

KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Talotekniikan koulutusohjelma

Heikki Pieviläinen

Lauhdelämmön hyödyntäminen päivittäistavarakaupassa

Opinnäytetyö
Marraskuu 2020



OPINNÄYTETYÖ
Marraskuu 2020
Talotekniikan koulutus

Tikkarinne 9
80200 JOENSUU
+358 13 260 600

Tekijä
Heikki Pieviläinen

Nimeke
Lauhdelämmön hyödyntäminen päivittäistavarakaupassa

Toimeksiantaja
Granlund Joensuu Oy

Tiivistelmä

Useisiin päivittäistavarakauppoihin joudutaan tekemään kylmäjärjestelmäsaneerauksia lähivuosina. Kylmäjärjestelmissä on käytetty nykyisin ilmastolle haitalliseksi luokiteltua R404A kylmäainetta, joka tullaan korvaamaan saneerauksen yhteydessä luonnonmukaisella kylmäaineella esimerkiksi hiilidioksidilla (CO₂). Kylmäjärjestelmistä on saatavilla lauhdelämpöä, joten kylmäjärjestelmäsaneerauksen yhteydessä on järkevää miettiä kiinteistöön sopivaa lauhdelämmöntalteenotto ratkaisua. Ulkopuolelta ostettavan lämpöenergian määrää voidaan vähentää hyödyntämällä kiinteistön kylmäjärjestelmistä saatavaa lauhdelämpöä.

Tässä opinnäytetyössä perehdytään päivittäistavarakaupan lauhdelämmöntalteenottoverkoston toimintaan esimerkkikohteen avulla. Esimerkkikohteeseen on toteutettu kylmäjärjestelmäsaneeraus vuonna 2019, jolloin kiinteistön vanha kylmäjärjestelmä korvattiin nykyaikaisella hiilidioksidia käyttävällä Booster-järjestelmällä. Kylmäjärjestelmäsaneerauksen yhteydessä kiinteistöön lisättiin lauhdelämmöntalteenottoverkosto.

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia olemassa olevan kylmäjärjestelmän sekä lauhdelämmöntalteenottoverkoston toimintaa tarkasteluajanjakson ajan. Tarkasteluajanjakson aikana havaittujen havaintojen perusteella järjestelmien toimintaa pystyttiin arvioimaan sekä miettimään vaihtoehtoisia lauhdelämmöntalteenottoratkaisuja kiinteistöön. Tässä opinnäytetyössä vaihtoehtoiseksi lauhdelämmöntalteenottoratkaisuksi valikoitui ratkaisu, jossa hyödynnetään lämpöpumppua.

Kieli
suomi

Sivuja 45
Liitteet 1
Liitesivumäärä 1

Asiasanat

hiilidioksidi, kylmäjärjestelmä, lauhdelämpö, lämpöpumppu



THESIS
November 2020
Degree Programme in Building
Services Engineering

Tikkarinne 9
80200 JOENSUU
FINLAND
+ 358 13 260 600

Author
Heikki Pieviläinen

Title
Utilization of condensing heat in the grocery trade

Commissioned by
Granlund Joensuu Oy

Abstract

Many grocery stores will need repairs for their cooling system in upcoming years. Cooling systems uses R404A cooling material which is now classified as harmful and will be replaced in repairs with natural cooling materials, for example carbon dioxide. Cooling systems produce condensate heat so during cooling system repairments it is reasonable to consider condensate heat reclaiming solutions that are suitable for the property. It is possible to decrease the amount of purchased thermal energy considerably by reclaiming condensate heat from the property.

This thesis focuses on the function of condensing heat reclaiming system in a case study of one grocery store. The store has gone through repairs in 2019 when the property's old cooling system was replaced with a modern carbon dioxide based Booster system. Condensing heat reclaiming system was added in as a part of the renovation.

The aim of the thesis was to examine the function of the existing cooling system and condensing heat reclaiming system during review period. Based on the observations made during the review period assessments could be made on the function of the systems, and alternative solutions considered for the property. This thesis selected alternative a heat pump as an alternative system for reclaiming condensate heat.

