

Opinnäytetyö AMK

Tekniikan koulutus

Konetekniikka

2024

Mika Karbin

Hankesuunnitelma suuren kauppakeskuksen vedenjäähdytyskoneiden uusimisesta keskitetyllä lämpöpumppulaitoksella

Opinnäytetyö AMK | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Konetekniikan koulutus

2024 | 54 sivua

Mika Karbin

Hankesuunnitelma suuren kauppakeskuksen vedenjäähdytyskoneiden uusimisesta keskitetyllä lämpöpumppulaitoksella

Tässä opinnäytetyössä käsiteltiin Sweco Finland Oy:n toimeksiannosta suuren kauppakeskuksen vedenjäähdytyskoneiden uusintaa. Tutkimuksellisessa opinnäytetyössä toteutettiin vedenjäähdytyskoneiden uusinnan hankesuunnitelma.

Hankesuunnitelmassa kiinteistöjen yleisimpiä jäähdytysvaihtoehtoja vertailtiin suuriin kiinteistöihin soveltuvilla vaihtoehtoilla. Vaihtoehtoja vertailtiin teknisten ja taloudellisten tunnuslukujen avulla. Kauppakeskuskiinteistön tavoitteena oli selvittää vaihtoehto, jolla voidaan hyödyntää jäähdytyksessä syntyvä lauhdelämpö ja näin lisätä kohteen energiatehokkuutta. Lämpöpumppuratkaisut ovat kehittyneet parin viime vuosikymmenen aikana ja nykyisin löytyy soveltuvia ratkaisuja, joilla lauhdelämpö voidaan hyödyntää kiinteistön lämmityksen lisäksi myös kaukolämpöverkossa.

Opinnäytetyön lopputuloksena oli hankesuunnitelma vedenjäähdytyskoneiden uusimisesta. Hankesuunnitelma on tarpeen tehdä kaikissa toimeksiantajan hankkeissa, koska siinä voidaan selvittää hankkeeseen vaikuttavat tekijät kattavasti. Toimeksiantajan mielestä opinnäytetyöstä oli hyötyä muissa toimeksiantajan hankkeissa. Hankesuunnitelman lopputuloksena ehdotettiin vedenjäähdytyskoneiden uusintaa keskitetyllä lämpöpumppulaitoksella, jolla voidaan hyödyntää jäähdytyksessä syntyvä lauhdelämpö kaukolämpönä.

Asiasanat: Hankesuunnitelma, jäähdytystekniikka, jäähdytyslaitteet, lämpöpumput, energiatehokkuus, ja kestävä kehitys.

Bachelor's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Mechanical Engineering

2024 | 54 pages

Mika Karbin

Project plan of a large-scale commercial center's water chillers replay at a centralized heat pump station

The topic of this thesis is the renewal of the water chillers of a large commercial center. The thesis was commissioned by Sweco Finland Ltd. A conceptual engineering was made for renewing different possibilities of cooling.

The most common cooling concept options for large properties were compared. Cooling options were compared using technical and financial indicators. The goal was to find out an option in which the heat generated in the cooling process could be utilized thus increasing the energy efficiency of the commercial center. The heat pump systems have developed during the 2010s and nowadays there are various suitable options for utilizing the condensate heat.

The result of the thesis was a project plan for renewing water chillers. It is necessary to do the conceptual engineering phase in nearly every project because the phase comprehensively examines the characteristics affecting the project and develops the selected option to a sufficient level of detail. In the opinion of the client, the thesis was generally useful. As a result of the conceptual engineering, it was proposed to renew the water chillers with a centralized heat pump plant, which can produce the generated condensate heat into district heating.

Keywords:

Cooling, water chiller, heat pumps, energy efficiency, project plan, sustainability

Sisältö

| | |
|---|-----------|
| Käytetyt lyhenteet tai sanasto | 7 |
| 1 Johdanto | 8 |
| 2 Talotekniikan hankesuunnitelma | 9 |
| 2.1 Jäähdytyksen uusinnan hankesuunnitelma | 14 |
| 3 Kiinteistöjäähdytyksen yleisimmät vaihtoehdot ja niiden tärkeimmät ominaisuudet hankesuunnitelman kannalta | 17 |
| 3.1 Suorahöyrystysjärjestelmä | 17 |
| 3.2 Välillinen jäähdytysjärjestelmä | 18 |
| 3.2.1 Kaukojäähdytys | 19 |
| 3.2.2 Yhdistetty kiinteistökohtainen jäähdytys ja lämmitys | 21 |
| 4 Kauppakeskuksen jäähdytysjärjestelmä | 23 |
| 5 Hankesuunnitelmassa tutkitut vaihtoehdot | 26 |
| 5.1 Ilmalauhdutteinen vedenjäähdytyskone | 26 |
| 5.2 Maajäähdytys vaihtoehto | 28 |
| 5.3 Ilmavesilämpöpumpppuihin perustuva vaihtoehto | 29 |
| 5.4 Lämpöpumpppuihin perustuva vaihtoehto | 33 |
| 5.5 Kylmäaineiden vaikutus valittavaan vaihtoehtoon | 36 |
| 5.6 Vaihtoehtojen pisteytys | 39 |
| 6 Hankesuunnitelman tulos | 40 |
| 7 Yhteenveto | 47 |
| 8 Pohdintaa | 48 |
| Lähteet | 51 |

Liitteet

Liite 1. Taloudellinen tarkastelu jäähdytysvaihtoehdoille.

Kaavat

| | |
|---|----|
| Kaava 1. Jäähdytyksen hetkellinen hyötysuhde. | 27 |
| Kaava 2. Hetkellisen lämpöhyötysuhteen COP laskentakaava. | 42 |

Kuvat

| | |
|---|----|
| Kuva 1. Rakennusprojektin kustannuksien jakauma (Sweco Finland Oy). | 10 |
| Kuva 2. Projektinkustannuksien jakaantuminen (RT 10-11226). | 11 |
| Kuva 3. Esimerkki tarveselvityksestä, muokattu (Junnonen J-M). | 12 |
| Kuva 4. Suora höyrystysjärjestelmä, yksinkertaistettu muokattu periaatekaavio (Sweco periaatekaaviokirjasto). | 18 |
| Kuva 5. Välillinen järjestelmä, yksinkertaistettu muokattu periaatekaavio (Sweco periaatekaaviokirjasto). | 19 |
| Kuva 6. Kaukojäähdytysjärjestelmä (Motiva). | 21 |
| Kuva 7. Kiinteistöjäähdytys (Helen Oy). | 22 |
| Kuva 8. Vedenjäähdytyskone vesikatolla (Mika Karbin). | 24 |
| Kuva 9. Kaavio konehuoneista ja vedenjäähdyttimistä (Kauppakeskuksen kaaviot). | 25 |
| Kuva 10. Yksinkertaistettu muokattu periaatekaavio vedenjäähdytyskoneen kytkennästä (Sweco periaatekaaviokirjasto). | 28 |
| Kuva 11. Yksinkertaistettu muokattu periaatekaavio maajäähdytys (Sweco periaatekaaviokirjasto). | 29 |
| Kuva 12. Tuloilmakoneen pattereiden sijoitus (Mika Karbin). | 30 |
| Kuva 13. Yksinkertaistettu muokattu periaatekaavio IVLP 2-putki (Sweco periaatekaaviokirjasto). | 31 |
| Kuva 14. IVLP-laitos Tanskassa, kylmäaine R717 (Mika Karbin). | 32 |

| | |
|---|----|
| Kuva 15. Muokattu periaatekaavio multitoimisesta ilmavesilämpöpumppujärjestelmästä 4-putki (Sweco periaatekaaviokirjasto). | 33 |
| Kuva 16. Yksinkertaistettu muokattu periaatekaavio lämpöpumpun kytkennästä kaukolämpöverkkoon (Sweco periaatekaaviokirjasto). | 34 |
| Kuva 17. Sähköveroluokat (Laki sähkön ja eräiden polttoaineiden valmisteverosta 28:4.2). | 36 |
| Kuva 18. Vähennysaikataulu (Kylmätekniikan koulutuspäivät 2021). | 36 |
| Kuva 19. Ammoniakkikylmälaitosten turvaetäisyydet (Kylmäextra). | 40 |
| Kuva 20. Kylmäaineiden turvallisuusluokat (Ammoniakki kylmäaineena, 9). | 41 |
| Kuva 21. Kylmäaineiden teoreettisia hyötysuhteita eri lämpötiloilla (Bitzer). | 43 |
| Kuva 22. Mitoituspiste 1 (Oilon Selection Tool). | 44 |
| Kuva 23. Mitoituspiste 2 (Oilon Selection Tool). | 45 |
| Kuva 24. Mitoituspiste 3. (Oilon Selection Tool). | 46 |
| Kuva 25. Yksinkertaistettu lämpöpumppukytkentä kaukolämpöverkkoon (Mika Karbin). | 49 |
| Kuva 26. Kaukolämmön paluulämmön hyödyntämisen vaikutus hyötysuhteeseen (Oilon Selection Tool). | 50 |

Taulukot

| | |
|---|----|
| Taulukko 1. Taulukko kylmäaineiden ominaisuuksista (Danfoss Ref Tools App). | 38 |
| Taulukko 2. Vertailumatriisi vaihtoehtojen pisteytyksestä (Mika Karbin). | 39 |

Käytetyt lyhenteet tai sanasto

| | |
|------|---|
| CFC | Chloro-Fluoro-Carbon (Kylmätekniiikan perusteet) |
| COP | Coeffiency of Performance, lämmityksen hyötysuhde |
| EER | Energy Efficiency Ratio, jäähdytyksen hyötysuhde |
| GWP | Global Warming Potential (Kylmälaitoksen suunnittelu) |
| HCFC | Hydro-Chloro-Fluoro-Carbon (Kylmätekniiikan perusteet) |
| HFC | Hydro-Fluoro-Carbon (Kylmätekniiikan perusteet) |
| HFO | Hydro-Fluoro-Olefin (Suomen kylmäyhdistys) |
| IVLP | Ilma-vesilämpöpumppu |
| kW | Tehon yksikkö, kilowatti |
| LP | Lämpöpumppu |
| LTO | Lämmön talteenotto |
| ODP | Ozon Depletion Potential (Kylmälaitoksen suunnittelu) |
| TEWI | Total Equivalent Warming Potential (Kylmälaitoksen suunnittelu) |
| VJK | Vedenjäähdytyskone |

1 Johdanto

Tässä opinnäytetyössä tehtiin hankesuunnitelma suuren kauppakeskuksen teknisen käyttöiän lopussa olevien vedenjäähdytyskoneiden uusimiseksi keskitetyllä lämpöpumppulaitoksella. Opinnäytetyö tehtiin Sweco Finland Oy:n toimeksiannosta. Kohteena oli kauppakeskus Varsinais-Suomessa.

Kauppakeskuksen ilmanvaihdon jäähdytys on tuotettu aikakaudelle tyypillisesti ilmalauhdutteisilla vedenjäähdytyskoneilla. Kiinteistö koostuu kahdesta eri aikana rakennetusta osasta, vanhasta osasta ja laajennusosasta. Tämä opinnäytetyö keskittyy kauppakeskuksen vanhan osan vedenjäähdytyskoneiden uusimisen hankesuunnitelmaan. Uusittavia vedenjäähdytyskoneita on ensimmäisessä vaiheessa 4 kappaletta. Opinnäytetyössä arvioitiin vedenjäähdytyskoneiden uusintaa etukäteen tunnetuilla jäähdytysvaihtoehdoilla. Vaihtoehtojen soveltuvuutta arvioitiin teknisillä ja taloudellisilla tunnusluvuilla.

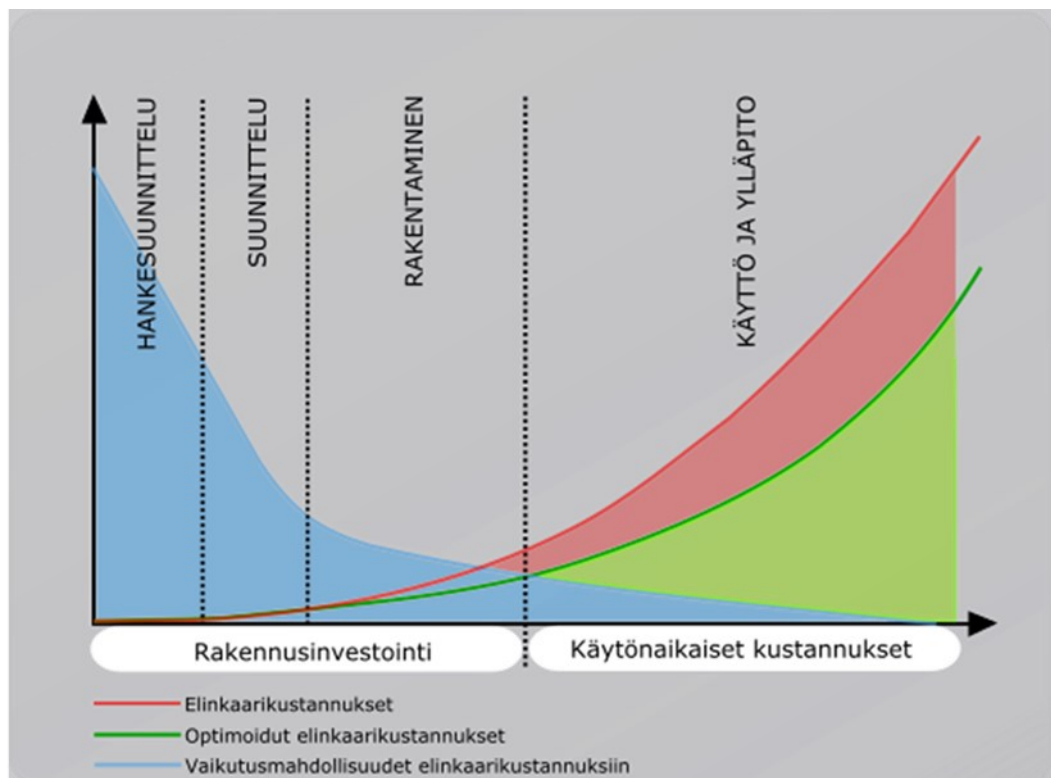
2 Talotekniikan hankesuunnitelma

Hankesuunnitelmia käytetään yleisesti rakentamisen projektien määrittelyvaiheessa, ja niiden tehtävä on suunnitella, miten hanke toteutetaan. Hankesuunnitelmavaihetta edeltään tarveselvitys tai se voi sisältyä hankesuunnitelmaan.

Hankesuunnitelmassa selvitetään eri vaihtoehdot tarpeen täyttämiseksi. Hankesuunnitelmassa selvitetään mitä tehdään ja miten projekti toteutetaan, jotta yllätyksiltä vältetään itse projektin toteutusvaiheessa.

Hankesuunnitelmassa selvitetään tarvittavat lupa-asiat ja viranomais selvitykset ja projektin toteutusmuoto sekä miten hankkeen laitehankinnat toteutetaan. Itse toteutussuunnittelua varten selvitetään mahdollisimman tarkasti jo hankesuunnitelmassa esim. putkireitit, sähköreitit, sähköliittymä ja laitteiden haalaukset.

Suurissa projekteissa hankesuunnitelman osuus koko projektin kustannuksista on vain noin 0,5 prosentin luokkaa, mutta siinä tehdään hankkeen kannalta merkittävimmät päätökset ja valinnat, jotka määrittelevät hankkeen kustannuksen. Hankesuunnitelma vaiheessa määritellään esimerkiksi projektin omistaja, millä tavalla projekti tehdään, selvitetään projektin onnistumiseen vaikuttavat asiat, projektin budjetti, mitä tuloksia projektilta odotetaan sekä projektin aikataulu (Kettunen 2003, 25, 49). Määrittelyvaiheen selvityksellä on erittäin suuri vaikutus projektin valmistumisen jälkeiseen käytön elinkaaren kustannuksiin (Heikkilä 2023).

