyä kaukolämpöverkkojen virtaaman tarvetta, koska lämpötilaero olisi suurempi ja tehonpyynti pysyy samana. Virtaaman väheneminen vähentää pumppauksen tarvetta, joka tarkoittaa sähköenergian tarpeen vähenemistä. (Rosén et al. 2019).
- Olemassa olevia putkikokoja ei kannata lähteä erikseen muuttamaan, mutta rakennettaessa uutta, tai vanhaa uusittaessa, voitaisiin putkikoko ottaa uudelleen tarkasteluun. Mahdollisuus myös lisäkapasiteetille on, mutta se vaatisi myös menopuolen kapasiteetin tarkastelun.
- Matalampi paluuvesi vähentäisi myös lämpöhäviöitä, vaikkakin monessa kaukolämpöverkossa on tilanteen vaatimat eristeet. Matalampi lämpötila vähentää eristyspaksuuden tarvetta, jolloin niistä saataisiin yksi säästökohde, niin kustannuksissa, kuin tilan tarpeen suhteen.
- Tuotantolaitosten savukaasupesureista saataisiin paremmalla hyötysuhteella enemmän tehoa irti, mikäli paluuvesi olisi viileämpää, kuin 45 °C. Pesuriin tulevan jäähdytysveden ollessa viileämpää, voidaan savukaasuista lauhduttaa enemmän kosteutta, jolloin saadaan enemmän lämpöä talteen. Tähän vaikuttaa olennaisesti käytettävissä olevan polttoaineen kosteus (Lepiksaar et al. 2020).
- Lämpöpumppujen tehokerrointa saataisiin korotettua hieman, jos lauhduttimeen sisään menevää kaukolämmön paluuveden lämpötilaa laskettaisiin ja ulos tuleva lämpötila pysyisi samana, ts. lämpötilaero kasvaisi
- Loppukäyttäjien osalta laitekannan (esim. lämmönvaihtimien) uusinta saattaa olla tarpeen, mikäli lämpötilan lasku on merkittävä ja ei osu nykyisten laitteiden mitoitusarvoihin.

8 Kannattavuus

Kannattavuuslaskentaan otettiin mukaan neljästä eri vaihtoehdosta (CHC boosterikytkentä, netbooster-kytkentä, nelisuuntaiskytkentä ja kj-hybridikytkentä) ainoastaan CHC boosterikytkentä ja netboosterkytkentä. Tämä johtui siitä, että kaksi muuta eivät olleetkaan työn kannalta olennaisia, niiden ollessa enemmän kiinteistöratkaisuihin liittyviä, kuin CHC-kohteisiin. Tästä syystä ne päätettiin rajata jatkoselvittelyistä pois.

Kannattavuuslaskennassa selvitettiin siis kahden eri boosterikytkennän kannattavuutta:

Vaihtoehto 1 koskee boosterikytkentää, jossa boosteritoiminto liitetään jo olemassa olevaan CHC-kiinteistökohteeseen siten, että boosteritoimintoa käytetään kaikkina niinä aikoina, jolloin kohde ei tarvitse jäähdytystä. Ts. CHC-lämpöpumpun käytettävyyttä tehostettaisiin.

CHC-käytössä lämpöpumppu tuottaa loppukäyttäjälle höyrystinpiirissä jäähdytystä ja lauhdutinpiirissä otetaan hukkalämpö talteen kaukolämpöverkkoon. Boosteritoiminnossa loppukäyttäjälle ei tuoteta jäähdytystä, vaan lämpöpumpun höyrystinpiirissä hukkalämpö otetaan talteen kaukolämmön paluupuolelta ja jäähtynyt paluuvesi palautetaan kaukolämmön paluupuolelle. Lauhdutinpiirissä tuotettu lämpö menee kaukolämmön menopuolelle.

Vaihtoehdon 1 laskennan perusteena on käytetty seuraavia taulukon 9 arvoja. Arvot ovat olemassa olevan lämpöpumpun toiminta-arvot ja ne on laskettu sen kiinteistön tarpeen mukaan, johon lämpöpumppu on sijoitettu.

Taulukko 9. Vaihtoehdon 1 laskennan perusteet

Lämmitysteho	523 kW
Jäähdytysteho	348 kW
Sähköteho	250 kW

Vaihtoehto 2 koskee boosterikytkentää, jossa boosterilämpöpumppu liitetään kaukolämpöverkkoon, palvelemaan ainoastaan lämmöntalteenottoa verkon paluuvedestä. Boosterilämpöpumppu tuottaa lämpöä kaukolämpöverkkoon verkon kannalta optimaalisessa paikassa alentaen paluuveden lämpötilaa. Kytkennät ovat lämpöpumpun höyrystinpiirissä kaukolämmön paluu-paluu, joka tarkoittaa sitä, että kl-paluupuolelta otetaan lämpöä talteen höyrystimeen ja jäähtynyt paluuvesi palautetaan paluuverkkoon takaisin, ja lauhdutinpiirissä kaukolämmön paluu-meno, jolloin lauhduttimeen menee vesi kl-paluuputkesta ja se tuottaa lämmintä vettä kl- menopuolelle.

Vaihtoehdon 2 laskennan perusteena on käytetty seuraavia taulukon 10 arvoja.

Taulukko 10. Vaihtoehdon 2 laskennan perusteet

Lämmitysteho	2471 kW
Jäähdytysteho	1909 kW
Sähköteho	562 kW

Kannattavuuslaskenta tehtiin nykyarvomenetelmällä 17 vuoden ajalta, mutta se esitetään myös kuukausitasolla, jotta nähtiin tulot ja menot tarkemmalla tasolla. Laskennassa käytetyt perusteet on kerrottu seuraavissa kappaleissa ja nykyarvomenetelmän kaava on seuraava:

$$NA = I + \frac{q1}{(1+i)^1} + \frac{q2}{(1+i)^2} + \cdots \frac{qn}{(1+i)^n} + \frac{JA}{(1+i)^n} \quad (3)$$

, jossa

NA = investoinnin jäännösarvo

I = investointikustannus

q = vuotuiset tulot ja menot

i = korkokanta

n = aika

8.1 Kannattavuuslaskennan perusteet

Vaihtoehdon 1 CHC-kohteena on käytetty olemassa olevaa lämpöpumppua, jonka tehotiedot on annettu taulukossa 9.

Vaihtoehdolle 2 laskennassa selvitettiin boosteritoimintoa varten optimaalinen lämpöpumpputyyppi Oilon Group Oy:n omistamalla Oilon Selection Toolilla (Oilon 2023). Selection tooliin syötetään mm. sisään menevät ja ulos tulevat lämpötilat sekä tehontarve. Kyseisen lämpöpumpun tehotiedot on annettu taulukossa 10.

8.1.1 Investointi

Vaihtoehdon 1 investointikustannuksia varten selvitettiin levylämmönvaihtimen, uuden putkiston, muiden oheislaitteiden sekä muutostöiden kustannukset. Tässä raportissa tätä vaihtoehdon 1 investointia kuvataan suureella X, johon tullaan vertaamaan muita raportissa esiintyviä investointikustannuksia.

Vaihtoehdon 2 investointikustannukset koostuivat lämpöpumppuhankinnasta, levylämmönsiirtimestä, muista oheislaitteista sekä muutostöistä. Tämän investoinnin suuruus on 5X.

8.1.2 Käyttömaksut

Vaihtoehdon 1 kustannuksiin otettiin mukaan referenssikohteen lämpöpumpusta saatavat käyttökustannukset, sen toimiessa pääasiallisesti jäähdytyslaitteena kiinteistön tiloissa.

Vuotuiset käyttömaksut referenssikohteessa ovat suuruudeltaan n. 0,12X ja ne koostuvat mm. sähkön käyttö- ja kausikustannuksista, jotka ovat tuloa energiayhtiölle.

Vaihtoehdossa 2 ei ole käyttömaksuja.

8.1.3 Kunnossapitomaksut

Molemmissa vaihtoehdoissa on otettu huomioon (jokavuotisen) vuosihuollon aiheuttamat kustannukset sekä n. 60 000 käyttötunnin välein tehtävät kompressorihuollot.

Vuotuiset kunnossapitomaksut ovat suuruudeltaan n. 0,02X ja kompressorihuollot n. 0,65X.

8.1.4 Käyttötunnit

Vaihtoehto 1 ajateltiin laskennassa käyvän boosteritoiminnolla kaikkina niinä tunteina, kun se ei tuota jäähdytystä kiinteistöön. Laskennassa käytettävälle referenssikohteelle vuosittaisia jäähdytyksen tunteja kertyisi n. 800 h, jolloin boosterin käyttötunteja kertyisi n. 7930 h. Käyttötunneissa on otettu huomioon vuosihuollot sekä mahdolliset kompressorien vaihdot.

Vaihtoehdolle 2 valittiin laskentaa varten kolme eri käyttötuntimäärää: n. 3000 h, n. 6000 h ja n. 8700 h. Vaihtoehdot valittiin näin, koska boosterin käytettävyyden tarpeesta ei tällä hetkellä ole kokemusta tai dataa olemassa ja haluttiin saada vertailua varten muutama eri ajotapa mukaan.

8.1.5 Lisäinen lämpö

Boosteritoiminnon lämmön tuotto on laskennassa ajateltu olevan ns. lisäistä lämpöä: koska lämmöntalteenotto tapahtuu kaukolämmön paluuverkon puolelta, tarkoittaa se sitä, että se on jo kertaalleen tuotettua lämpöä, koska hukkalämpö otetaan talteen kl-veden paluupuolelta. Tällöin siis energiajärjestelmään ei tule enempää energiaa lisää, kuin kompressorin sähkötehon verran. Tämän takia laskennassa ei ole käytetty suoraan lämpöpumpun tuottamaa lämpötehoa, vaan sen on ajateltu tuottavan uutta energiaa kompressorin tarvitseman sähkötehon verran. Laskennan tehona on siis käytetty höyrystimen ja lauhduttimen tehojen eroa eli lämpöpumpun ottamaa sähkötehoa. Lisäisen

lämmön arvo on saatu yrityksen omista ennusteista (€/MWh), joita ei voi tähän raporttiin julkaista yrityssalassapidon vuoksi.

8.1.6 Sähköteho

Vaihtoehto 1:ssa on käytetty olemassa olevan referenssikohteen sähkötehoa. Kohteeseen on aikanaan laskettu tarvittava kiinteistön jäähdytysteho, joka on toiminut määrittävänä sekä saatavalle lämpöteholle, että otettavalle sähköteholle. Sähköteho on esitetty taulukossa 9.

Vaihtoehto 2:n sähköteho tulee suoraan referenssikohteeseen määritetystä lämpöpumpputyypistä, joka on valittu verkon sijainnin sekä vaadittujen menolämpötilojen ja nykyisten paluulämpötilojen perusteella. Sähköteho on esitetty taulukossa 10.Tehotiedot on optimoitu COP:n mukaan Oilonin Selection Toolilla siten, että $COP_{lämmitys}$ olisi vähintään 4 (joka on asetettu vaatimukseksi mitoitusta aloitettaessa).

Sähkötehon arvo on saatu yrityksen omista ennusteista (€/MWh), joita ei voi tähän raporttiin julkaista yrityssalassapidon vuoksi. Lisäisen lämmön arvoon verrattuna 17 vuoden keskiarvolla (€/MWh) sähkötehon arvon osuus on n. 124 %.

8.1.7 Booster-jäähdytysteho

Booster-jäähdytysteholla tarkoitetaan boosteritoiminnolla tuotettavaa jäähdytystehoa paluuverkkoon. Lämpöpumpun on ajateltu tuottavan kesäkuukausina (touko- syys) hieman matalampaa lämpötilaa, n. 80 °C, kaukolämpöverkkoon, koska kuumempina aikoina lämmöntarve ei ole yhtä suurta, kuin talvisin. Tästä syystä jäähdytysteho on myös hieman alhaisempi kesällä.

Booster-jäähdytystehon arvo on laskettu koko kaukolämpöverkon osalta paluuveden laskun aiheuttamista kustannussäästöistä €/MWh periaatteella. Tämä laskenta on tehty erillisessä, yrityksen sisäisessä selvityksessä, joten tässä raportissa ei tuoda laskentaa tarkkaan esille. Laskennan perusteina on kuitenkin ollut pumppauskustannusten

väheneminen sekä vuotuiset tuotannon säästöt (MWh/a). Lisäisen lämmön arvoon verrattuna 17 vuoden keskiarvolla (€/MWh) Booster-jäähdytyksen arvon osuus on n. 6 %.

8.1.8 Jäähdytysteho

Vaihtoehdossa 1 jäähdytysteho tarkoittaa lämpöpumpun höyrystinpiiristä tuotettua tehoa, joka on aikanaan laskettu kohteen tarpeen mukaan. Teho on esitetty taulukossa 9.

Vaihtoehdossa 2 on ajateltu boosteritoiminnolla saavutettavan höyrystinpiirin lämpötilaeron olevan n. 13 astetta ja $COP_{jäähdytys}$ talvisin n. 3,3 ja kesäisin n. 3,8. Jäähdytysteho on esitetty taulukossa 10.