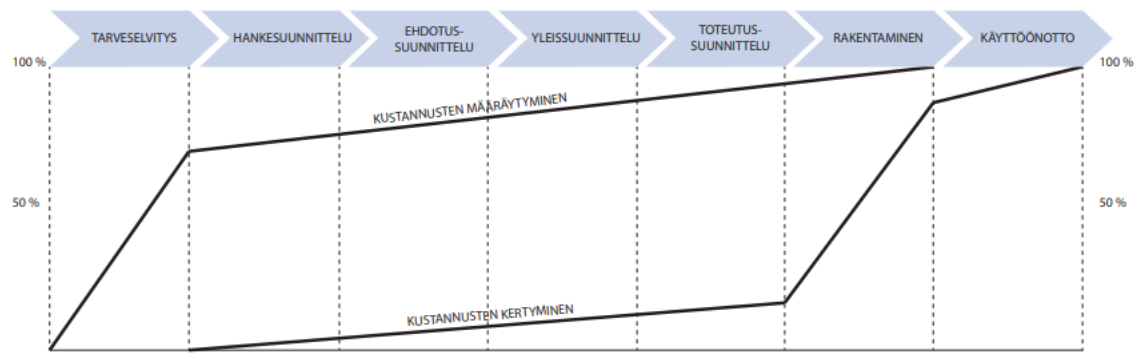


Kuva 1. Rakennusprojektin kustannuksien jakauma (Sweco Finland Oy).

Kuvassa 1 on esitetty havainnollisesti rakennusprojektin kustannusten jakautuminen suunnittelun ja käytönaikaisten kustannusten osalta. Samassa kuvassa on esitetty projektin eri vaiheiden vaikutus elinkaarikustannuksiin.

Tärkeimmät projektia koskevat päätökset tehdään hankesuunnitteluvaiheessa. Huolellisesti tehty hankesuunnitelma helpottaa ja nopeuttaa projektin myöhempiä vaiheita: jatkosuunnittelua, lupakäsittelyä, toteutussuunnittelua ja rakentamista (A-Insinöörit).

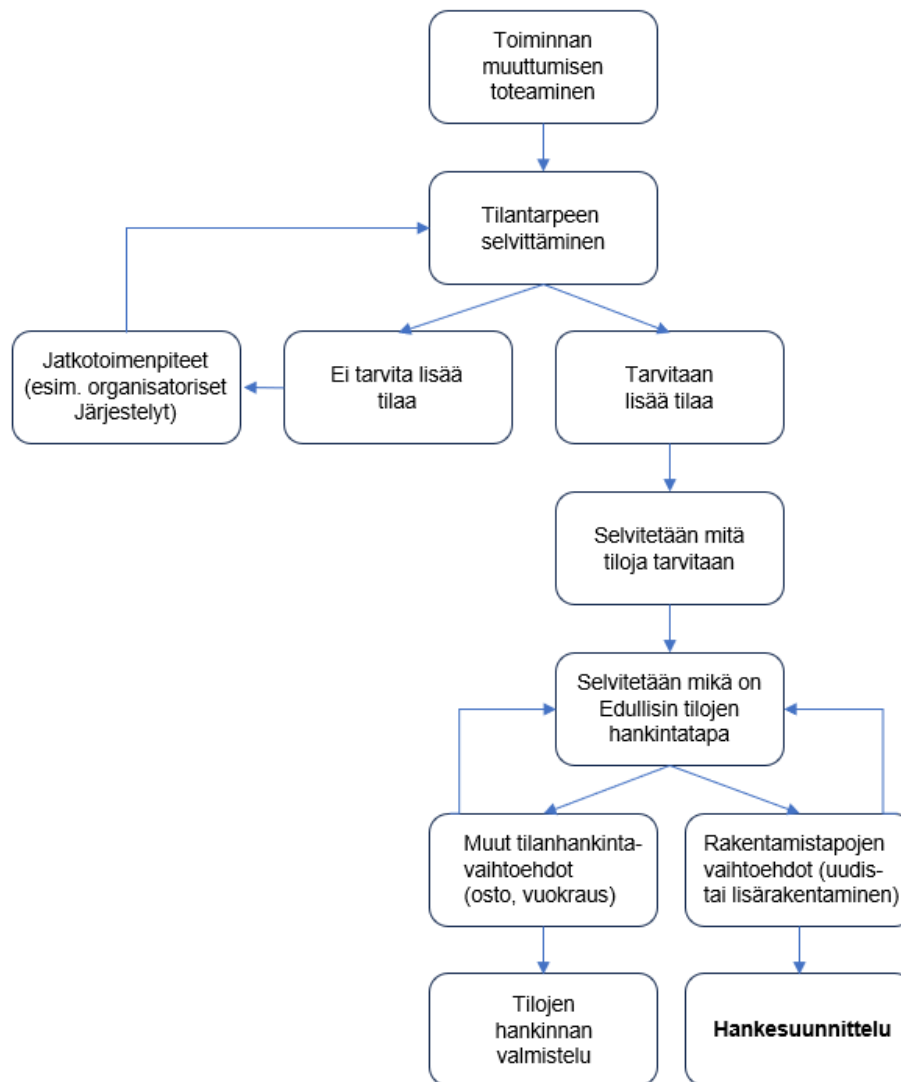
Jotta eteneminen hankkeessa tapahtuu ilman turhia esteitä, pitää hankesuunnitelman laadintavaiheessa ottaa huomioon monia eri asioita. Selvitettäviä asioita ovat muun muassa riskienhallintasuunnitelma, kustannusten jakautuminen, ympäristövaikutusten hallinta sekä tiedonhallintasuunnitelma. (Sitowise).



Kuva 2. Projektinkustannuksien jakaantuminen (RT 10-11226).

Kuvassa 2 on esitetty rakennusprojektien kustannusten jakautuminen projektin eri vaiheissa. Seuraavassa käydään läpi vaihe vaiheelta, mitä asioita eri kohdissa projektia pitää huomioida. Jokaisessa projektissa ei välttämättä ole kaikkia vaiheita tai osa vaiheista voi olla yhdistettyjä, jos projekti on selkeä tai pieni.

Tarveselvitys voi saada alkunsa eri tavoin, osa voi tulla sisäisen idean tai sisäisen kehitystarpeen pohjalta, osa voi myös saada alkunsa asiakkaan tilauksen pohjalta. Tarveselvityksessä perustellaan hankkeen tarpeellisuus tai olemassa olevien järjestelmien muutostarve. Tarveselvityksestä seuraa usein hankepäätös, jonka seurauksena tehdään hankesuunnitelma.



Kuva 3. Esimerkki tarveselvityksestä, muokattu (Junnonen J-M).

Kuvassa 3 on esitetty kiinteistön tilantarpeiden tarveselvityksessä huomioitavat asiat. Tarveselvityksestä voidaan edetä joko tilojen hankintojen valmisteluun tai hankesuunnitteluun.

Hankesuunnittelussa hankkeen toteuttamismahdollisuudet selvitetään perusteellisesti ja yksityiskohtaisemmin. Hankesuunnitteluvaiheessa on tavoitteena selventää, mitä hankkeen lopputuloksena odotetaan saatavan. Siinä selvitetään hankkeelle vaihtoehtoisia toimintamalleja sekä pohditaan, kuka kyseisen hankkeen voisi tehdä: ostetaanko ulkoa vai tehdäänkö omalla resurssilla.

Hankesuunnitteluvaihe voidaan pienissä tai selkeissä projekteissa yhdistää joko tarveselvitys- tai toteutussuunnitteluvaiheeseen.

Peruskustannusarvio muodostetaan lähtötietojen, kone- tai laitetarjousten sekä alustavien sähköistys-, putkisto- ja automaatiokaavioiden pohjalta hankesuunnitteluvaiheessa. Peruskustannusarvion tarkkuus riippuu lähtötiedoista ja on noin +/- 15 % luokkaa. Hankesuunnittelun tuloksena syntyy hankesuunnitelma, jonka perusteella tehdään investointipäätös. Joskus myös hanke voidaan jättää tekemättä tai siirtää tulevaisuuteen hankesuunnitelmassa todettujen kriteerien mukaan. (Pelin 2011, 167).

Hankesuunnitelman tuloksena syntyy raamit projektille:

- Kuka projektin omistaa?
- Minkä ongelman tai puutteen projekti poistaa tai mitä uutta arvoa projekti tuottaa?
- Mitä resursseja projektin toteutuksessa tarvitaan?
- Mitä tuloksia projektilta odotetaan?
- Mitkä ovat projektin sidokset muihin projekteihin ja kehityshankkeisiin?
- Projektin aikataulu?
- Raamibudjetti projektille

Ehdotussuunnitteluvaiheen aikana selvitetään hankkeen rakennuspaikan kaavatilanne, kunnallistekniikka sekä rakennuspaikan alustava pohjatutkimus. Korjaushankkeessa hankitaan tarvittavat olemassa olevasta rakennuksesta, joita ovat mm. mittapiirustukset, rakenneanalyysit, haitallisten aineiden analyysit ja teknisen kunnan arviointi. Tässä vaiheessa selitetään mahdolliset lupa-asiat.

Yleissuunnitteluvaiheessa tarkistetaan hankkeen lähtötiedot ja tavoitteet, tehdään aluesuunnitelma ja suunnitellaan alueen rakenteet periaatetasolla, suunnitellaan tilaratkaisut, määritellään rakennuksen kiinteät ja muuttuvat osat.

Asiakkaalle esitellään yleissuunnitelmia ja niitä verrataan aiemmin sovittuihin tavoitteisiin. Vertailtavia asioita ovat: suunnitelmien laajuustiedot,

kustannusarvio rakennuskustannuksista verrattuna tavoitehintaan, hankkeen toteutusaikataulu ja rahoitussuunnitelma.

Toteutussuunnittelussa yleissuunnitelma kehitetään rakentamisen ja hankinnan edellyttämiksi mitoitetuksi suunnitelmiksi ja tuotemäärittelyiksi.

Toteutussuunnitteluvaiheessa varmistetaan ratkaisujen ja detaljien tavoitteiden mukaisuus, määritellään asiakkaan erillishankinnat ja aikataulu. Lisäksi varmistetaan, että kaikki suunnitelmat muodostavat ehjän ja toimivan kokonaisuuden. (Junnonen 2020, 54).

Rakentamisvaiheessa tai toteutusvaiheessa varmistetaan rakennuksen sopimuksen mukainen toteutus, tavoitteet täyttävä lopputulos ja tarvittavat käyttö- ja ylläpito valmiudet.

Käyttööntöövaiheessa varmistetaan kaikkien toimintojen ja laitteiden suunnitelmien mukainen toiminnallisuus. Käyttööntöövaiheessa voidaan todentaa järjestelmien energiatehokkuus ja vastaavuus laiteoimittajien sekä suunnitelmien mitoitusteknisiin ominaisuuksiin esim. lämpötiloihin ja virtaamiin. (Junnonen 2020, 122).

Käyttööntöövaiheen jälkeen tulee vielä takuu aika, jolloin seurataan laitteiston toimivuutta ja tehdään vielä tarvittavia säätöjä sekä korjataan mahdolliset puutteet.

2.1 Jäähdytyksen uusinnan hankesuunnitelma

Kiinteistön jäähdytys on osa taloteknisiä järjestelmiä, tämän takia jäähdytyksen uusinnan hankesuunnitelmassa huomioitavat asiat ovat osittain samoja kuin edellä käsitellyssä rakentamisen projektien hankesuunnitelma osiossa.

Jäähdytyksen uusinnan tarveselvitys yhdistyy usein itse hankesuunnitteluun.

Hankesuunnitelmassa selvitetään, mitä laitteita jäähdytysentuotanto sisältää, mitä kylmäainetta jäähdytyksen tuotannossa käytetään sekä miten jäähdytystä käytetään. Nykyään lähes kaikissa tapauksissa jäähdytyksen lisäksi selvitetään myös tarve lämmityksen osalta, onko samanaikaista tarvetta jäähdytykselle ja

lämmitykselle ja voidaanko energioita kierrättää kiinteistöissä. Lupa-asiat ovat hyödyllistä selvittää hankesuunnitelmaa tehdessä. Jos kiinteistön ulkopuolelle tulee muutoksia, lupa yleensä tarvitaan kunnalta.

Hankesuunnitelmassa selvitetään myös, onko esimerkiksi jäähdytyksessä eri lämpötilatasoille tarvetta, tarvitaanko tuloilman kuivaamista ja miten kriittinen asia jäähdytys on kiinteistön käytön tai kiinteistön vuokralaisten kannalta? Datasaleissa ja sairaaloissa jäähdytys on erittäin kriittistä, jonka takia jäähdytysjärjestelmä on usein varustettava vara tuotannolla tai joissain tapauksissa jopa toisella kokonaisella varajäähdytysjärjestelmällä.

Jäähdytystä ja lämmitystä tarvitaan Suomessa tyypillisesti eri vuoden aikoina. Jäähdytyskaudella ei kiinteistöissä juurikaan ole tarvetta samanaikaiselle lämmitykselle, jolloin lauhdelämmön hyödyntämiselle selvitetään muita vaihtoehtoja, esimerkiksi lämpimän käyttöveden tarve. Elinkaarikustannusten kannalta ja energiateknisesti jäähdytyksessä painottuu teho ja lämmityksessä energian kulutus. Jäähdytyksessä teho on suuri verrattuna käyttötunteihin, joten vuorokaudessa kiinteistön jäähdytyksen tunnit ovat pienemmät kuin lämmityksen. (Heikkilä T.).

Jäähdytyksen saneeraushankkeissa lähtötiedot ovat yleensä asiakkaan tai kiinteistön käyttäjän arvioita tai tunteeseen perustuvia oletuksia jäähdytyksen riittävydestä. Saneerattavissa jäähdytysjärjestelmissä kulutusta ja tuottoa on hyvin harvoin mitattu tai jos on mitattu, niin tietoja ei ole tallennettu mihinkään. Nykyisin mittarointi kuuluu järjestelmän toimivuuden seurantaan oleellisena osana. Jäähdytyshankesuunnitelman kustannusarviot eivät voi olla tarkempia kuin saadut lähtötiedot, jonka takia tarkoilla lähtötiedoilla voidaan kustannusarviota myös tarkentaa.

Uudiskohteen tarvittavaa jäähdytystehoa ei useinkaan tiedetä, jos mitattua tietoa ei ole kertynyt tai saatavilla vastaavista kohteista, tällöin myös jäähdytyslaitteistot saattavat olla reilusti ylimitoitettuja. Kokemusperäisillä tiedoilla tai "hihavakioilla" saadaan suuntaa antavaa tietoa, esimerkiksi jäähdytyksessä voi lähtökohtana käyttää 5–10 W/m³ tehoa ja

huipunkäyttöajasta arvio riippuen kiinteistön käytöstä. Huippujäähdytystehon käyttöaika voi vaihdella kiinteistöstä tai kohteesta riippuen 400 tunnin ja yli 5000 tunnin välillä, jolloin ero tarvittavan energiamäärässä voi olla todella suuri.

Asuinkerrostalon jäähdytyksen huipunkäyttöaika poikkeaa paljon teollisen prosessin vaatiman jäähdytyksen huipunkäyttöajasta. Tällöin tarvitaan simulointia esimerkiksi IDA-ICE ohjelmalla kiinteistön jäähdytystarpeesta samalla tavalla kuin lämmitystarpeesta.

3 Kiinteistöjäähdytyksen yleisimmät vaihtoehdot ja niiden tärkeimmät ominaisuudet hankesuunnitelman kannalta

Kiinteistöjen jäähdytyksessä yleisimmin käytetyt vaihtoehdot ovat:

- Suorahöyrystysjärjestelmä
- Välillinen jäähdytysjärjestelmä
 - Kaukojäähdytys
 - Yhdistetty kiinteistökohtainen lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmä

3.1 Suorahöyrystysjärjestelmä

Suorahöyrystysjärjestelmässä kylmäaine kiertää huonetilassa olevassa höyrystimessä tai höyrystin on sijoitettu tuloilmakoneeseen tai tuloilmakanavaan, jolloin ei tarvita erillistä lämmönsiirintä ilman jäähdyttämiseen (Aittomäki 2012, 269). Suorahöyrysteisiä tuloilman jäähdytysjärjestelmiä toteutetaan useimmiten alle 70 kW jäähdytysteholle. (Kaappola 2004, 211). Suorahöyrystysjärjestelmä voi olla molempia, keskitetty tai hajautettu jäähdytysjärjestelmä. (Aittomäki 2012, 271).

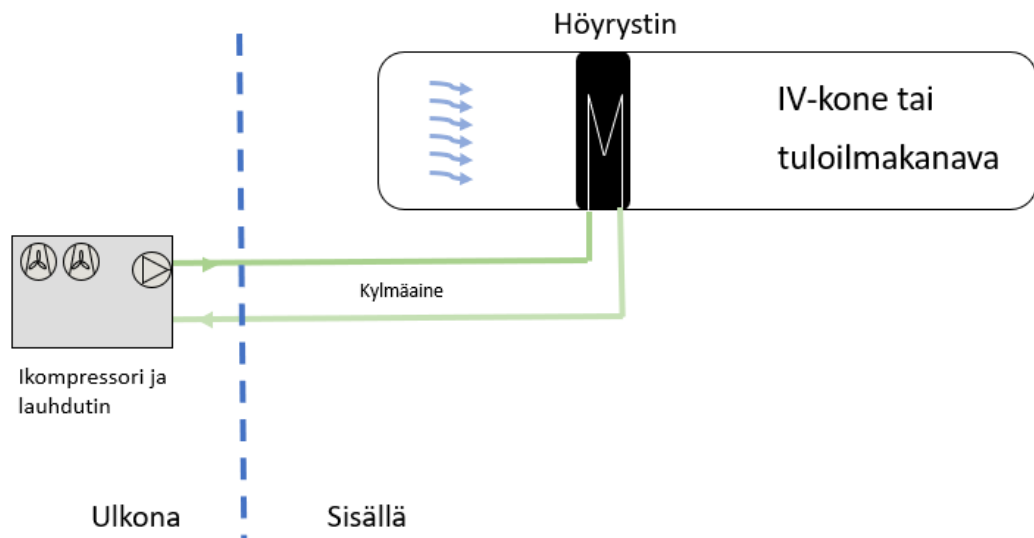
Suorahöyrystysjärjestelmän etuja ovat (Kylmäextra, 10):

- Edullinen järjestelmä
- Järjestelmän säädölle ei aseteta erityisiä vaatimuksia
- Jäähdytyksen teho vaikuttaa heti höyrystymisen jälkeen kohteessa
- Kylmäaineputkien pituus on kohtuullinen

Haittoina järjestelmälle ovat:

- Kylmäainemäärä on usein välillistä järjestelmää suurempi
- Kylmäaineputkiston asennuksessa haasteita
- Öljyn palautumiseen kiinnitettävä huomiota
- Välillisiä järjestelmiä suurempi kylmäaineen vuotoriski

Suorahöyrysteinen jäähdytysjärjestelmä



Kuva 4. Suora höyrystysjärjestelmä, yksinkertaistettu muokattu periaatekaavio (Sweco periaatekaaviokirjasto).

Kuvassa 4 on kuvattu suorahöyrysteinen jäähdytysjärjestelmä, jossa kylmäaine kiertää ulos sijoitetun kompressorin ja tuloilmakoneen jäähdytyspatterin välillä.

3.2 Välillinen jäähdytysjärjestelmä

Välillisessä jäähdytysjärjestelmässä jäähdytys tuotetaan vedenjäähdytyskoneessa ja siirretään veden tai muun liuoksen välityksellä esimerkiksi ilmanvaihtokonehuoneen jäähdytyspatterille. Vedenjäähdytyskone voi olla asennettu samaan konehuonetilaan sisäasenteisena tai ulkoasenteisena vesikatolle.

Välillisten järjestelmien etuina ovat:

- Helppo ja tarkka säädettävyys
- Pieni kylmäainetäytös
- matalat liuosverkoston paineet
- Laajettavuus ja muunneltavuus

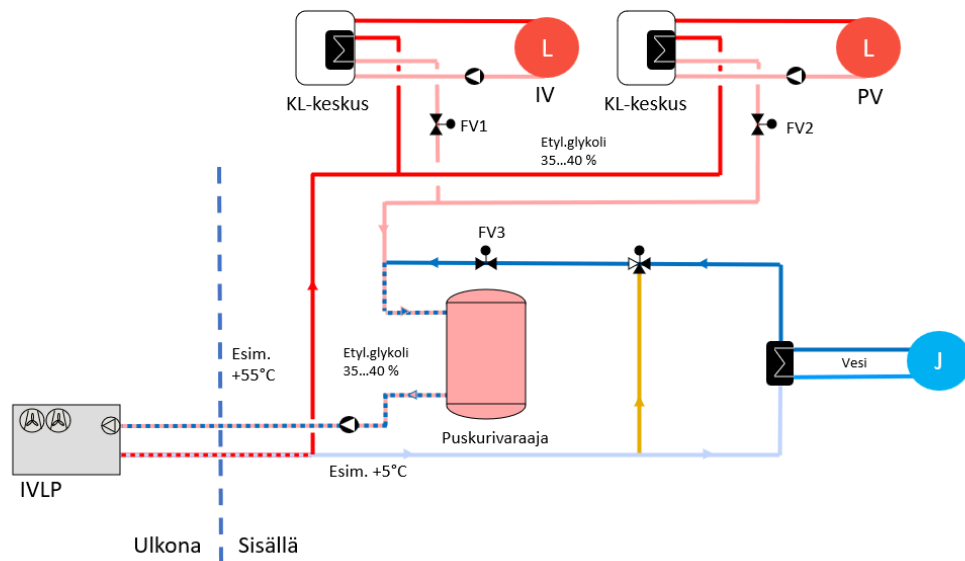
- Jäähdytyskoneikko voi olla tehtaalla valmiiksi testattu
- Jäähdytettävien kohteiden etäisyyttä konehuoneesta ei ole rajoitettu
- Useiden eri tilojen jäähdytys samalla järjestelmällä

Välillisen järjestelmän haittoina ovat:

- Ylimääräinen lämpötilaero
- Usein kalliimpi investointi suoraan järjestelmään verrattuna
- Suuret pumput ja putket eristyksineen
- Useasti kalliimpi investointi suoraan järjestelmään verrattuna

Välillisten järjestelmien teholuokat vaihtelevat 30–2000 kW välillä ja ne voivat olla keskitettyjä tai hajautettuja jäähdytysjärjestelmiä aivan kuten suorat höyrystysjärjestelmät. (Kapanen 2019).

IVLP -välillinen lämmitys (talvi) tai jäähdytys (kesä), LV kaukolämmöllä



Kuva 5. Välillinen järjestelmä, yksinkertaistettu muokattu periaatekaavio (Sweco periaatekaaviokirjasto).

3.2.1 Kaukojäähdytys

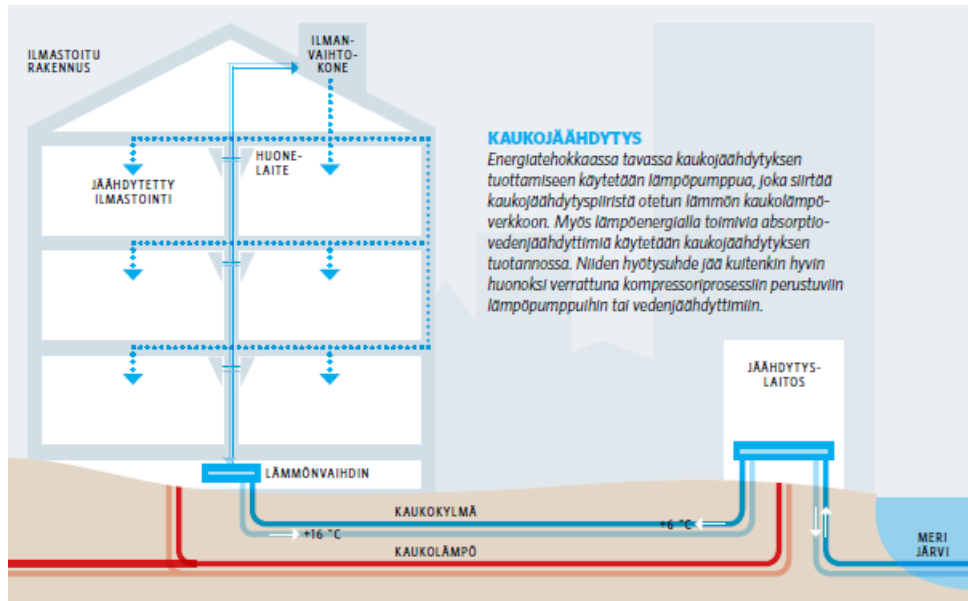
Kaukojäähdytys kuuluu välillisiin jäähdytysjärjestelmiin. Kaukojäähdytys on yleistynyt tiheästi rakennetussa ympäristössä suurimmissa kaupungeissa.

Kaukojäähdytystä tuotetaan keskitetyissä laitoksissa, joista vedellä jaetaan jäähdytysenergia asiakkaille kuvassa 6 on esitetty kaukojäähdytyksen periaate. Kaukojäähdytyksen mitoitus menolämpötilat vaihtelevat kaupunkikohtaisesti +7–9 °C välillä. Siirtimien asteisuus 2-3 °C otetaan huomioon mitoituksessa, ei kaukojäähdytys sovellu tuloilman kuivaamiseen, jos jäähdytys / kuivauspatteri on mitoitettu +7 / 12 °C. Jäähdyttäminen kaukojäähdytyksellä on mahdollista, kun jäähdytyspatteri on mitoitettu esim. +10 / 15 °C.

Kaukojäähdytystä tuotetaan suurimmissa kaupungeissa (Helsinki, Espoo, Turku ja Vaasa) puhdistetusta jätevedestä. Jätevedestä otetaan lämpöä talteen lämpöpumpulla, jäähtyneellä jätevedellä jäähdytetään kaukojäähdytysverkon vettä, joka jaellaan putkistoa pitkin asiakkaille. Jätevedestä kerätty lämpö siirretään kaukolämpöverkkoon, jolloin saavutetaan hyvä kokonaishyötysuhde lämpöpumpulle.

Kaukojäähdytystä voidaan tuottaa myös vesistöistä, kuten Helsingissä, Tampereella ja Kuopiossa on tehty. Keväällä vesistön lämpö on vielä riittävän kylmää, eikä lämpöpumppua tarvita jäähdytyksen tuotantoon, vaan vesistön vettä pumpaamalla jäähdytetään kaukojäähdytysverkkoa. Vesistön lämmennettyä jäähdytys muuttuu koneelliseksi lämpöpumppujen tai vedenjäähdytyskoneiden avulla.

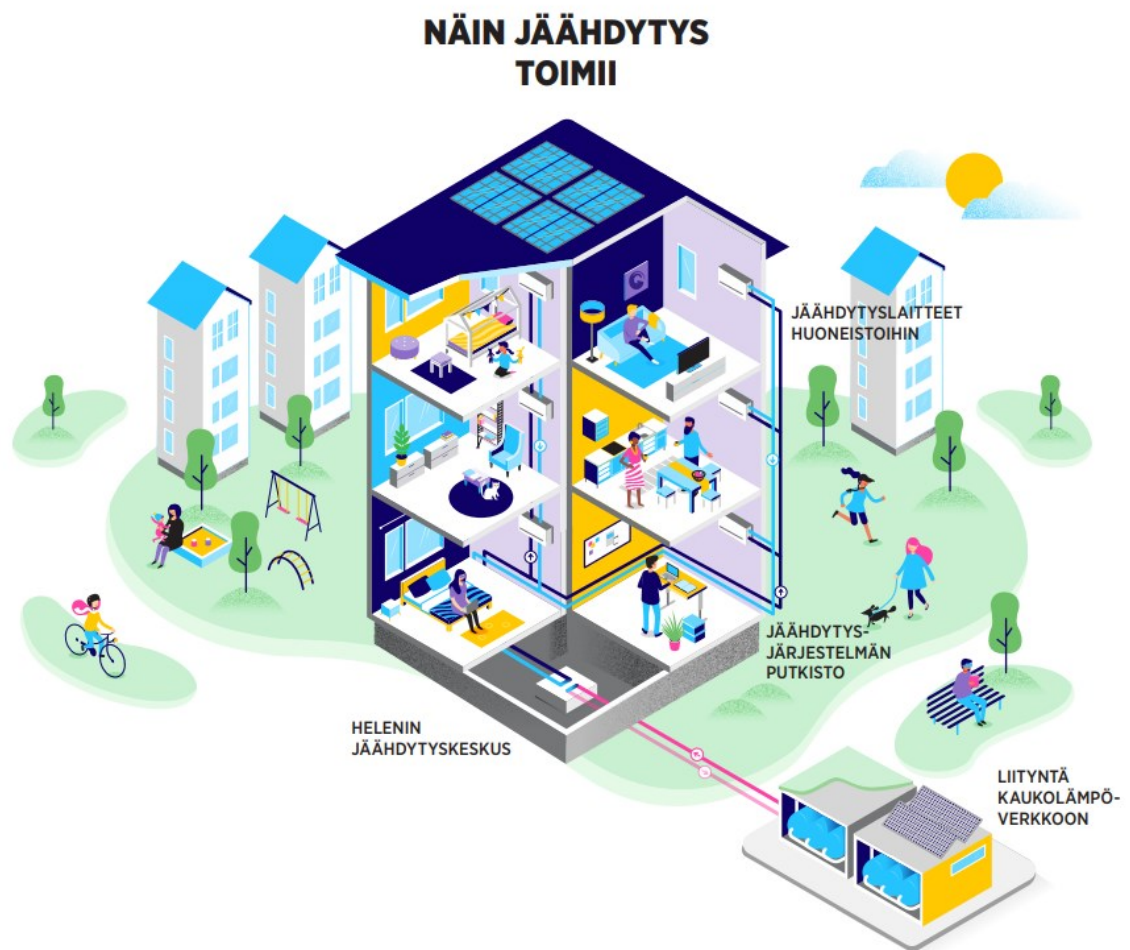
Kaukojäähdytyksen etuina ovat pieni tilantarve kiinteistöstä ja huolettomuus, käyttäjän ei tarvitse itse huollattaa jäähdytyksen tuotantolaitteita, vaan palvelun tuottaja vastaa laitteiden huollosta (Turku Energia).



Kuva 6. Kaukojäähdytysjärjestelmä (Motiva).

3.2.2 Yhdistetty kiinteistökohtainen jäähdytys ja lämmitys

Kaukojäähdytyksen rinnalle ovat energiayhtiöt viime vuosina alkaneet tarjota kiinteistökohtaista jäähdytystä, kaukojäähdytysverkoston ulkopuolisille kohteille. (Helen Oy.) Energiayhtiöt tarjoavat kiinteistökohtaista yhdistettyä lämmitys- ja jäähdytystuotantoa kaukolämpöverkon asiakkaille. Kiinteistökohtaisissa järjestelmissä jäähdytys tuotetaan lämpöpumpuilla, joiden lauhdelämpö hyödynnetään kiinteistössä tai kaukolämpönä, kuten kuvassa 7 on esitetty.



Kuva 7. Kiinteistöjäähdytys (Helen Oy).