Jäähdytystehon arvo on saatu yrityksen omista ennusteista (€/MWh), joita ei voi tähän raporttiin julkaista yrityssalassapidon vuoksi. Lisäisen lämmön arvoon verrattuna 17 vuoden keskiarvolla (€/MWh) sähkötehon arvon osuus on n. 56 %.

8.1.9 Muuta huomioitavaa

- Laskennassa ei ole otettu huomioon kompressorien mahdollista optimoitua käyttöastetta, vaan 1 kompressorin huolto on ajateltu tehtävän joka 60 000 tunti
- Laskennassa ei ole otettu huomioon mahdollisia vikakorjauskustannuksia
- Vaihtoehdossa 1 on ajateltu boosteritoiminnon olevan käytössä kaikkina niinä aikoina, kun kiinteistön jäähdytystä ei tarvita
- vaihtoehdossa 2 ei ole mukana käyttökustannuksia, koska se tulee pelkästään kaukolämpöverkon käyttöön

8.2 Kannattavuuslaskennan tulokset

Kannattavuuslaskennan sisältäessä yrityssalassapidon alla olevia tietoja, tähän raporttiin lisätään tulokset vain yleisellä tasolla.

Seuraavassa taulukossa 11 on kerrottu kaikkien vaihtoehtojen kannattavuus yksinkertaistetulla esitystavalla. Tulosten perusteella mikään vaihtoehdoista ei ole tämänhetkisten laskelmien mukaan kannattavaa. Tämä johtunee ”sähkökattila” laskentatavasta, jota tässä työssä päädyttiin käyttämään. Mikäli kannattavuuslaskennassa olisi käytetty tuotetun lämmön arvoa, olisi luultavasti päästy kannattavuuden puolelle, koska tuotettava lämmitysteho on suurempi, kuin käytettävä sähköteho. Tähän laskentatapaan päädyttiin siitä syystä, että lämpöpumpun ei todettu tuottavan energiajärjestelmään yhtään enempää lisäenergiaa, kuin kompressorin sähkötehon verran, sen ottaessa hukkalämmön samasta energiajärjestelmästä.

Taulukko 11. Kannattavuustaulukko

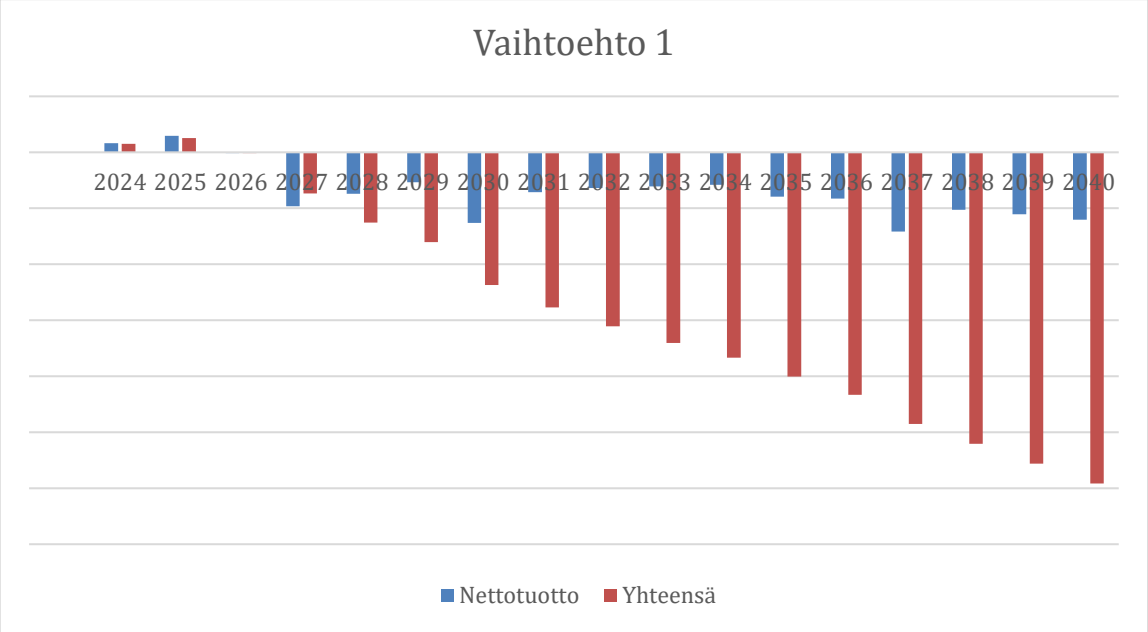
Ei kannattavaa (jäännösarvo miinusmerkkinen)	Kannattavaa (jäännösarvo plusmerkkinen, mutta ei suuria tuloja)	Erittäin kannattavaa (jäännösarvo plusmerkkinen, suuret tulot)
Vaihtoehto 1		
Vaihtoehto 2, 8700 h		
Vaihtoehto 2, 6000 h		
Vaihtoehto 2, 3000 h		

Tuloksia tarkastellessa on otettava huomioon, että laskennassa on käytetty ennusteita, jotka saattavat muuttua markkinoiden muuttuessa. Käyttötunnit sekä käyttötehot ovat arvioita, jotka saattavat todellisessa tilanteessa vaihdella. Tätä laskentaa varten ei pystytty saamaan todellista mittausdataa, mutta arviot on pyritty pitämään realistisina ja vertailukelpoisina.

8.2.1 Vaihtoehto 1

Vaihtoehto 1 ei osoittautunut kannattavaksi. Ensimmäisinä vuosina huomataan, että nettotuotto ja nykyarvo ovat viivan yläpuolella, joka tarkoittaa, että silloin kassavirta olisi ollut plussan puolella, mutta jo vuotena 2026 mennään viivan alapuolelle. Tämä johtuu tuotannon sähköistymisestä ja sitä kautta muuttuvista tuotannon arvoista. Tuotannon

sähköistymisellä tarkoitetaan polttoon perustuvien tuotantomuotojen vähenemistä ja sen korvaamista sähköenergiaa hyväksikäyttävällä tuotantotekniikalla. Laskennassa käytettävistä lisäisestä lämmöstä, boosteri- jäähdytyksestä sekä jäähdytyksestä saatavat tuotot eivät riittäneet ylittämään kaikkina vuosina sähkön käytön kustannuksia ja lisäksi investoinnin takaisinmaksua.



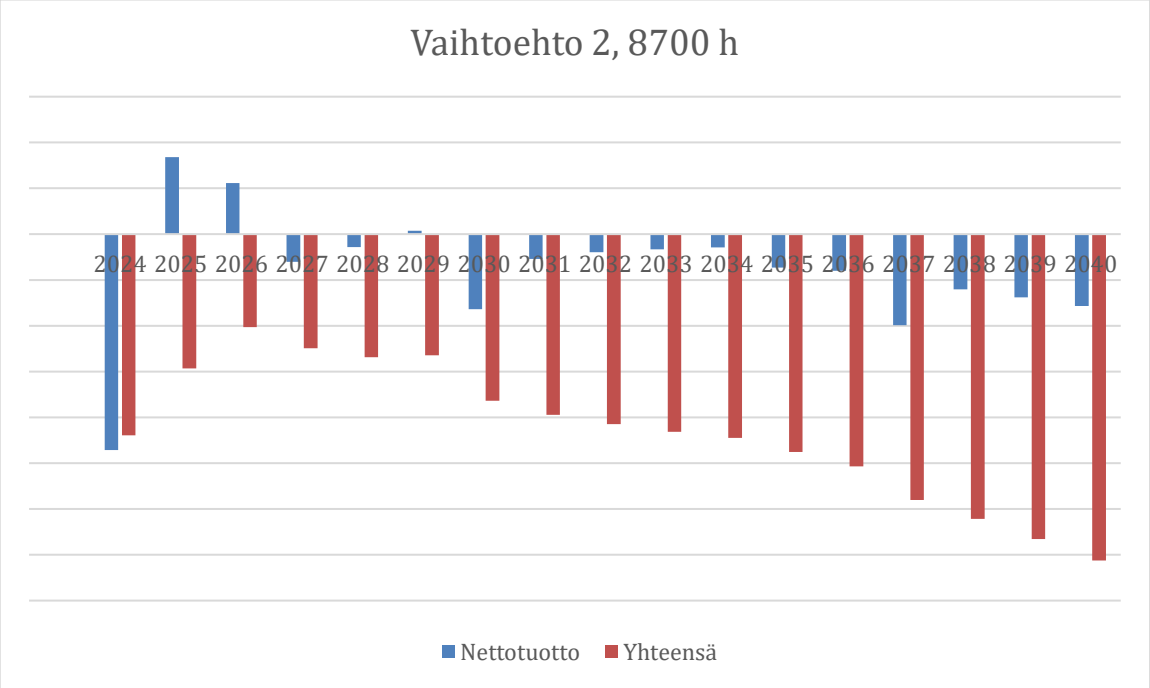
Kuva 8. Vaihtoehto 1 vuotuinen nettotuotto ja nykyarvo

Vuoden 2024 menoista investoinnin osuus on n. 15,4 %, kunnossapitokustannukset n. 0,3 % ja sähkön käytön kustannukset n. 84,3 %. Vuoden 2024 tuloista käyttökustannukset ovat n. 1,7 %, tuotto booster-jäähdytyksestä n. 4,3 %, tuotto jäähdytyksen myynnistä n. 1,8 % ja korvatun tuotannon arvo n. 92,2 %.

8.2.2 Vaihtoehto 2

Vaihtoehdon 2, 8700 h/a käyttötiedoin: investointikustannus osuu tämän vaihtoehdon ensimmäiselle vuodelle ja boosteri-toiminnosta saadaankin vuosien 2025-2026 aikana hyvin tuottoa, jolloin myös jäännösarvo lähtee kasvamaan. Vuodesta 2027 lähtien lisäisestä lämmöstä ja boosteri-jäähdytyksestä ei saada kuitenkaan tarpeeksi tuottoa, jotta voitettaisiin sähkönkäytön kustannukset. Tämä johtuu tuotannon sähköistymisestä ja sitä

myöden kustannusten noususta. Vuonna 2029 tuotto käy hieman viivan yläpuolella, mutta jo seuraavana vuotena nettotuotto menee miinuksen puolelle ja moninkertaistuu.

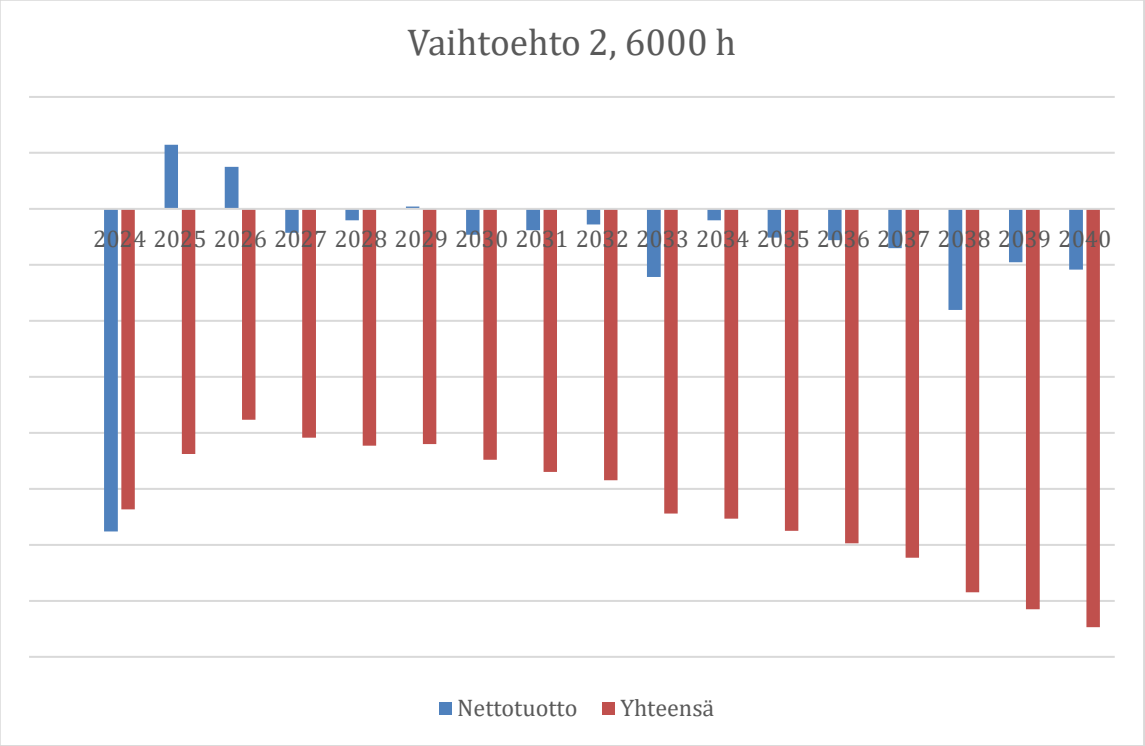


Kuva 9. Vaihtoehto 2, 8700 h vuotuinen nettotuotto ja nykyarvo

Vuoden 2024 menoista investoinnin osuus on n. 47,6 %, kunnossapitokustannukset n. 0,2 % ja sähkön käytön kustannukset n. 52,2 %. Vuoden 2024 tuloista booster-jäähdytyksen arvo on n. 15,2 % ja korvatun tuotannon arvo n. 84,8 %.