Kiinteistöjäähdytystä voidaan tuottaa myös maalämpöjärjestelmällä. Jäähdytyskaudella voidaan aluksi hyödyntää maajäähdytystä passiivisesti. Maajäähdytystä voidaan käyttää passiiviseen ja aktiiviseen jäähdytykseen.

Passiivisessa jäähdytyksessä maaperään pumpataan kiertoliuos pumpulla liuosta, joka viilenee maaperässä. Viilentynyt liuos jäähdyttää tuloilmaa tai suoraan tiloja konvektorien avulla.

Aktiivisella jäähdytyksellä tarkoitetaan lämpöpumpun avulla tuotettua jäähdytystä. Maaperä lämpenee passiivisen jäähdytyksen seurauksena, jolloin liuos ei ole tarpeeksi viileää tuloilman jäähdytykseen. Maalämpöpumpulla viilennetään liuosta mitoituslämpötilaan esim. $+5^{\circ}\text{C}$, tällöin jäähdytyksessä syntyvä lauhdelämpö siirretään geoenergiakaivon avulla maaperään.

4 Kauppakeskuksen jäähdytysjärjestelmä

Kauppakeskus on rakennettu 2000 luvun alussa, jolloin on myös asennettu nykyiset käytössä olevat vedenjäähdytyskoneet. Kiinteistö sijaitsee Varsinais-Suomessa ja sen kokonaispinta-ala on noin 90 000 m². Kauppakeskus koostuu kahdesta eri aikana rakennetusta osasta, vanhasta osasta ja laajennusosasta, joka on rakennettu 2010 luvulla.

Kohteen jäähdytysprosessi on tavanomainen ulkoasenteisilla ilmalauhdutteisilla vedenjäähdytyskoneilla toteutettu tuloilman välillinen jäähdytysprosessi. Vedenjäähdytyskone jäähdyttää höyrystimessä glykolivesiliuoksen +7°C, joka pumpataan tuloilmakoneen jäähdytyspatterille. Jäähdytyspatterilta liuos palaa noin +12°C lämpöisenä.

Jäähdytyksen tuotannossa prosessissa syntyvä lämpöenergia lauhdutetaan puhaltimilla varustetun lauhduttimen avulla ympäröivään ulkoilmaan. Suurissa kauppakeskuksissa saattaa olla useita ilmanvaihtokonehuoneita sekä tuloilmakoneita, jotka palvelevat eri alueita kauppakeskuksessa. Yhdellä vedenjäähdytyskoneella jäähdytetään yhtä tai useampaa tuloilmakoneen jäähdytyspatteria.

Kauppakeskuksen vanhan osan ilmanvaihtoa jäähdytetään kolmentoista eri tehoisen vedenjäähdytyskoneen avulla. Vedenjäähdytyskoneiden jäähdytysteho vaihtelee 60 kW ja 700 kW välillä, kokonaisuudessa jäähdytystehoa on yhteensä noin 2800 kW. (Kohdekäynti Mika Karbin).

Vedenjäähdytyskoneiden uusinnan tavoite on lisätä kauppakeskuksen energiatehokkuutta sekä hyödyntää jäähdytyksessä syntyvä lämpöenergia. Tässä opinnäytetyössä keskityttiin vanhan osan neljän vedenjäähdytyskoneen uusintaan. Yhtenä kriteereistä uusinnalle oli järjestelmän skaalattavuus, koska vanhan osan vedenjäähdytyskoneiden uusinta on tarkoitus suorittaa kahdessa vaiheessa. Skaalattavuudella tarkoitetaan tulevaisuuden jäähdytystarpeen kasvun huomioimista hankesuunnitelmassa.

Ensimmäisessä vaiheessa korvataan noin puolet jäähdytystehosta ja toisessa vaiheessa loput vanhan osan jäähdytystehosta, lisäksi muuta jäähdytystarvetta on mahdollisesti tulossa. Alustava aikataulu projektin toteutukselle on vuoden 2024 aikana uusia 4 kappaletta vedenjäähdytyskoneita, joiden yhteisjäähdytysteho on noin 1400 kW.

Kauppakeskuksen vedenjäähdytyskoneet on asennettu kauppakeskuksen rakennusvaiheessa. Nykyisten vedenjäähdytyskoneiden kylmäaineen R407C GWP-arvo on EU:n rajoitelistalla, joten sen käytöstä on tarve luopua.

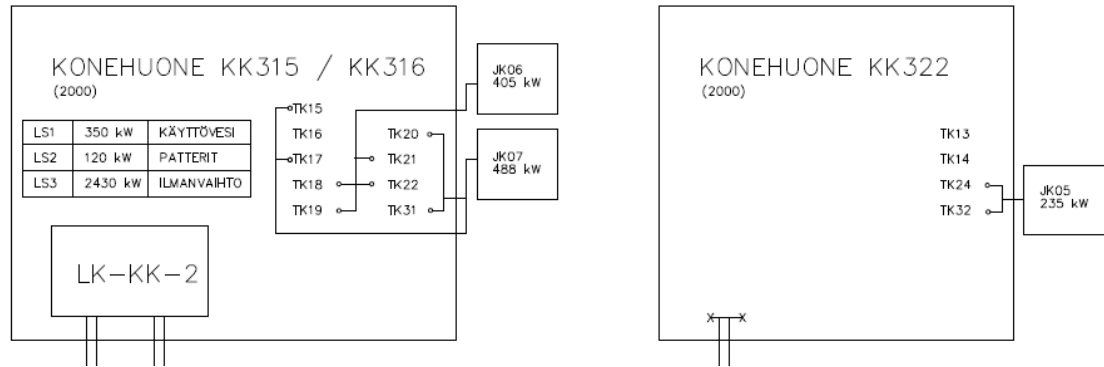
Hankesuunnitelmalla selvitetään eri jäähdytysvaihtoehtojen edut ja haasteet kauppakeskuksessa, jäähdytystehotarpeen ollessa noin 1400 kW. Kuvassa 8 on nykyisin käytössä oleva vedenjäähdytyskone.



Kuva 8. Vedenjäähdytyskone vesikatolla (Mika Karbin).

Kuvassa 8 on yksi uusittavaksi kaavailtu vedenjäähdytyskone. Raitisilma-aukot ovat liian lähellä nykyisiä sijoitusmääräyksiä.

Kuvassa 9 on kauppakeskuksen jäähdytys esitetty yksinkertaistetussa kaaviossa osa uusittavista vedenjäähdytyskoneista sekä niiden jäähdytyksen tuotannon tuloilmakoneet IV-konehuoneissa. Yhdellä VJK:lla voidaan näissä konehuoneissa jopa neljää tuloilmakoneen patteria.



Kuva 9. Kaavio konehuoneista ja vedenjäähdyttimistä (Kauppakeskuksen kaaviot).

5 Hankesuunnitelmassa tutkitut vaihtoehdot

Selvitys vedenjäähdytyskoneiden uusinnasta aloitettiin kesällä 2023. Kauppakeskus päätti teettää hankesuunnitelman Sweco Finlandilla vedenjäähdytyskoneiden uusimisesta. Nykyiset vedenjäähdyttimet on asennettu kauppakeskuksen rakennusvaiheessa vuonna 2001.

Kauppakeskuksen tahtotila oli lisätä jäähdytyksen energiatehokkuutta, jonka takia jäähdytyksessä syntyvän lämmön hyödyntämistä tarkasteltiin yhtenä kriteerinä vertailussa.

Hankesuunnitelmassa päätettiin tutkia neljää välilliseen jäähdytykseen perustuvaa vaihtoehtoa. Jäähdytyksen mitoitus lämpötilat olivat samat kuin alkuperäisissä vedenjäähdytyskoneissa ja tuloilmakoneiden pattereissa. Jäähdytystehoa kasvatettiin hieman alkuperäisiin vedenjäähdytyskoneiden tehoon verrattuna, asiakkaan toiveesta tulevaisuuden tarpeita silmällä pitäen.

Tarkasteltavat vaihtoehdot olivat ilmalauhdutteiseen vedenjäähdytykseen, maajäähdytys, ilma-vesilämpöpumpppuihin ja lämpöpumpppuihin perustuvat järjestelmät. Lämpöpumppu vaihtoehdolla tarkoitetaan vesi-vesi lämpöpumppuja. Kaukojäähdytysverkkoa ei kauppakeskuksen läheisyydessä ole, joten sitä ei tarkastelussa huomioitu.

Hankesuunnitelmassa tehtiin vaihtoehdoille tekniset sekä taloudelliset tarkastelut. Vaihtoehtojen tarkastelussa huomioitiin myös kylmäaineisiin liittyvät tulevaisuuden säännökset niiltä osin, kun tietoa oli saatavilla.

5.1 Ilmalauhdutteinen vedenjäähdytyskone

Ilmalauhdutteisia vedenjäähdytyskoneita käytetään yleisesti tuloilman jäähdytyksessä sekä kuivaamisessa. Niitä on saatavilla sekä ulko- että sisäasenteisina. Ilmalauhdutteisen ulkoasenteisen vedenjäähdytyskoneen etuina ovat pieni tilantarve IV-konehuoneesta. VJK on kustannustehokas nopeahkon asentamisen johdosta, sekä energiatehokkuutta pystytään

lisäämään vapaajäähdytyksen avulla. Valmistajia on useita ja kohteeseen sopivaa jäähdytystehoja löytyy valmistajien laajoista tuotevalikoimista.

Vedenjäähdytyskoneiden hetkellinen jäähdytyshyötysuhde EER on korkea, joka on yksi eduista. Hetkellinen jäähdytyshyötysuhde EER lasketaan kaavalla 1.

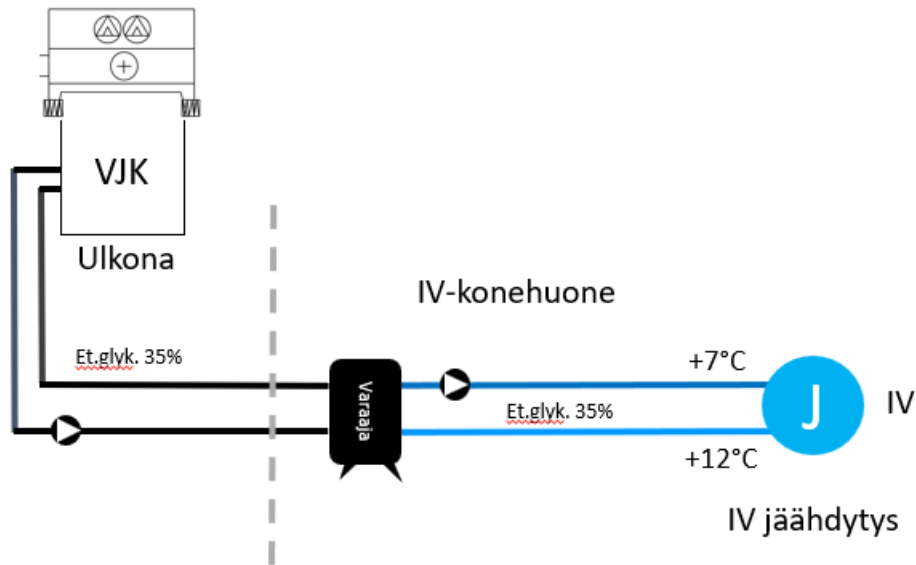
$$\varepsilon = \frac{Q_{tu}}{W_{ot}}$$

Kaava 1. Jäähdytyksen hetkellinen hyötysuhde.

Kaavassa ε on EER, joka tarkoittaa jäähdytyksen hetkellistä hyötysuhdetta, Q_{tu} on hetkellinen jäähdytyksen tuotto ja W_{ot} on ottoteho. Esimerkiksi 1 kW:n ottoteholla tuotetaan jäädytystä 4 kW, tällöin EER on 4.

Haastavina puolina on vedenjäähdytyskoneiden suuri koko, jolloin uusien vedenjäähdyttimien nosto vanhojen tilalle olisi hankalaa sekä ettei jäähdytyksessä syntyvää lauhdelämpöä hyödynnetä. Nykyiset vedenjäähdytyskoneet sijaitsevat kauppakeskuksen vesikatolla, rakennuksen keskiosassa. Nosturin pitää olla riittävällä kapasiteetilla varustettu, jotta sillä pystytään nostamaan laitteet katolle. Nostopaikkoja ei ole kuin yksi, ja paikka sijaitsee kauppakeskuksen päivittäisen logistiikan kulkualueella.

Vedenjäähdytyskoneiden kylmäaineina oli käytössä valmistajan mukaan R32, R454B, molempien kylmäaineiden turvallisuusluokka on A2L, joka tarkoittaa heikosti syttyvää kylmäainetta. Vertailuun otettiin Carrier 30XBE/30XBP vedenjäähdytyskoneet, joita löytyi sopivilla jäähdytystehoilla, ja joissa on käytössä R1234ze kylmäaine, tämä kylmäaine kuuluu myös turvallisuusryhmältään A2L (Carrier).



Kuva 10. Yksinkertaistettu muokattu periaatekaavio vedenjäähdytyskoneen kytkennästä (Sweco periaatekaaviokirjasto).

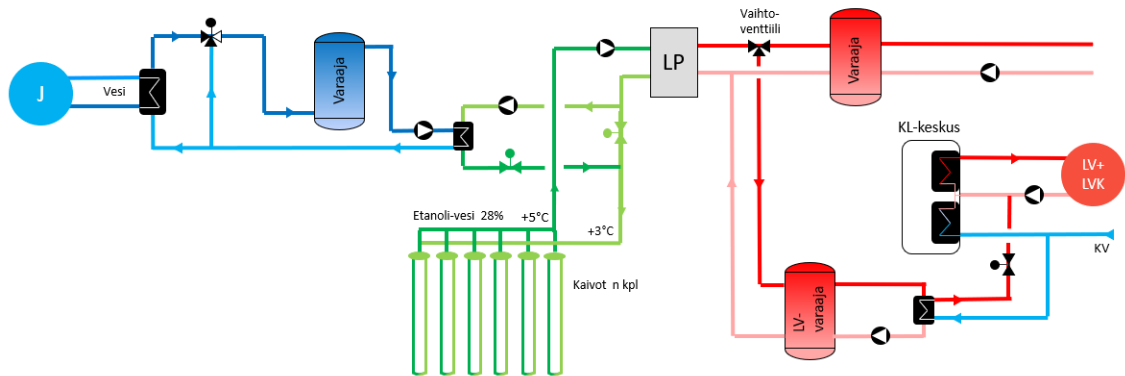
5.2 Maajäähdytys vaihtoehto

Suurissa kiinteistöissä on toteutettu maalämpöön ja/tai -jäähdytykseen perustuvia energiajärjestelmiä, joten kauppakeskuksen vaihtoehtojen tarkastelussa otettiin mukaan myös tämä vaihtoehto. Maajäähdytys vaihtoehdon etuina todettiin järjestelmästä saatava ilmaisenergia, usean eri valmistajan lämpöpumppuvaihtoehto.

Haasteena oli kauppakeskuksen jäähdytystehontarve, joka olisi vaatinut suuren määrän geoenergiakaivoja. Kaivoja olisi tarvittu kesän jäähdytyskaudella syntyvän lämmön lauhduttamiseen maaperään. Järjestelmä olisi vaatinut erillisen maalämpölaitoksen, jonne olisi lämpöpumput ja muut järjestelmän laitteet sijoitettu, koska valmiita tiloja ei kohteessa ollut.

Maaenergiajärjestelmän investointi oli tarkastelluista vaihtoehdoista suurin. Tarkastelussa todettiin kauppakeskuksen tontin olevan liian pieni vaaditulle energiakaivo määrälle, jonka takia järjestelmään tarvitsisi lisätä erillinen ilmalauhdutin.