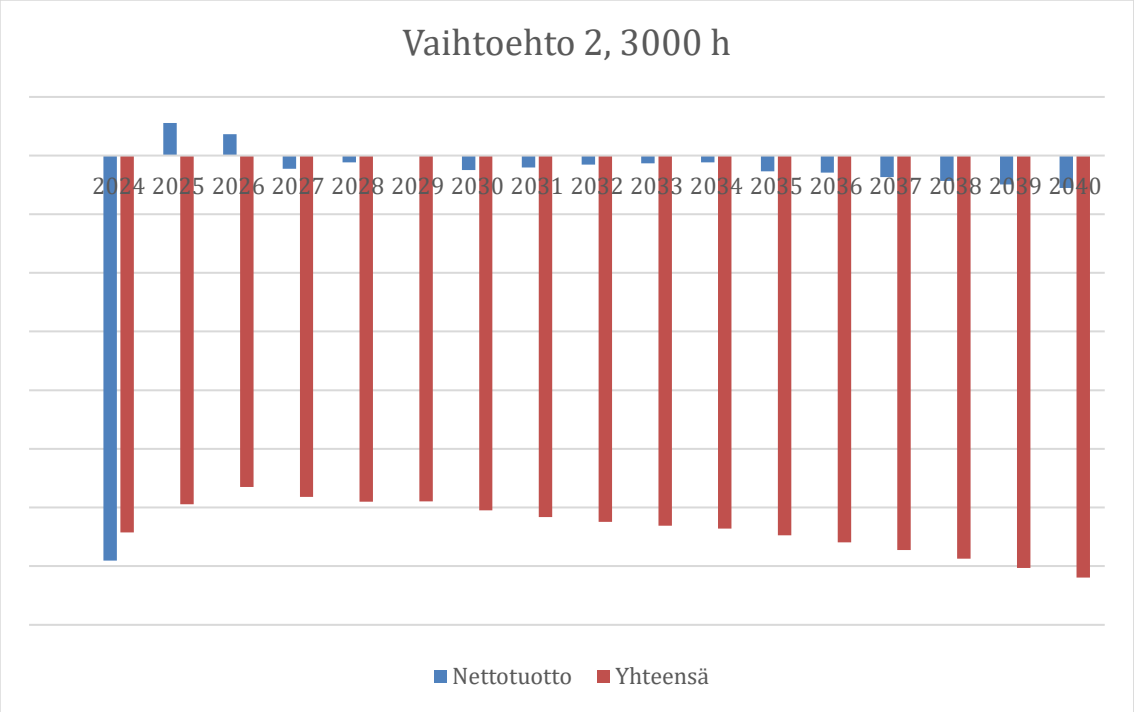
Vertailuna vuoden 2030 luvut: menoista kunnossapitokustannukset ovat n. 11,7 %. Tämä johtuu siitä, että kyseiselle vuodelle osuu kompressorihuolto. Toinen kompressorihuolto näkyy vuoden 2037 kustannusten kasvuna. Investointikustannuksia ei tälle vuodelle myöskään osu. Muita menoja vuonna 2030 on sähkön käytön kustannukset, jotka vievät n. 88,3 % osuuden. Tulot vuonna 2030 muodostuvat booster-jäähdytyksestä 16,6 %, sekä korvatun tuotannon arvosta 83,4 %. Kasvu negatiivisissa nettotuloissa johtuu myös tuotannon sähköistymisestä.

Vaihtoehdon 2, 6000 h/a käyttötiedoin: tämä vaihtoehto noudattaa samaa kaavaa, kuin edellinen, jäännösarvon ollessa vähemmän. Vuodet 2030, 2037 ja 2040 vaikuttavat näillä näkymin vähiten tuottavilta.



Kuva 10. Vaihtoehto 2, 6000 h vuotuinen nettotuotto ja nykyarvo

Vaihtoehdon 2, 3000 h/a käyttötiedoin: tämä vaihtoehto noudattaa samaa kaavaa, kuin edellinen, mutta jäännösarvo on hieman korkeampi, kuin edellisessä. Tämä johtunee siitä, että vähäisten käyttötuntien takia kompressorihuoltoja ei osu 17 vuoden sisään yhtään. Investoinnin suuruus ja sähkönkäytön kustannukset tekee siitä kuitenkin edelleen kannattamatonta.



Kuva 11. Vaihtoehto 2, 3000 h vuotuinen nettotuotto ja nykyarvo

9 Johtopäätökset

Tämän diplomityön ensisijaisena tavoitteena oli selvittää, miten Helen Oy:n omistamien CHC-lämpöpumppujen käytettävyyttä voidaan tehostaa. Lopullisiksi vertailu vaihtoehdoiksi otettiin netbooster-toiminnot, joissa lämpöpumppu hyödyntää kaukolämpöverkon paluuvettä lämmönlähteenä ja samalla jäähdyttää paluuveden lämpötilaa. Näistä kahdesta vaihtoehdosta ensimmäinen on jo olemassa oleva CHC-kohde, jonka käyttötunteja haluttiin kasvattaa, ts. tehostaa lämpöpumpun käytettävyyttä.

Työssä selvitettiin kahden eri boosterikytkennän kannattavuutta ja kannattavuuslaskennat rajattiin koskemaan yksittäisiä referenssikohteita. Tulosten perusteella mikään annetuista vaihtoehdoista ei ole työn kirjoitushetkellä kannattavaa. Suurin tekijä kannattamattomuudelle on valittu laskentatapa (ns. sähkökattila) ja sitä kautta sähkön käyttökustannukset, jotka ovat laskentahetkellä ennusteiden mukaan melko korkeat, verrattuna netboosterista saatujen hyötyjen tuloihin. Kannattavuus laskettiin ns. sähkökattilana, koska lämmön ajateltiin olevan jo kertaalleen tuotettu, jolloin lämpöpumpun hyöty on sähköenergian verran tuotettu määrä. Mikäli laskuissa olisi käytetty tuotettua lämpöenergiaa, olisi varmasti päästy kannattavuuden puolelle, koska referenssikohteiden lämpöpumppujen COP on n. 4 luokkaa.

Laskennassa käytettiin lämpöpumppujen maksimitehoja, joka ei ainakaan CHC-boosterin osalta kiinteistön jäähdytysajossa vastaa todellisuutta ja vaihtelua varmasti esiintyy enemmän. Tähän selvitykseen ei saatu minkään referenssikohteen todellista ajodataa, koska olemassa olevan kohteen osalta sitä ei ollut järkevässä muodossa saatavilla ja toisen referenssin osalta, joka on vasta suunnitelman tasolla, on oletettu, että tuotto on melko tasaista ja lämpöpumppu käy koko ajan pois lukien huollot. Kannattavuuteen todellisilla tehotiedoilla ei mitä luultavammin olisi ollut vaikutusta, koska kumulatiivinen kassavirta jäi niin paljon viivan alle.

Selvitys olisi myös kannattanut tehdä laajemmalla skaalalla: boosteritoimisia lämpöpumppuja voisi olla kannattavaa sijoittaa useampia kaukolämpöverkkoon, jolloin niiden yhteishyöty olisi varmasti suurempaa, kuin yksittäisen pumpun hyöty ja yksittäisen lämpöpumpun investointikustannukset saattaisivat olla matalammat, mikäli niitä

hankittaisiin useampi kerralla. Useammalla lämpöpumpulla voitaisiin myös saada kaukolämmön paluuveden lämpötila laskettua ja lämpöä enemmän tuotettua, kun taas yksittäisen lämpöpumpun vaikutus ei suuressa runkoputkistossa todennäköisesti näy. Tästä selvityksestä useamman lämpöpumpun sijoittaminen kaukolämpöverkkoon rajattiinkin pois, koska lähtökohta oli selvittää yhden referenssikohteen kannattavuus, mutta jatkoselvittelyä asiasta on suositeltavaa tehdä, niin saadaan kokonaisuuden osalta selvyyttä.

Aikaisemmat tutkimukset on tehty vuosina ennen Ukrainan sotaa ja sen aiheuttamaa Venäläisistä polttoaineista irtautumista, jonka myötä sähkön markkinahinnat on nousseet Suomessa paljon. Tämä on suurin tekijä siinä, että toteutus ei millään tässä selvityksessä mukana olleista vaihtoehdoista ole kannattavaa verrattuna hyödyistä saatuihin tuloihin, kun taas aikaisemmissa tutkimuksissa kaikki vaihtoehdot olivat joltain osin kannattavia. Kaksi vertailuun otettavista tutkimuksista sijoittuu etelä-Eurooppaan, joskin Italian osalta pohjoiseen, mutta sijainnitkin omalta osaltaan vaikuttavat vertailukelpoisuuteen ulkolämpötilan takia, kun on kyse kaukolämmöstä. Tanskan osalta ollaan varmasti melko lähellä suomen olosuhteita, mutta kyseisessä tutkimuksessa selvitettiin asiaa enemmänkin koko kaukolämpöverkon osalta, eikä niinkään olemassa olevien CHC-pumppujen ja paluuverkon lämpötilan laskun kannalta. Näistä syistä johtuen tämä selvitys oli hyvä toteuttaa, koska täysin samantyyppistä vertailukohdetta tälle aiheelle ei löytynyt.

Tutkimuksessa selvitettiin myös kaukolämpöverkon paluuveden lämpötilan laskemisen vaikutuksia yleisellä tasolla. Tässä kappaleessa pohditaan asiaa Helen Oy:n osalta. Lämpötilan laskun todettiin vaikuttavan positiivisesti moneen asiaan niin kaukolämpöverkon, tuotantolaitosten, kuin lämpöpumppujenkin osalta. Helen Oy:n kaukolämpöverkossa vaikutukset olisivat todennäköisesti suurimmat, koska pumppaustarve sekä lämpöhäviöt vähenisivät, mutta savukaasupesureiden osalta vaikutukset eivät olisi kovinkaan suuret, sillä niitä ei Helen Oy:n tuotantolaitoksissa ole kovinkaan montaa. Lämpöpumppuja taas Helen Oy:llä on monta, mm. Katri Valan ja Keskuskadun lämpöpumppulaitoksissa ja laitekantaa ollaan lisäämässä tulevina vuosina. Näin ollen tehokertoimen osalta vaikutukset saataisiin moninkertaistettua, jolloin hyötykin olisi jo merkityksellinen. Tätä asiaa kannattasikin tutkia jatkossa tarkemmin Helen Oy:n ja Helsingin kaukolämpöverkon kannalta. Tästä selvityksestä se rajattiin pois, koska selvitys on varmasti oman työnsä laajuinen.

Lähteet

Annex to the ANNEX XV RESTRICTION REPORT. (2023) [Viitattu 1.4.2023] Saatavissa: https://echa.europa.eu/documents/10162/d2f7fce1-b089-c4fd-1101-2601f53a07d1.

Hurricane Updates: New Orleans Without power as Hurricane Ida Batters Louisiana. (2021) *New York Times*, Aug 29, [Viitattu 1.2.2023] Saatavissa: https://www.nytimes.com/live/2021/08/29/us/hurricane-ida-live-updates-new-orleans-louisiana.

Handbook for the Vienna Convention for the Protection of the Ozone Layer. (2019) Ozone Secretariat [Viitattu 20.10.2022] Saatavissa: https://ozone.unep.org/sites/default/files/2020-01/VC_Handbook_2019.pdf

Ympäristöministeriön Asetus Rakennusten Vesi- Ja viemärilaitteistoista 1047/2017. (2017) [Viitattu 8.3.2023] Saatavissa: https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20171047.

Valtioneuvoston Asetus Fluorattuja Kasvihuonekaasuja Tai Otsonikerrosta Heikentäviä Aineita Sisältävien Laitteiden Käsittelijän pätevyysvaatimuksista 766/2016. (2016) Saatavissa: https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2016/20160766#Pidm45053757386160.

EUROOPAN PARLAMENTIN JA NEUVOSTON ASETUS (EU) N:O 517/2014. (2014) Saatavissa: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R0517&from=FI.

Euroopan Parlamentin Ja Neuvoston Direktiivi 2014/68/Eu. (2014) Saatavissa: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014L0068&from=EN.

EUROOPAN PARLAMENTIN JA NEUVOSTON ASETUS (EY) N:O 1272/2008. (2008) Saatavissa: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008R1272&from=FI.

EUROOPAN PARLAMENTIN JA NEUVOSTON ASETUS (EY) N:O 842/2006. (2006) Saatavissa: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32006R0842&from=fi.

Taustatiedote, Kioton Pöytäkirja . (2003) Euroopan komissio [Viitattu 17.1.2023] Saatavissa: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/fi/MEMO_03_154.

MONTREALIN PÖYTÄKIRJA Otsonikerrosta Heikentävistä aineista 66/1988. (1988) Saatavissa: https://www.finlex.fi/fi/sopimukset/sopsteksti/1988/19880066/19880066_2.

SFS-EN 378 Kylmäkoneistot Ja Lämpöpumput. Turvallisuus- Ja Ympäristövaatimukset. Helsinki: Suomen standardoimisliitto.

Caligo -Savukaasupesurijärjestelmä. [Viitattu 8.3.2023] Saatavissa: https://www.caligoindustria.com/wp-content/uploads/2022/11/Caligo-Scrubber-Brochure-fi-2019-WEB.pdf.