Maalämpöpumppu Aktiivi- ja passiivijäähdytys



Kuva 11. Yksinkertaistettu muokattu periaatekaavio maajäähdytys (Sweco periaatekaaviokirjasto).

5.3 Ilmavesilämpöpumppeihin perustuva vaihtoehto

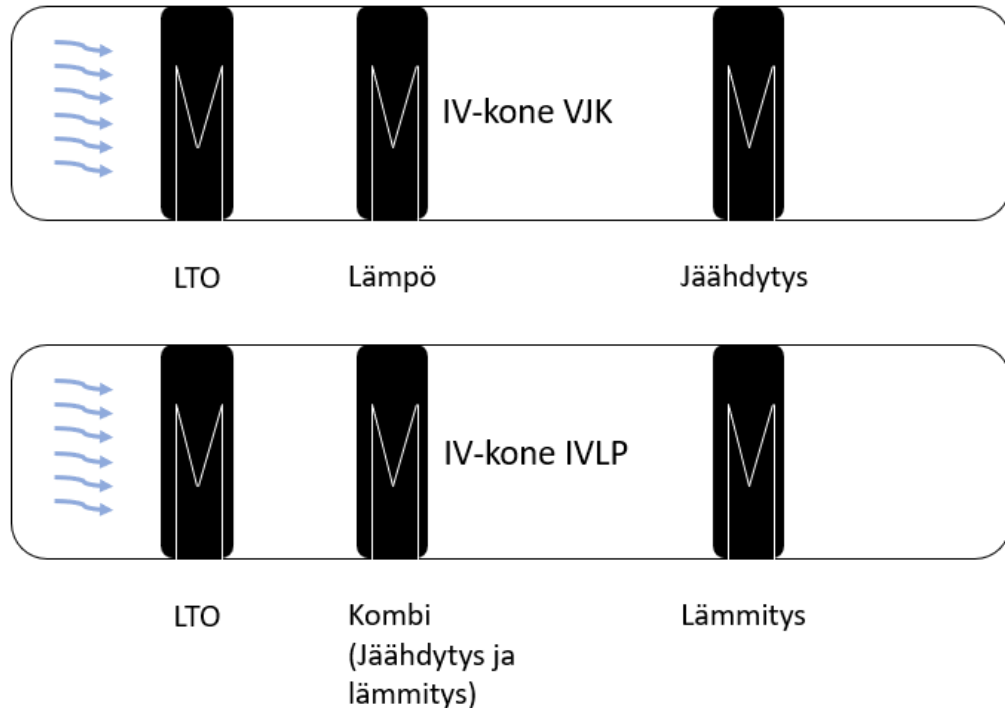
Ilma-vesilämpöpumppuja käytetään yleisesti tuloilman jäähdytyksessä, kuivaamisessa ja lämmityksessä. IVLP soveltuu molempiin uudis- ja saneerauskohteisiin, ja niillä on korvattu vanhoja vedenjäähdytyskoneita, kun on pyritty lisäämään kohteiden energiatehokkuutta.

Ilma-vesilämpöpumpuista on saatavilla kaksi- ja neliputki vaihtoehtoina. Kaksiputki vaihtoehdon etuja ovat samat kuin vedenjäähdytyskoneissa, lisäksi sillä voidaan tuottaa lämpöä, kun jäähdytykselle ei ole tarvetta.

Neliputki ts. multitoimisen ilma-vesilämpöpumpun hyödyt edelliseen jäivät verrattain pieniksi, koska samanaikaista jäähdytyksen ja lämmityksen tarvetta ei juurikaan ole kauppakeskuksessa, joten tarkastelussa keskityttiin kaksiputki vaihtoehtoon.

Haastavina puolina ilma-vesilämpöpumppu vaihtoehdolle on, että tuloilman esilämmitystä varten tarvitaan uusi kombipatteri tuloilmakoneeseen, ja koneen pattereiden järjestystä pitäisi muuttaa asennuksen yhteydessä. Muutoksen aikana tuloilmakonetta ei voi käyttää. Pattereihin liittyvät muutostyöt veisivät aikaa paljon ja kiinteistö sisäilmaolosuhde kärsisi muutostöistä. Kuvassa 12 on

esitetty yllä nykyinen pattereiden järjestys ja alla muutoksen jälkeinen pattereiden järjestys.



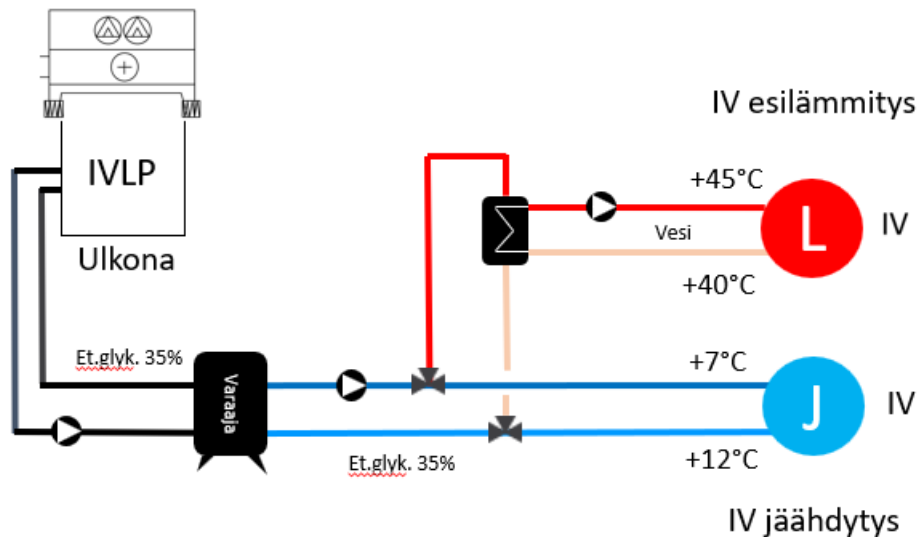
Kuva 12. Tuloilmakoneen pattereiden sijoitus (Mika Karbin).

Itse ilma-vesilämpöpumpun asennus on nopea, kun tasot koneita varten voidaan asentaa ennen itse koneen asennusta. Haasteena nähtiin nostot katolle aivan kuten vedenjäähdytyskone vaihtoehdossa sekä talvella sulatusvaiheeseen liittyvät haasteet. Sulatusta vaaditaan, kun kastepisteen takia ilman sisältämä vesihöyry kondensoituu höyrystimen pintaan ja jäätyy lamellien väleihin. Höyrystimen pinnalle kerääntyvä jää heikentää lämmönjohtavuutta ja hyötysuhde COP heikkenee samalla.

Sulatuksessa syntyy paljon vettä, joka pitää johtaa poistoputkea pitkin viemäreihin, muuten vesi jäätyy katolle. Poistoputket pitää olla saattolämmitettyjä. Sulatukseen liittyy myös teknisiä haasteita Suomen ilmaston takia, kompressoreita ja höyrystinpattereita on hajonnut jo ensimmäisten käyttöönottovuosien aikana. Ilma-vesilämpöpumppu valmistajat ovat kehittäneet

sulatukseen liittyviä asioita, mutta vielä riittää kehitettävää tehdasvalmiin laitteen markkinoille saattamiseen. (Alilehto 2023).

Ilma-vesilämpöpumpuissa käytetään samoja kylmäaineita kuin vedenjäähdytyskoneissa.



Kuva 13. Yksinkertaistettu muokattu periaatekaavio IVLP 2-putki (Sweco periaatekaaviokirjasto).

Kylmäaineista luonnolliset kylmäaineet R717 ja R744 ovat lisääntyneet IVLP sovelluksissa, myös R290 kylmäainetta on tullut ilma-vesilämpöpumppu sovelluksiin. Vertailussa käytettiin Daikin ilma-vesilämpöpumppuja, joiden kylmäaine oli R32.

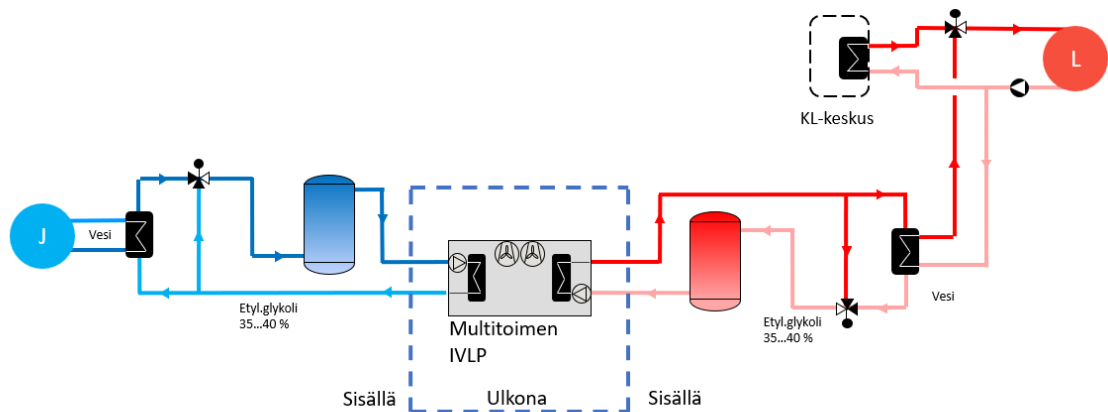
Alla olevassa kuvassa 14 on esimerkki Tanskaan rakennetusta suuresta ilmavesilämpöpumppulaitoksesta, jossa kylmäaineena on käytössä R717.



Kuva 14. IVLP-laitos Tanskassa, kylmäaine R717 (Mika Karbin).

Ilmavesilämpöpumpuista tarkasteltiin myös multitoimiset ilmavesilämpöpumppujen käyttö jäähdytys- ja lämmitysprosessissa. Multitoimisista lämpöpumpuista on kertynyt kokemusta Sweco Finlandilla, ja niissä on ollut toimintavarmuuden kannalta ongelmia. Kuvassa 15 on yksinkertaistettu periaatekaavio multitoimisesta lämpöpumpusta.

IVLP -Välillinen multitoiminen, lämmitys ja/tai jäähdytys, LV kaukolämmöllä



Kuva 15. Muokattu periaatekaavio multitoimisesta ilmavesilämpöpumppujärjestelmästä 4-putki (Sweco periaatekaaviokirjasto).

5.4 Lämpöpumppuihin perustuva vaihtoehto

Lämpöpumppujen etuina todettiin pienempi koko vedenjäähdytyskoneisiin ja ilmavesilämpöpumppuihin verrattuna.

Markkinoilla toimivien eri teollisten lämpöpumppujen valmistajat todettiin eduksi. Lämpöpumpuista löytyi useita eri tehdasvalmisteisia vaihtoehtoja.

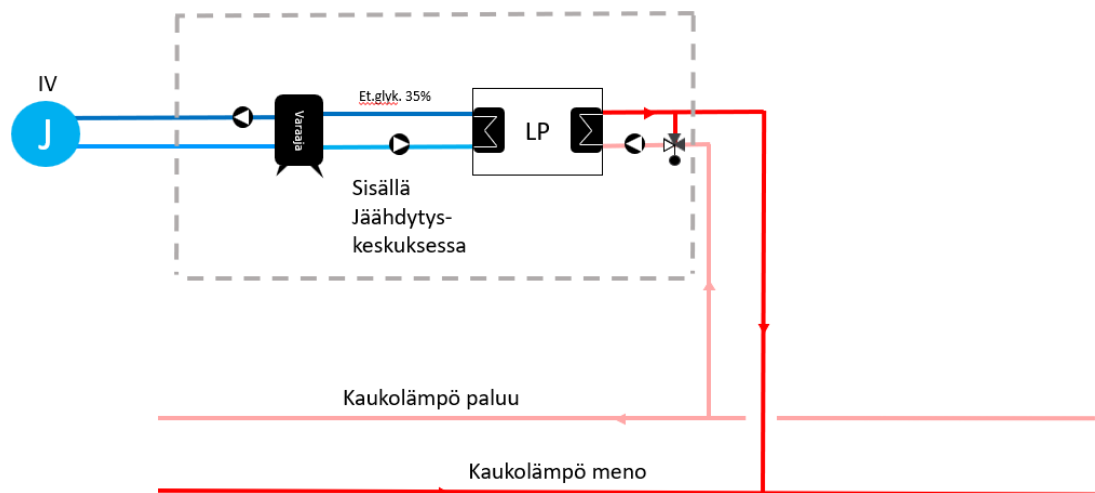
Jäähdytyksessä syntyvä lämmön hyödyntäminen todettiin mahdolliseksi lämpöpumppuihin perustuvassa vaihtoehdossa.

Haasteena todettiin kauppakeskuksen lämmön kulutuksen olevan jäähdytyskaudella pientä, joten lämpöpumppuja ei olisi voinut käyttää, koska lämpönielu ei olisi riittävä lauhduttamiseen.

IV-konehuoneiden lattian ja kauppakeskuksen katon kantavuus todettiin myös haasteeksi. Lämpöpumppuja varten olisi rakennettava vahvistettuja alustoja, joiden lisäämien ei ollut teknisesti ja taloudellisesti järkevää (Koponen 2023).

Lämpönielun pienuuden takia päädyttiin tarkastelemaan kaukolämpöverkkoon lauhtuvaa keskitettyä jäähdytyslaitosta. Keskitetty jäähdytyslaitos vastaa järjestelmältään kaukojäähdytyslaitosta. Jäähdytyksessä syntyvän lämmön hyödyntäminen tukee kauppakeskuksen tavoitetta energiatehokkuuden parantamiseen sekä myös energia-alan sektori-integraatiota.

Sektori-integraatiolla tarkoitetaan eri energiaverkkojen liittämistä toisiinsa, esimerkiksi lämmityksestä puhuttaessa sähkö- ja kaukolämpöverkkojen kautta toisiinsa. Sähköenergian avulla voidaan tuottaa kaukolämpöä, kun tuotantokustannus on alhainen. Sektori-integraatiossa asiakkaan rooli muuttuu energian kuluttajasta myös tuottajaksi (Energiateollisuus ry). Kuvassa 16 on kuvattu sähköä käyttävän lämpöpumpun liitännän kaukolämpöön, sähköllä tuotetaan siis kaukolämpöä saman aikaisesti jäähdytyksen kanssa.



Kuva 16. Yksinkertaistettu muokattu periaatekaavio lämpöpumpun kytkennästä kaukolämpöverkkoon (Sweco periaatekaaviokirjasto).

Alue- tai kaukolämpöverkkoon kytkettyjä lämpöpumppuja on suuremmissa kaupungeissa Suomessa toteutettu muutaman vuoden ajan. Lämpöpumput ovat ns. teollisuuslämpöpumppuja, joilla on mahdollista tuottaa korkeaa, yli 100 asteen lämpöenergiaa. Teollisuuslämpöpumput soveltuvat teollisuuden

prosessien korkealämpöisen hukkalämmön hyödyntämiseen, tämän takia niitä kutsutaan teollisuuslämpöpumpuiksi.

Teollisuuslämpöpuissa käytettävät kylmäaineet ovat osittain samoja kuin aiemmissa vaihtoehtoissa, lisäksi käytössä on myös R450A ja R513B kylmäaineita, jotka kuuluvat turvallisuusryhmään A1. Lämpöpumppujen tekninen valinta hankesuunnitelmaa varten tehtiin Oilon Oy:n Oilon Selection Tool ohjelmaa käyttäen.

Eri teknisiä jäähdytysvaihtoehtoja vertailtaessa tehtiin niille taloudellinen tarkastelu hankesuunnitelmaa varten. Kannattavuusvertailussa käytettiin hyödyksi kauppakeskuksen lämpöenergian kulutustietoja tuntitasolla, paikallisen kaukolämmönmyyjän kausihinnoittelua vuodelta 2023, asiakkaalta saatua sähköenergian hintaa, arvioita huoltokustannuksista, arviota uusimiskustannuksista elinkaaren aikana, arviota jäähdytysenergian kulutuksesta sekä arviota myytävän lämpöenergian hinnasta.