Aittomäki A (1996) *Kylmätekniikka*. Kylmätuki Oy.

Aittomäki A (2012) *Kylmätekniikka.* Suomen Kylmäyhdistys ry.

Averfalk H, Ingvarsson P, Persson U, Gong M ja Werner S (2017) Large heat pumps in Swedish district heating systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 79: 1275-1284

Bach B, Werling J, Ommen T, Münster M, Morales JM ja Elmegaard B (2016) Integration of large-scale heat pumps in the district heating systems of Greater Copenhagen. *Energy* 107: 321-334

Boyce MP (2003) *Centrifugal Compressors - A Basic Guide.* PennWell Corporation.

ECHA *Reach.* [Viitattu 1.4.2023]
Saatavissa: https://echa.europa.eu/fi/regulations/reach/understanding-reach.

Gadd Hja Werner S (2014) Achieving low return temperatures from district heating substations. *Applied Energy* 136: 59-67

Giampaolo A (2010) *Compressor Handbook : Principles and Practice.* Lilburn: River Publishers.

Helen Oy (2022) *Hiilineutraali Energiayhtiö 2030 – 80 % Päästövähenemä Mahdollinen Jo Vuonna 2025.* Viitattu [24.2.2022] Saatavissa: https://www.helen.fi/uutiset/2022/hiilineutraali-energiayhtio-2030-80-paastovahenema-mahdollinen-jo-vuonna-2025

Helen Oy Dec 21,(2021) *Helen Lopettaa Hiilen Käytön Yli Viisi Vuotta Suunniteltua Aiemmin.* [Viitattu 24.2. 2022] Saatavissa: https://www.helen.fi/uutiset/2021/helen-lopettaa-hiilen-kayton-yli-viisi-vuotta-suunniteltua-aiemmin

Holland FA, Watson FA ja Devotta S, (1982) *Thermodynamic Design Data for Heat Pump Systems : A Comprehensive Data Base and Design Manual.* Kent: Elsevier Science & Technology.

Huhtinen M (2000) *Höyrykattilatekniikka.* Helsinki: Edita.

Hundy GF (2016) *Refrigeration, Air Conditioning and Heat Pumps (5th Edition).* Oxford: Elsevier.

Hundy GF, Trott AR ja Welch T, (2016) *Refrigeration, Air Conditioning and Heat Pumps.* Amsterdam, Netherlands: Butterworth-Heinemann.

Kapanen, M. *Lait Ja Asetukset.* Kylmäpäivät 2023.

Kapanen, M. (2022) *Kylmäainetilanteessa Rauhan Aikaa?* 1.2.2023https://www.kylmaextra.fi/lehdet/kylmaextra_2_2022/kylmaainetilanteessa_rauhan_aikaa.

Kapanen, M. (2021) *Muutoksia Kylmäainesäädöksissä.* [Viitattu 24.3.2023] Saatavissa: https://www.kylmaextra.fi/lehdet/kylmaextra_1_2021/muutoksia_kylmaainesaadoksissa.

Kapanen, M. *Kylmäainetilanne.* Kylmäpäivät 2019.

Kapanen, M. *Lait Ja Asetukset.* Kylmäpäivät 2021.

Kapanen M (2017) *Kylmäainetilanne 2017.* SUOMEN KYLMÄYHDISTYS ry [Viitattu 2.2.2023] Saatavissa: https://iisoy.fi/wp-content/uploads/2021/07/Kylma%CC%88ainetilanne-2017-final.pdf.

Laitinen A, Malmén Y, Nissilä M, Säämänen A, (2008) *REACH-Asetuksen Vaatimukset Ja Soveltaminen Aineiden Jatkokäyttäjien Kannalta: Esimerkkitapauksena Hydratsiinin Käyttö Energiateollisuudessa.* Helsinki. [Viitattu 1.4.2023].

Lepiksaar K, Volkova A, Ruseljuk P ja Siirde A (2020) The effect of the District Heating Return Temperature Reduction on Flue Gas Condenser Efficiency. *Rigas Tehniskas Universitates Zinatniskie Raksti* 24(3): 23-38

Levihn F (2017) CHP and heat pumps to balance renewable power production: Lessons from the district heating network in Stockholm. *Energy* 137: 670-678

Maaskola I, Kataikko M, (2014) *Ylijäämälämmön Taloudellinen Hyödyntäminen, Lämpöpumppu- Ja ORC-Sovellukset.* Helsinki: Motiva [Viitattu 5.10.2022] Saatavissa: https://www.motiva.fi/files/13513/Ylijaamalammon_taloudellinen_hyodyntaminen_Lampopumppu-_ja_ORC-sovellukset.pdf.

Motiva (2022a) *Ilma-Vesilämpöpumppu.* [Viitattu 23.9.2022] Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/lampopumput/lampopumpputeknologiat/ilma-vesilampopumppu.

Motiva (2022b) *Lämpöpumpputeknologiat.* [Viitattu 19.10.2022] Saatavissa:https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/lampopumput/lampopumpputeknologiat.

Oilon Group Oy May,(2023) Oilon Selection Tool. Viitattu [14.5.2023] Saatavissa: https://oilon.com/en-gb/products-gb/oilon-selection-tool/

Painelaitedirektiivin 2014/68/EU (PED) Soveltamisohjeet . (2020) Viitattu [13.5.2023] Saatavissa: https://tukes.fi/documents/5470659/6372817/Painelaitedirektiivin+soveltamisohjeet/f503f680-7e9b-40ff-80a0-4b81f5f193bd/Painelaitedirektiivin+soveltamisohjeet.pdf?t=1593166894221.

Quirosa G, Torres M, Soltero VM ja Chacartegui R (2022) Energetic and economic analysis of decoupled strategy for heating and cooling production with CO2 booster heat pumps for ultra-low temperature district network. *Journal of Building Engineering* 45: 103538

Rosén Tja Ödlund L (2019) Active Management of Heat Customers Towards Lower District Heating Return Water Temperature. *Energies*

Ruokavirasto (2023) *PFAS-Yhdisteet.* [Viitattu 1.4.2023] Saatavissa: https://www.ruokavirasto.fi/elintarvikkeet/elintarvikeala/vierasaineet-ja-jaamat/vierasaineet/pfas-yhdisteet/.

Seinelä, A. (2018) *Pääkirjoitus: Kylmäainetilanne Johtanut Lieveilmiöihin.* [Viitattu 1.2.2023] Saatavissa: https://www.kylmaextra.fi/lehdet/kylmaextra_2_2018/paakirjoitus_kylmaainetilanne_johtanut_lieveilmioihin.

Suomen Ympäristökeskus Apr 21,(2022) *Kansainvälisen Ympäristönsuojelun Menestystarina.* [Viitattu 3.11.2022] Saatavissa: https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Ilmasto_ja_ilma/Kansainvalisen_ymparistonsuojelun_menest(44510).

THL Mar 17,(2023) *PFAS-Yhdisteet.* [Viitattu 1.4.2023] Saatavissa: https://thl.fi/fi/web/ymparistoterveys/ymparistomyrkyt/pfas-yhdisteet.

Thorsen JE, Lund H, Mathiesen BV, (2018) *Progression of District Heating – 1st to 4th Generation.* : Aalborg University [Viitattu 8.3.2023} Saatavissa: https://vbn.aau.dk/ws/portalfiles/portal/280710833/1_4GDH_progression_revised_May2018.pdf.

Tukes (2011) *Painelaitteet Sijoitettava Turvallisesti.* [Viitattu 31.1.2023] Saatavissa: https://tukes.fi/-/painelaitteet-sijoitettava-turvallises-1.

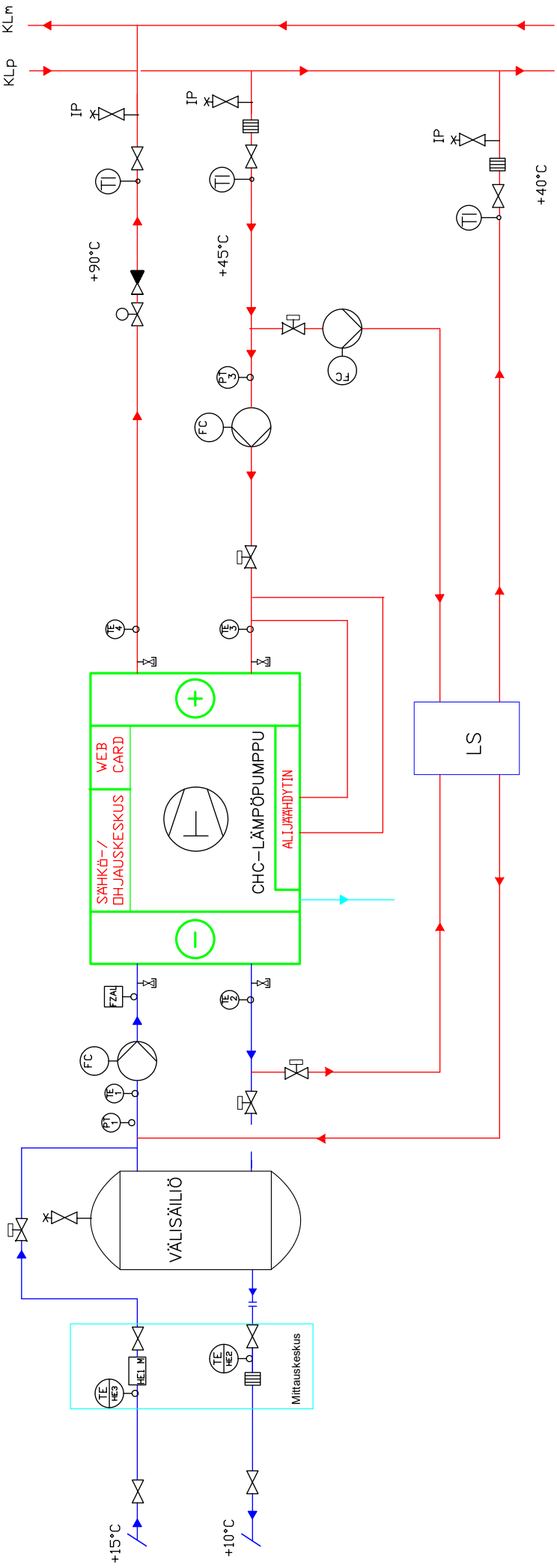
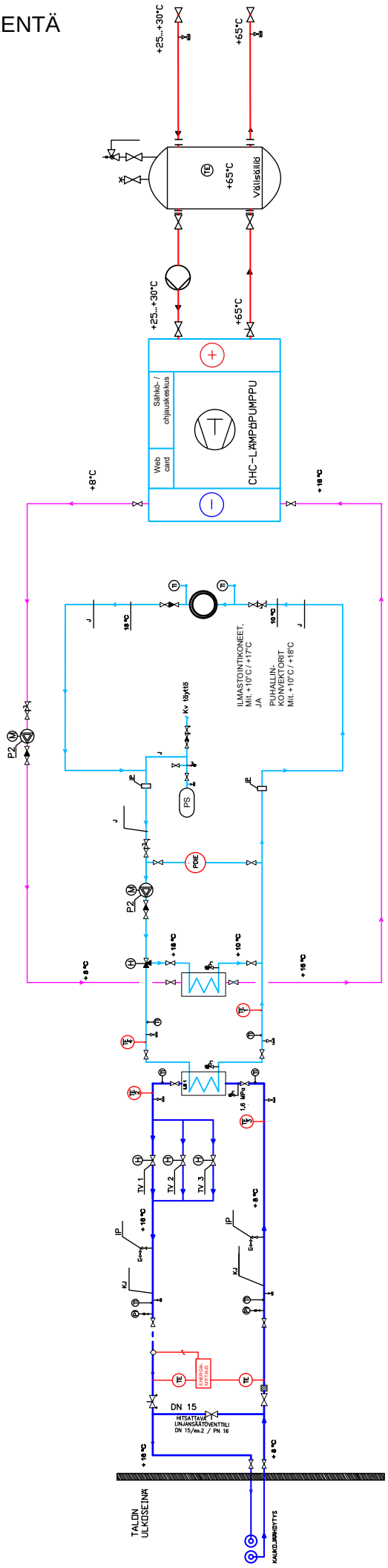
Tukes (2023a) *Painelaitteen Käyttö.* [Viitattu 31.1.2023] Saatavissa: https://tukes.fi/tuotteet-ja-palvelut/painelaitteet/painelaitteen-kaytto.

Tukes (2023b) *Henkilöpätevyydet Ja Pätevyysvaatimukset.* [Viitattu 24.3.2023] Saatavissa: https://tukes.fi/tuotteet-ja-palvelut/kylmaala/henkilopatevyydet-ja-patevyysvaatimukset.

UNFCCC *What is the Kyoto Protocol?* [Viitattu 17.1.2023] Saatavissa: https://unfccc.int/kyoto_protocol.

Vivian J, Emmi G, Zarrella A, Jobard X, Pietruschka D ja De Carli M (2018) Evaluating the cost of heat for end users in ultra low temperature district heating networks with booster heat pumps. *Energy* 153: 788-800

LIITE 1. CHC
BOOSTERIKYTKENTÄ



LIITE 2. KJ-HYBRIDIKYTKENTÄ