Lämpö- ja sähköenergian vuosittaisena hinnannousuna käytettiin 2 %. Huolto- ja uusimiskustannusten vuosittaisena nousuna käytettiin myös 2 %. Diskonttauskorkona käytettiin 3 %.

Sähköveroluokan 2 mukaista veroluokkaa käytettiin kaukolämpöverkkoon kytkettyjen lämpöpumppujen osalta sekä yli 0,5 MW lämpötehon muihin lämpöpumppujärjestelmiin. Ilma-vesilämpöpumpuista suurimmalla teholla varustettu olisi saattanut sopia sähköveroluokan 2 piiriin. Kuvassa 17 on esitetty sähkön ja eräiden polttoaineiden veroluokat.

Laki sähkön ja eräiden polttoaineiden valmisteverosta, eduskunnan päätöksen mukaisesti säädetään: "Verotaulukon 2 veroluokan II veroa suoritetaan myös sähköstä, joka käytetään geotermisen lämmön kiertovesipumpussa tai sellaisessa lämpöpumpussa, jonka nimellislämpöteho on vähintään 0,5 megawattia taikka kaukolämpö- tai kaukokylmäverkkoon liitettyssä lämpöpumpussa tai sähkökattilassa. Edellytyksenä on, että mainittuihin käyttötarkoituksiin toimitettava sähkö voidaan erikseen mitata". (Laki sähkön ja eräiden polttoaineiden valmisteverosta 30.12.1996/1260, 4:2,3.).

VEROTAULUKKO 2

| Tuote | Tuoteryhmä | Energiavero | Huoltovarmuusmaksu | Yhteensä |
|----------------------|------------|-------------|--------------------|----------|
| Sähkö snt/kWh | | | | |
| - veroluokka I | 1 | 2,24 | 0,013 | 2,253 |
| - veroluokka II | 2 | 0,05 | 0,013 | 0,063 |
| Mäntyöljy snt/kg | 3 | 30,54 | 0,00 | 30,54 |
| Polttoaine euroa/MWh | 4 | 5,70 | 0,00 | 5,70 |

Kuva 17. Sähköveroluokat (Laki sähkön ja eräiden polttoaineiden valmisteverosta 28:4.2).

Elinkaarikustannukset laskettiin Swecon laskentatyökalulla. Laskentatyökalussa on valmiina ilmavesilämpöpumppujen ja teollisten lämpöpumppujen teknisiä arvoja, joita muokattiin vastaamaan kauppakeskuksen olosuhteita vastaaviksi.

Elinkaarikustannukset laskettiin 20 vuoden ajalle. Liite 1.

5.5 Kylmäaineiden vaikutus valittavaan vaihtoehtoon

Euroopan parlamentin ja neuvoston F-kaasuasetus on annettu vuonna 2014. F-kaasuasetuksella on vaikutusta kylmäainevalintaan, koska asetuksella pyritään vähentämään korkean GWP-arvon kylmäaineiden valmistusta ja käyttöä. (Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EU) N:ro 517/2014).

Kylmäaineiden valmistajat voivat valmistaa tulevaisuudessa vähemmän korkean GWP-arvon omaavia kylmäaineita, jolloin näiden aineiden hinnan odotetaan nousevan. Kuvassa 18 on esitetty vähennysaikataulu kylmäaineiden markkinoille saattamista varten.

| | |
|-----------|-------|
| 2015 | 100 % |
| 2016–2017 | 93 % |
| 2018–2020 | 63 % |
| 2021–2023 | 45 % |
| 2024–2026 | 31 % |
| 2027–2029 | 24 % |
| 2030 | 21 % |

Kuva 18. Vähennysaikataulu (Kylmätekniikan koulutuspäivät 2021).

F-kaasuasetuksen päivityksestä on päästy yhteisymmärrykseen EU:ssa ja uusi päivitetty asetus tulee voimaan vuoden 2024. (Kylmäextra). Vielä ei ole tiedossa asetuksen tarkkaa tekstisisältöä, joten sen vaikutukset huomioidaan kauppakeskuksen hankkeessa, jos se etenee investointiin.

GWP-arvo eli Global Warming Potential on indeksi, joka kuvaa aineen ilmastoa lämmittävää vaikutusta (verrattuna CO₂, jonka GWP = 1). GWP-arvot perustuvat hallitustenvälisen ilmastopaneelin (IPCC) arvioihin. EU:n F-kaasuasetuksessa ja Montrealin pöytäkirjan Kigalin muutoksessa käytetään neljännen arviointiraportin (Fourth Assessment Report, AR4, IPCC 2007) GWP-arvoja, ja esim. lainsäädännön mukaisissa rajoituksissa sovelletaan niitä. (Ympäristö.fi 20.10.2023).

Kylmäaineiden ominaisuuksista GWP-arvo tarkoittaa vaikutusta kasvihuoneilmiöön, jonka vertailuluku on hiilidioksidin (CO₂) GWP-arvo 1. (Hakala ym., 2013, s. 23).

Toinen kasvihuoneilmiötä kuvaava arvo on TEWI-arvo. Ekvivalenttinen kokonaislämmittämisvaikutus (TEWI) (Total Equivalent Warming Impact) on tapa arvioida maapallon ilmaston lämpenemistä yhdistämällä kylmäaineiden vapautumisesta ilmakehään aiheutuva suora kokonaisvaikutus ja kylmäkoneiston käyttöänsä aikana sen käyttöön vaadittavasta energiasta aiheutuvien hiilidioksidi- ja muiden kaasupäästöjen aiheuttama välillinen kokonaisvaikutus. GWP arvoa käyttävät yleisesti kylmäaineiden valmistajat, kun taas TEWI-arvoa käytetään kyseisen järjestelmän vaikutusta kasvihuoneilmiöön.

HUOM. "Energiatehokkuuden parantaminen on yleensä merkittävämpi tavoite maapallon ilmaston lämpenemisen vähentämiseksi kuin kylmäainetäytöksen pienentäminen. Usein tehokkaampi kylmäkoneisto, jossa on korkeamman GWP-arvon omaava kylmäainetäyttö, on ympäristöystävällisempi kuin tehottomampi kylmäkoneisto, jossa on matalamman GWP-arvon omaava kylmäainetäyttö. Tämä pätee etenkin, kun kylmäainevuotojen päästöt

minimoidaan: ei vuotoja, ei suoraa ilmaston lämpenemisvaikutusta”. (SFS-EN 378-1).

Taulukossa 1 on esitetty kylmäaineiden ominaisuuksia. Otsonikatoa aiheuttavan ODP arvon pitää olla 0, GWP arvon mahdollisimman alhainen ja turvallisuusryhmän mielellään A1.

Taulukko 1. Taulukko kylmäaineiden ominaisuuksista (Danfoss Ref Tools App).

| Sarake1 | Aine | R-koodi | GWP-arvo | ODP | Turvallisuusryhmä |
|---------------------------------|--|---------|----------|-------|-------------------|
| Luonnolliset kylmäaineet | Butaani | R600 | 4 | 0 | A3 |
| | Propani | R290 | 3 | 0 | A3 |
| | Hiilidioksidi | R744 | 1 | 0 | A1 |
| | Ammoniakki | R717 | 0 | 0 | B2L |
| CFC-kylmäaineet | | R12 | 10900 | 1 | A1 |
| HCFC-kylmäaine | | R22 | 1810 | 0,055 | A1 |
| HFC-kylmäaineet | Seos (R32 23 %, R125 25 %, R134a 52 %) | R407C | 1774 | 0 | A1 |
| | Seos (R32 50 %, R125 50 %) | R410A | 2088 | 0 | A1 |
| | HFC-134a | R134a | 1430 | 0 | A1 |
| | HFC-32 | R32 | 675 | 0 | A2L |
| HFO-kylmäaineet | Seos (R134a 42 %, R1234ze 58 %) | R450A | 605 | 0 | A1 |
| | Seos (R134a 44 %, R1234yf 56 %) | R513A | 631 | 0 | A1 |
| | R1234ze | R1234ze | 7 | 0 | A2L |
| | R1234yf | R1234yf | 4 | 0 | A2L |
| | | | | | |

5.6 Vaihtoehtojen pisteytys

Tarkastellut vaihtoehdot pisteytettiin vertailumatriisiin eri kriteerien mukaan. Kriteereinä olivat jäähdytyksessä syntyvän lauhdelämmön hyödyntäminen, vaihtoehtojen tekniset- ja käyttöominaisuudet, kylmäaineen ominaisuudet, investointikustannukset sekä elinkaarikustannukset.

Pisteet annettiin 10, 30 ja 50, jossa 10 tuli heikoiten soveltuvalla kriteerillä ja 50 soveltuvimmalle kriteerille vaihtoehtoa tarkasteltaessa. Lisäksi kriteereille annettiin prosentuaaliset painoarvot. Pisteytettävien kriteerien kohdalla vaihtoehdoista ei voitu aina pisteyttää parasta tai huonointa pistemäärää, koska vaihtoehdot täyttivät osittain kriteerin. Taulukossa 2 on esitetty vaihtoehtojen pisteet

Kylmäaineiden ominaisuuksista ei voitu antaa millekään vaihtoehdolle alinta pistemäärää, koska alle 750 GWP-arvon kylmäaineita on saatavilla kaikkiin vaihtoehtoihin. Mutta muut ominaisuudet kylmäaineessa saattoivat laskea pistemäärää esim. turvallisuusluokan vaikutus laitteen sijoitukselle. Heikosti syttyvien kylmäaineiden sijoitus on ohjeistettu standardissa SFS-EN 378-3 kohdassa 4.

Taulukko 2. Vertailumatriisi vaihtoehtojen pisteytyksestä (Mika Karbin).

| Kriteeri / Vaihtoehto | VJK | Maajähdytys | IVLP | Lämpöpumppu | Painotus % |
|----------------------------|-----|-------------|------|-------------|------------|
| Lauhdelämmön hyödyntäminen | 2 | 10 | 6 | 10 | 20 |
| Tekniset tiedot | 7,5 | 7,5 | 4,5 | 7,5 | 15 |
| Kylmäaineen soveltuvuus | 7,5 | 7,5 | 4,5 | 7,5 | 15 |
| Investointi | 10 | 2 | 10 | 6 | 20 |
| Elinkaarikustannukset | 3 | 9 | 15 | 9 | 30 |
| Yhteispisteet | 30 | 36 | 40 | 40 | 100 |
| Pisteet 10, 30 ja 50 | | | | | |

6 Hankesuunnitelman tulos

Keskitetty jäähdytyslaitos, jolla tuotetaan kaukolämpöä, valittiin hankesuunnitelman investointiesitykseksi. Keskitettyyn jäähdytyslaitokseen selvitettiin eri lämpöpumppuvaihtoehtoja, joilla voidaan tuottaa tarpeeksi lämmintä vettä kaukolämpöverkkoon. Ensimmäiseksi selvitettiin soveltuvat kylmäaineet jäähdytyksen ja lämmityksen tuotantoon. kylmäaineita olivat NH₃, CO₂, HFC ja HFO kylmäaineet.

Ammoniakki eli NH₃ jätettiin pois lämpöpumpuista, koska laitos olisi liian lähellä kauppakeskusta. Kuvassa 19 on Tukesin määrittelemät etäisyydet ammoniakkilaitoksille. (Kylmäextra, ammoniakkiopas 2023).

| Ammoniakkimäärä (t) | Laitoksen tyyppi | Etäisyys 1 (m) | Etäisyys 2 (m) |
|---------------------|------------------|----------------|----------------|
| $0,1 \leq m < 1,5$ | A ja B | 25 | 50 |
| $1,5 \leq m < 3,0$ | A ja B | 40 | 100 |
| $3,0 \leq m < 10$ | Tyyppi A | 40 | 150 |
| | Tyyppi B | 80 | 250 |

Taulukko 2. Ammoniakkikylmälaitosten suojaetäisyydet.

Etäisyys 1 = Etäisyys tontin rajasta ja yleisestä liikenneväylästä sekä toimintaan kuulumattomista rakennuksista.

Etäisyys 2 = Etäisyys asuinrakennuksista, hoitolaitoksista, kouluista, päiväkodeista ja kokoontumistiloista.

Kuva 19. Ammoniakkikylmälaitosten turvaetäisyydet (Kylmäextra).

Hiilidioksidin eli CO₂ todettiin omaavan alhaisen kriittisen pisteen, joka on +31 °C. Korkean lämpötilojen sovelluksissa hiilidioksidin lauhtumispaine on korkea, tämä aiheuttaa tiettyjä vaatimuksia sen käytölle. Hiilidioksidin COP laskee korkeissa lämpötiloissa. (Käytännön kylmäteknikka).

HFC-kylmäaineiden turvallisuusluokassa A1 olevien kylmäaineiden GWP-arvo todettiin korkeaksi, jonka takia ne eivät soveltuneet tarkasteluun. HFO-kylmäaineista tarkasteltiin A1 turvaluokan kylmäaineita, joista seokset R450A ja

R513A sopivat järjestelmän kylmäaineiksi. Kuvassa 21 on esitetty kylmäaineiden turvallisuusluokat.

| Turvallisuusluokat | | Myrkyllisyysluokitus | |
|--------------------|--------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| | | Pienempi myrkyllisyys, ryhmä A | Suurempi myrkyllisyys, ryhmä B |
| Syttyvyysluokitus | Korkeampi syttyvyys, 3 | A3 (mm. hiilivedyt) | B3 |
| | Alhaisempi syttyvyys, 2L | A2L (usea uusi seos ja HFO-aine) | B2L (ammoniakki) |
| | Syttyvä, 2 | A2 (harvinainen) | B2 |
| | Ei syttyviä, 1 | A1 (usea HFC-aine ja hiilidioksidi) | B1 |

Kuva 20. Kylmäaineiden turvallisuusluokat (Ammoniakki kylmäaineena, 9).

Keskitetyn laitoksen jäähdytyksessä tuotetun lämmön hyödyntämiskohteena todettiin olevan paikallisen kaukolämpöyhtiön verkosto. Kaukolämpöverkko kulkee aivan kauppakeskuksen vierestä. Kaukolämpöverkon haltijan kanssa käytiin alustavat neuvottelut lauhdelämmön mahdollisesta hyödyntämisestä kaukolämpöverkossa. Teknisesti lämmön pumppaaminen oli mahdollista lähtötietojen perusteella.

Kaukolämpöyhtiöt ovat Suomessa viime vuosien aikana tarjoutuneet ostamaan teollisuus- ja kiinteistöyhtiöiden hukkalämpöjä. Kaukolämpöverkkoon voidaan syöttää suuriakin määriä lämpöenergiaa riippuen verkoston koosta ja sijainnista.

Kaukolämpöyhtiöt ovat myös viime vuosina laskeneet verkostojensa lämpötilatasoja, jolloin esimerkiksi kesällä ei tarvitse syöttää korkeaa lämpötilaa verkkoon. Kesällä noin 70 aseinen vesi on riittävän lämmintä kaukolämpöverkon kautta asiakkaille myytäväksi. Lämmön syöttökohta täytyy myös soveltua lämpöpumpuilla tuotetun lämmön pumppaukseen niin ettei lämpöverkon muille asiakkaille aiheuteta häiriöitä.

Keskitetyn laitoksen jäähdytystuotanto vaihtoehdoiksi selvitettiin lämpöpumppu vaihtoehtoja, joissa on eri kylmäaineet. Lämpöpumppujen lauhduttimet on tarkoitus kytkeä suoraan kaukolämpöverkkoon.

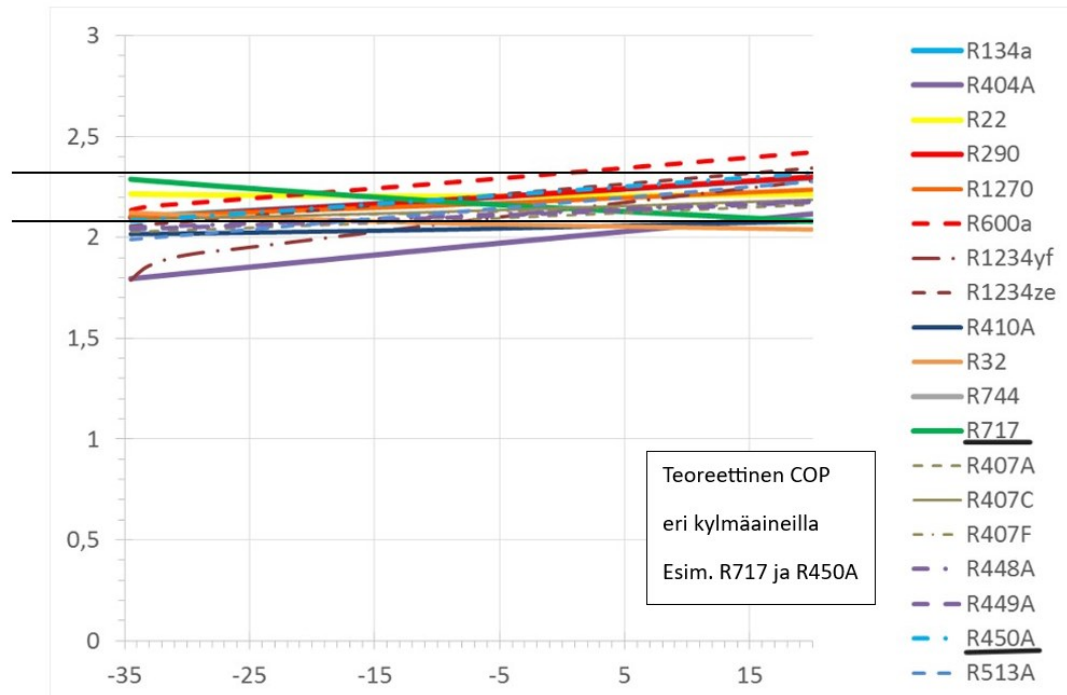
Keskitetyn laitoksen osalta pyydettiin tarjoukset putkiston ja komponenttien rakentamisesta kauppakeskuksen tuloilmakoneiden pattereille. Putkisto mitoitettiin valittavien lämpöpumppujen mukaan, sekä otettiin huomioon järjestelmän mahdollinen skaalaaminen tulevaisuudessa.

Keskitetyn jäähdytyslaitoksen lämpöpumppujen mitoituspisteitä tarkasteltiin kolmella eri kaukolämpöverkon paluulämpötilalla. Paluulämpötilan vaikutus jäähdytystehoon sekä hyötysuhteeseen on selkeä kuvien 22–24 mukaan. Mitoituspisteiden arvojen tarkkuus on +/- 5 %, Oilon Selection Toolin mukaan. Lämpöpumpun lämmityksen hetkellinen hyötysuhde lasketaan kaavalla 2.

$$\Phi = \frac{Q_l}{W_o}$$

Kaava 2. Hetkellisen lämpöhyötysuhteen COP laskentakaava.

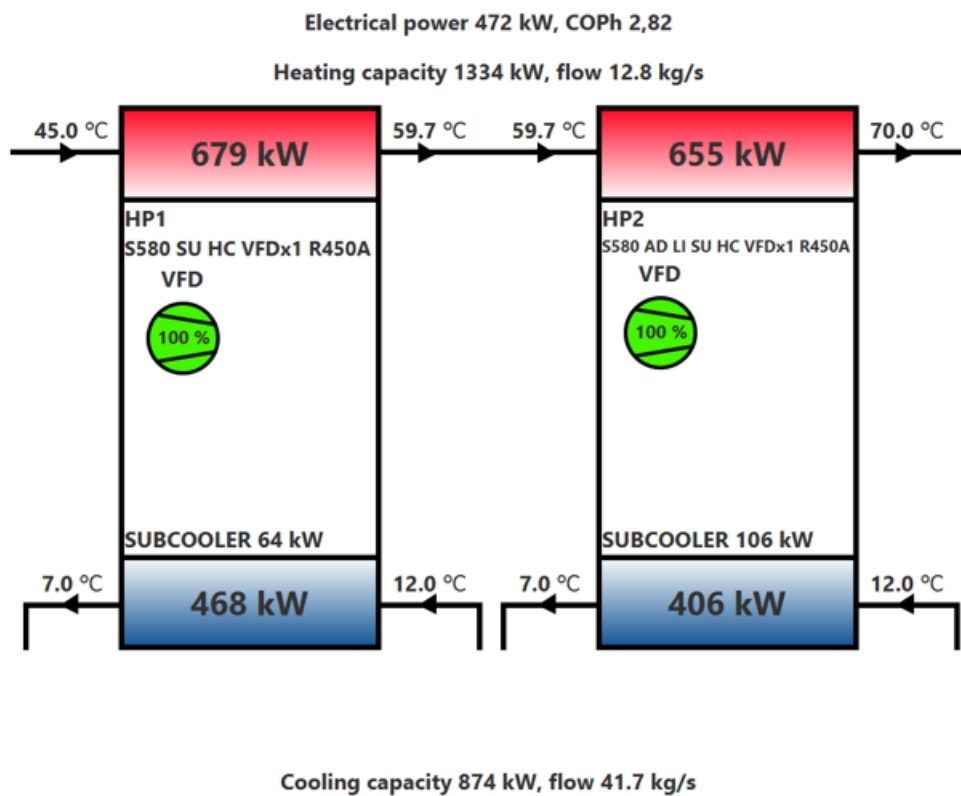
Kaavassa 2 Φ tarkoittaa hetkellistä lämpöhyötysuhdetta COP, Q_l on hetkellisesti tuotettu lämpöteho ja W_o on hetkellinen ottoteho. Esimerkiksi jos tuotetaan 5 kW lämpötehoa ja ottoteho on 2 kW, jolloin COP on 2,5.



Kuva 21. Kylmäaineiden teoreettisia hyötysuhteita eri lämpötiloilla (Bitzer).

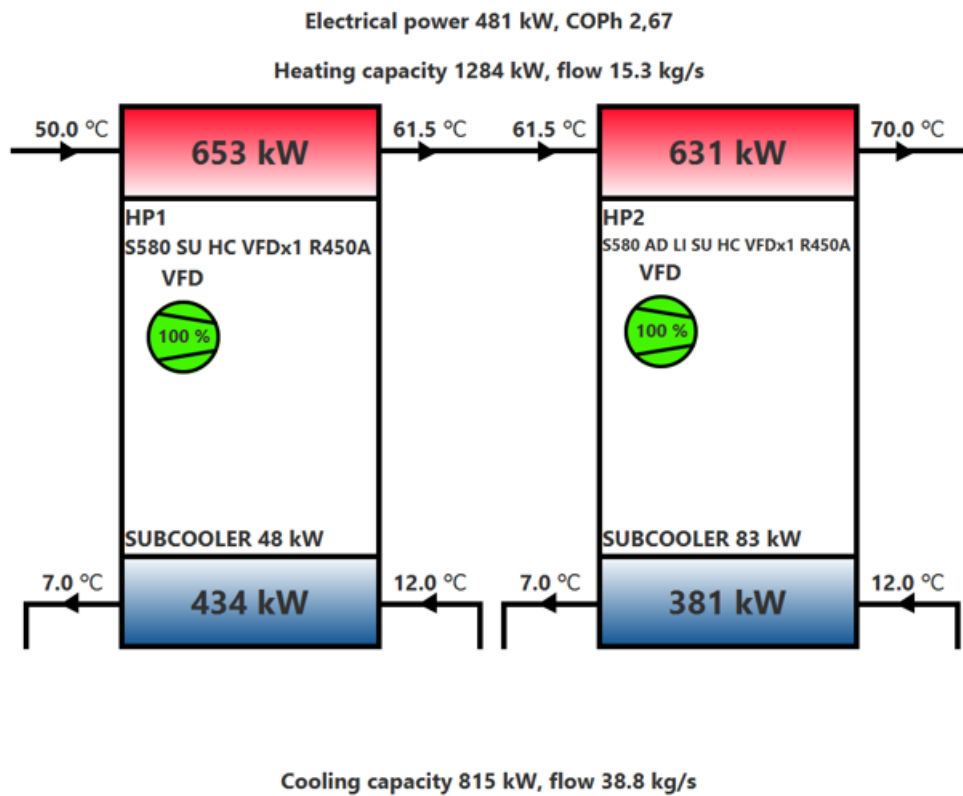
Kuvassa 21 on esitetty kylmäaineiden hetkellisen hyötysuhteen COP muutoksia eri lämpötiloilla. Kylmäaineen R450A hyötysuhde paranee, kun lämpötila nousee. Ammoniakin R717 hyötysuhde laskee lämpötilan noustessa.

Kuvissa 22–24 on vertailtu keskitetyn jäähdytyslaitoksen jäähdytystehon muutoksia eri kaukolämpöverkon lämpötiloilla. Optimi kaukolämmön lämpötiloilla jäähdytysteho on yli 30 % parempi verrattuna hellejakson oletettuihin kaukolämmön lämpötiloihin.



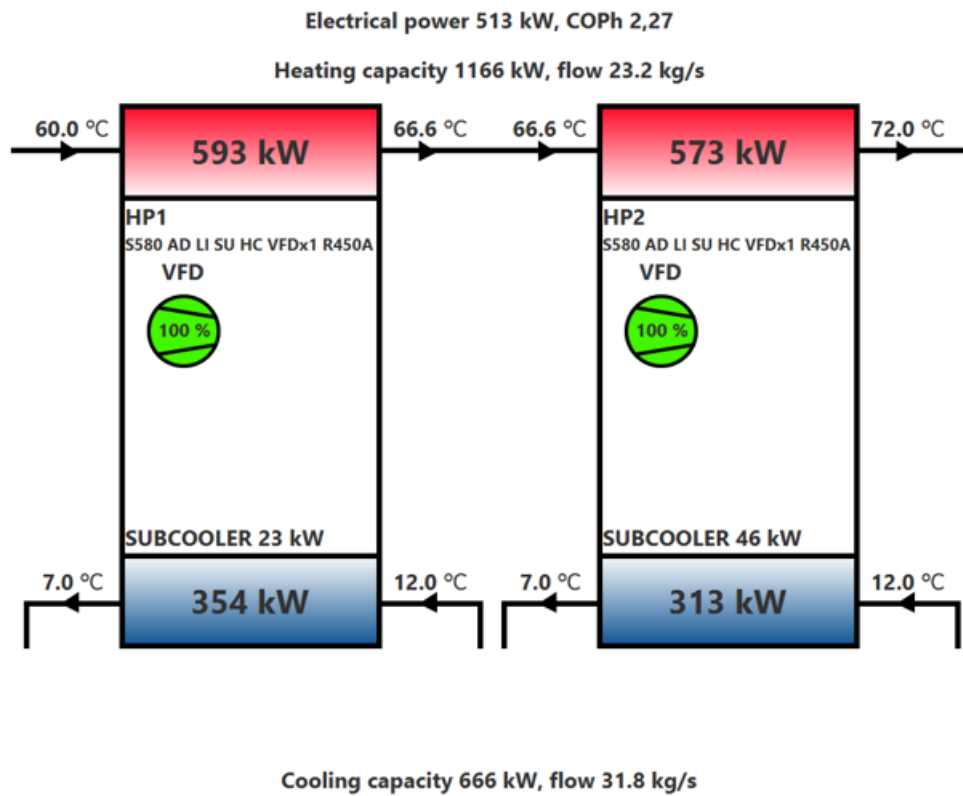
Kuva 22. Mitoituspiste 1 (Oilon Selection Tool).

Mitoituspiste 1:ssä on optimi lämpötilat lauhdepuolella, joka lauhtuu suoraan kaukolämmön menolinjaan. Jäähdytystehoa saadaan mitoituspisteen mukaan eniten. Kesähelteellä tämä mitoituspiste ei todennäköisesti toteudu.



Kuva 23. Mitoituspiste 2 (Oilon Selection Tool).

Mitoituspiste 2:ssa on realistiset lämpötilatasot kaukolämpöverkossa, kun on kyseessä jäähdytyskausi, ja kaukolämpöä kulutetaan vähän.



Kuva 24. Mitoituspiste 3. (Oilon Selection Tool).

Mitoituspiste 3:ssa on kuvattu hellejakson vaikutusta kaukolämpöverkon paluuv veden lämpötilaan. Kaukolämmön paluulämpötila saattaa nousta jopa 60 °C, jolla on negatiivinen vaikutus saatavaan jäähdytystehoon sekä lämpöpumpun hetkelliseen hyötysuhteeseen COP:iin.

7 Yhteenveto

Vedenjäähdytyskoneilla ei jäähdytyksessä syntyvää lämpöä hyödynnetä, eikä niillä saavuteta taloudellista takaisinmaksuaikaa. Niihin perustuva vaihtoehto hylättiin ensimmäisenä.

Maaenergia vaihtoehto todettiin kauppakeskuksen tontin pienuuden takia teknisesti ja taloudellisesti heikoimmaksi vaihtoehdoksi. Maajäähdytys vaihtoehto jätettiin pois tarkemmasta tarkastelusta.

Tarkempi tarkastelu tehtiin ilmavesilämpöpumppujen ja teollisten lämpöpumppujen jäähdytysjärjestelmälle. Useiden eri jäähdytettävien tilojen, lauhdelämmön hyödyntämisen, järjestelmän myöhemmän skaalattavuuden sekä katon kantavuusrajoitteiden johdosta päädyttiin keskitettyyn jäähdytyslaitokseen.

Kauppakeskuksen tuloilman jäähdytyksen hankesuunnitelmassa päätettiin ehdottaa investointia varten keskitetty lämpöpumppuihin perustuva jäähdytysvaihtoehto, jolla tuotetaan kaukolämpöä.

8 Pohdintaa

Hankesuunnitelmaa oli mielenkiintoista tehdä ja opin sitä tehdessä aikana uusia asioita kiinteistöjen jäähdytyksestä. Rakennusten kantavuusasiat olivat melko uusia itselleni. Sain iteroida eri jäähdytysvaihtojen vaikutusta elinkaarilaskentaohjelman tuntimittauksessa, jotta ne vastaisivat arviota IV-konehuoneiden lämmön- ja jäähdytyksen osalta.

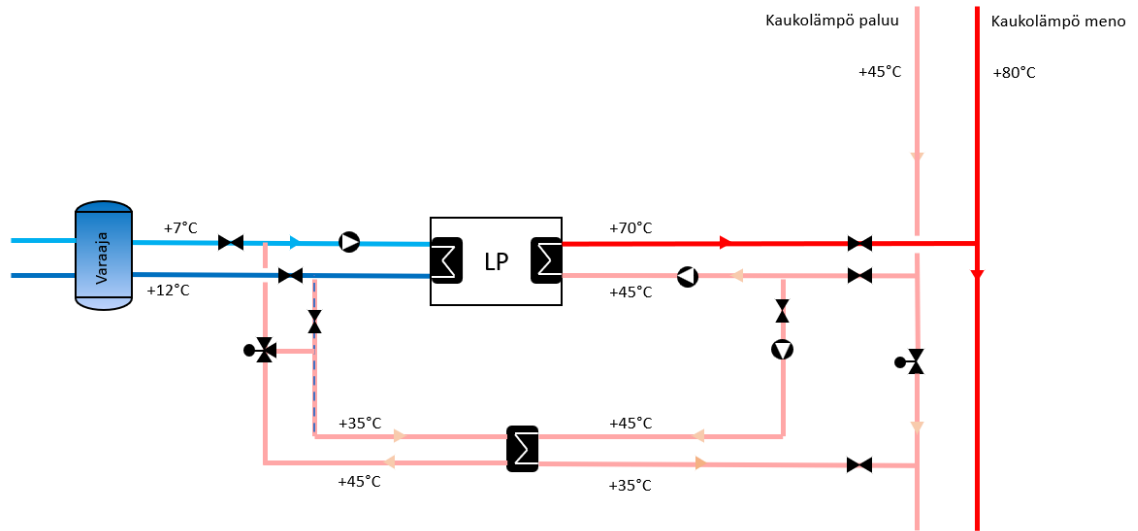
Kylmäaineisiin liittyvät asetukset ovat muuttuneet viime vuosien aikana ja tulevat muuttumaan EU:n kemikaaliasetus REACH takia vielä lisää. Nyt tehtävissä investointipäätöksissä oli huomioitava kylmäaineisiin liittyvät voimassa olevat asetukset. F-kaasuasetuksen päivitettyä versiota ei ollut opinnäytetyötä tehdessä ollut saatavilla, vaikka ilmeisesti sen sisällöstä oli päästy yhteisymmärrykseen.

Kauppakeskuksessa mitataan kulutettu kaukolämpöenergia tuntitasolla ja kulutettu sähköenergia useammasta kohdasta koko kauppakeskuksen osalta. Tuloilman jäähdytyksessä käytettävien vedenjäähdytyskoneiden sähkö- ja jäähdytystehoa ei sen sijaan mitata. Mitatun tiedon avulla olisi tarkempi vaihtoehtojen vertailu voitu suorittaa. Esimerkiksi IV-konehuone tai jopa tuloilmakone kohtaisten mittausten perusteella ilma-vesilämpöpumppujen kannattavuus olisi voitu selvittää tarkemmin.

Jäähdytysjärjestelmiä vertailtaessa ja hankesuunnitelmassa ehdotetun järjestelmän mitoituspisteitä on syytä käyttää useampaa vaihtoehtoa. Yksi mitoituspiste antaa vain yhden toimintapisteen arvon jäähdytyslaitteelle, jonka toteutuminen saattaa vuoden tunneista olla vain pieni osa. Prosessijäähdytykset ovat sen sijaan usein stabiilimpia kuin kiinteistöjen jäähdytysjärjestelmät.

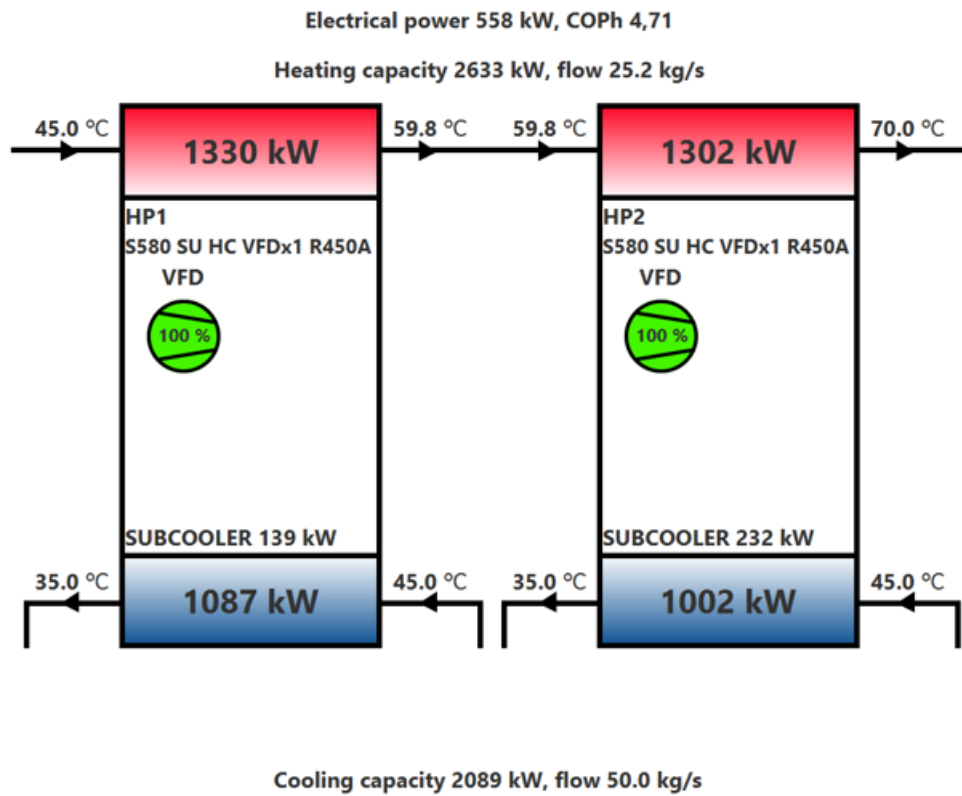
Kauppakeskuksen keskitetyn jäähdytyskeskuksen sektori-integraation sekä kestävä kehityksen kannalta mielestäni olisi hienoa jalostaa kaukolämpöverkon kytkentää niin sanotulla booster-kytkennällä. Kytkennällä tehdään mahdolliseksi tuottaa jäähdytyskauden ulkopuolella lämpöä kaukolämpöverkon paluulämpöä hyödyntämällä. Paluulinjasta otetaan lämpö

talteen lämpöpumpulla ja siirretään lämpö menopuolelle. Kytkenällä saavutetaan todella hyvä hyötysuhde, kun lämpötilaero höyrystimen ja lauhduttimen välillä on pieni. Kuvassa 25 on esitetty kytkentä kaukolämpöverkkoon ja kuvassa 26 lämpötilojen vaikutus lämpöpumpun korkeaan hyötysuhteeseen.



Kuva 25. Yksinkertaistettu lämpöpumpppukytkenä kaukolämpöverkkoon (Mika Karbin).

Kaukolämpöverkossa olevat tuotantolaitokset hyötyvät paluulämmön laskusta, jos on esim. savukaasupesuri kiinteän polttoaineen laitoksessa tai suuri lämpöpumppu tuottamassa kaukolämpöä ja -jäähdytystä.



Kuva 26. Kaukolämmön paluulämmön hyödyntämisen vaikutus hyötysuhteeseen (Oilon Selection Tool).

Lähteet

A-Insinöörit, viitattu 13.11.2023. <https://www.ains.fi/palvelumme/projektinjohtaja-rakennuttaminen/hankesuunnittelu>

Aittomäki A. 2012. Kylmäteknikka, Helsinki: Suomen kylmäyhdistys.

Bitzer, viitattu 18.12.2023. https://www.bitzer.de/shared_media/html/a-500-501/en-GB/index.html#679499019679614731

Carrier, viitattu 14.12.2023.

<https://www.carrier.com/commercial/fi/fi/tuotteet/ilmastointi/ilmajaahdytteiset-vedenjaahdyttimet/30xbeze-30xbpze/>

Danfoss, viitattu 23.11.2023. <https://reftools.danfoss.com/spa/tools/>

Darment Oy, viitattu 18.12.2023. <https://darment.fi/kylmaaineiden-ymparistovaikutusten-tunnusluvut-odp-gwp-tewi/>

Darment Oy, viitattu 23.11.2023. <https://darment.fi/tuoteosasto/kylmaaineet/>

Energiateollisuus, viitattu 3.12.2023.

<https://energia.fi/energiapolitiikka/vahahiilisyyden-tiekartta/uusi-energiajarjestelma/sektori-integraatio/>

Euroopan unionin virallinen lehti. Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EU) N:o 517/2014, lainattu 28.11.2023. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX%3A32014R0517&from=EN>

Edilex. Laki sähkön ja eräiden polttoaineiden valmisteverosta 30.12.1996/1260.

Lainattu 18.12.2023 https://www-edilex-fi.ezproxy.turkuamk.fi/lainsaadanto/aiempi/19961260_20211215

Edilex. Laki sähkön ja eräiden polttoaineiden valmisteverosta 30.12.1996/1260.

Lainattu 18.12.2023 https://www-edilex-fi.ezproxy.turkuamk.fi/lainsaadanto/aiempi/19961260_20211215#V2

Hakala P., Kaappola E. 2013. Kylmälaitoksen suunnittelu, Helsinki: Opetushallitus.

Heikkilä T. Sweco Finland, haastattelu 28.12.2023.

Helen Oy, viitattu 19.12.2023 <https://www.helen.fi/taloyhtiot/jaahdytysta-kerrostaloon/jaahdytysta-taloyhtioon/nain-jaahdytys-toimii>

Junnonen J-M., Kankainen J. 2020. Rakennuttaminen, Helsinki: Rakennustieto Oy.

Kaappola E., Hirvelä A., Jokela M., Kianta J. 2012. Kylmätekniikan perusteet, Helsinki: Opetushallitus.

Kettunen S. (2003). Onnistu projektissa, Helsinki: WSOY.

Koponen P. Sweco suunnittelukokous, 8.11.2023.

Nydal R. 2002. Käytännön kylmätekniikka. Muuronen M. Helsinki: Suomen kylmäyhdistys ry.

Oy Turku Energia, viitattu 5.1.2024. <https://www.turkuenergia.fi/uutiset-ja-artikkelit/kaukojaahdytys-20-vuotta>

Pelin R. 2011. Projektihallinnan käsikirja, Helsinki: Projektijohtaminen Oy

Rakennustieto, viitattu 13.11.2023. <https://kortistotezp-rakennustieto-fi.ezproxy.turkuamk.fi/kortit/RT%2010-11226?navref=Search>

Suomen kylmäyhdistys ry, viitattu 18.12.2023. https://www.kylmaextra.fi/files/683/Ammoniakkioapas_2023_a4_valmis_2.pdf

Suomen kylmäyhdistys. Kylmäextra, viitattu 5.12.2023. https://www.kylmaextra.fi/files/127/Valilliset_Jaahdytysjarjestelmat_2019.pdf

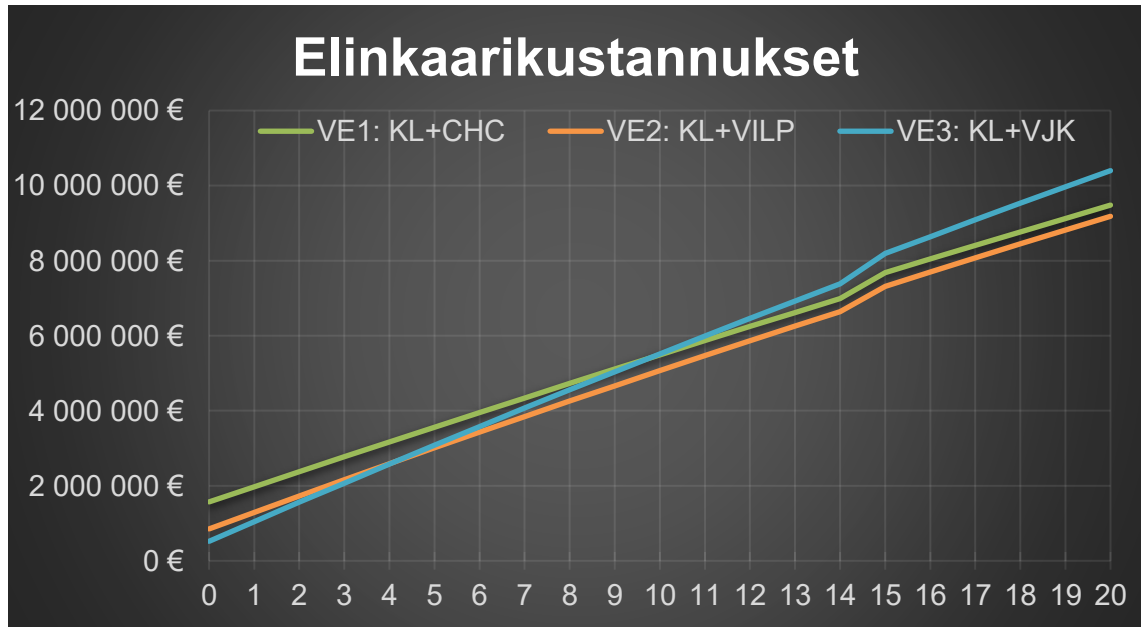
Suomen kylmäyhdistys. Kylmäextra 2023, viitattu 13.12.2023. https://www.kylmaextra.fi/lehdet/kylmaextra_2_2023/uusi_f-kaasuasetus_sopimus_saavutettu

Sitowise Finland, viitattu 13.11.2023. <https://www.sitowise.com/fi/rakennuttaminen-ja-projektinjohto/projektinjohton-palvelut/hankesuunnitelmat>

Ympäristöministeriö, viitattu 3.12.2023. <https://ym.fi/-/hallitus-tukee-eu-n-paastoja-rajoittavia-lainsaadantoehdotuksia>

Taloudellinen tarkastelu jäähdytysvaihtoehdoille

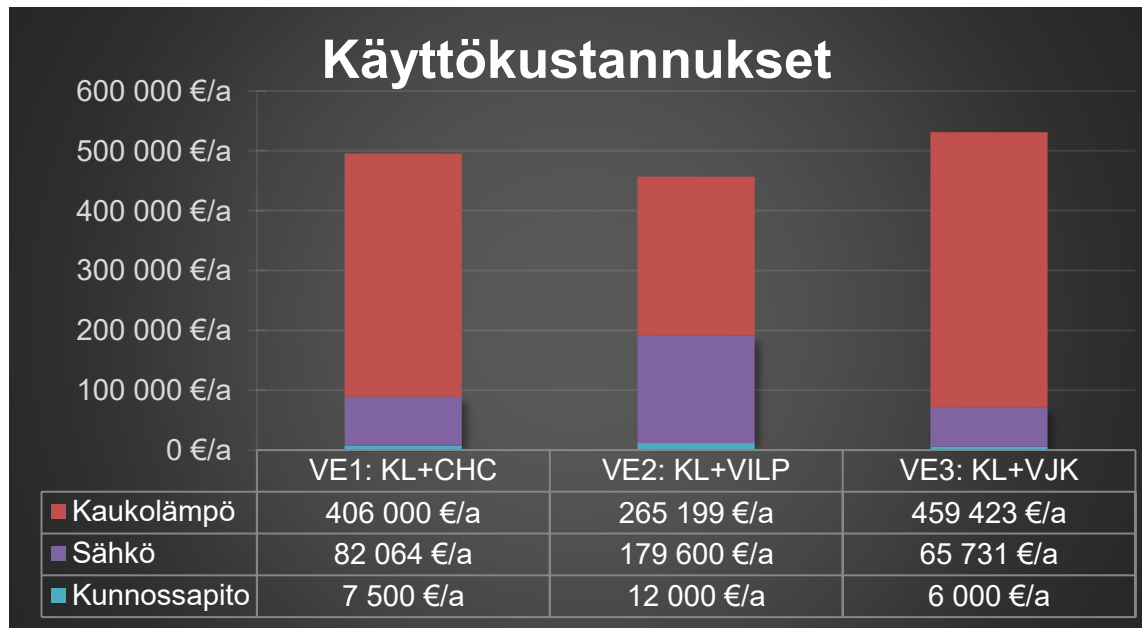
Alla elinkaarikustannukset vaihtoehdoille



Investointikustannukset



Käyttökustannukset vuodessa



Taloudellisessa tarkastelussa huomataan vedenjäähdytyskoneisiin perustuvan uusinnan olevan investoinniltaan pienin, mutta elinkaarikustannuksiltaan suurin. Keskitettyyn jäähdytyslaitoksen perustuva vaihtoehto on investoinniltaan suurin ja elinkaarikustannuksiltaan toiseksi pienin, lähellä ilma-vesilämpöpumppuihin perustuvan vaihtoehdon elinkaarikustannuksia, noin 3 % suuremmat elinkaarikustannukset.