Language

Finnish

Pages 45

Appendices 1

Pages of Appendices 1

Keywords

carbon dioxide, cold system, condensate heat, heat pump

Sisältö

1	Johdanto	5
2	Teoria.....	7
2.1	Kylmäprosessi	7
2.2	Höyryprosessit	10
2.3	Hiilidioksidin kylmäprosessit	11
2.3.1	Alikriittinen kylmäprosessi.....	11
2.3.2	Transkriittinen prosessi.....	12
2.3.3	Booster-järjestelmä.....	13
2.3.4	Lauhdelämmöntalteenotto	14
3	Lämmitysenergian tarve.....	17
4	Tutkimuskohde	22
4.1	Mittausajanjakson olosuhteet.....	23
4.2	Lämmöntalteenottoverkoston tarkastelu	24
4.3	Kylmäkoneikon toiminta tarkasteluajanjakson aikana	25
4.4	Kiinteistön lämmitystehontarve	27
5	Tutkimuskohteen tulosten tarkastelu.....	28
6	Lämpöpumpulla saatava hyöty	33
6.1	Lämpöpumpun lisääminen saneerauskohteeseen.....	34
6.2	Kiinteistön mitoitustarpeet.....	34
6.3	Lämpöpumpun valinta	36
6.4	Kaukolämmön energiakustannukset.....	36
6.5	Investointikustannukset	39
6.6	Lämpöpumpun sähkönkulutus	40
6.7	Investoinnin takaisinmaksuaika	40
7	Johtopäätökset	42
8	Pohdinta.....	44
	Lähteet	

Liitteet

Liite 1 Lämpöpumppu esimerkikohteeseen

1 Johdanto

EU:n F-kaasusetuksen (EU 517/2014) yksi tärkeimmistä päivämääristä oli 1.1.2020, sillä GWP-arvon 2500 ylittävät fluoratut kasvihuonekaasut eli HFC-kylmäaineet kiellettiin uusissa asennuksissa ja ammattikylmälaitteissa. Päivittäistavarakauppoja asetus koskettaa merkittävästi, sillä kylmäjärjestelmissä yleisesti käytetty kylmäaine R404A on haitalliseksi luokiteltu. Kylmäainetta R404A:ta voidaan käyttää huolloissa aina vuoteen 2030, mutta vain rajoitetusti. [4, 19.] Asetuksen seurauksena useisiin päivittäistavarakauppoihin tullaan tekemään seuraavan kymmenen vuoden aikana kylmäjärjestelmäsaneerauksia. Saneerauksen yhteydessä joudutaan miettimään vaihtoehtoisia kylmäaineratkaisuja, jotka täyttävät nykyiset vaatimukset. Fluoratut kasvihuonekaasut voidaan korvata luonnonmukaisilla kylmäaineilla, joita ovat esimerkiksi hiilidioksidi (CO₂) ja puhtaat hiilivedyt, kuten propaani (R290). [2, 23].

Kylmäjärjestelmäsaneerauksia suunnitellessa on suotuisa hetki miettiä, olisiko saneerauksen yhteydessä mahdollisuuksia parantaa koko kiinteistön energiatehokkuutta. Kylmäjärjestelmät kuluttavat noin 50 % päivittäistavarakaupassa kuluvasta sähkön määrästä jäähdyttäessään elintarvikkeita. [6, 4.] Jäähdyttämisen sivutuotteena kylmäjärjestelmä tuottaa lauhdelämpöä, jota voidaan hyödyntää kiinteistön lämmityksessä. Hyödyntämällä lauhdelämpöä voidaan pienentää ulkopuolelta ostettavan lämmitysenergian määrää sekä parantaa kylmäjärjestelmän energiatehokkuutta.

Vuosien ajan kylmäjärjestelmien lauhdelämpöä on otettu talteen ja hyödynnetty päivittäistavarakaupoissa erilaisilla kokoonpanoilla vaihtelevalla menestyksellä. Kylmäjärjestelmässä käytetyllä kylmäaineella on vaikutusta siihen, kuinka hyvin järjestelmästä on voitu hyödyntää saatavilla olevaa lauhdetta sekä millaisia talteenottoratkaisuja on ollut mahdollista käyttää. Nykyisin kylmäjärjestelmä saneerauksen yhteydessä käytettäväksi kylmäaineeksi valikoituu suurella todennäköisyydellä hiilidioksidi, joka mahdollistaa monipuolisen saatavilla olevan lauhteen hyödyntämisen kiinteistön lämmitysjärjestelmässä.

Opinnäytetyössäni tarkastellaan esimerkkikohteen avulla päivittäistavarakaupan lauhdelämmöntalteenottoratkaisuja. Teoriaosuudessa perehdytään kylmäaineiden kiertoprosessiin, hiilidioksidin kylmäprosesseihin sekä Booster-järjestelmään. Booster-järjestelmässä huomioidaan lisäksi muutama yleisesti käytössä oleva lämmöntalteenottoratkaisu.

Esimerkkikohteessa on toteutettu kylmäjärjestelmäsaneeraus, jossa vanha järjestelmä korvattiin nykyaikaisella hiilidioksidia käyttävällä Booster-järjestelmällä. Opinnäytetyössä tarkasteltavassa esimerkkikohteessa lauhdelämpöä otetaan talteen ainoastaan tulistuksenpoistolämmönsiirtimellä. Kiinteistöä lämmitetään ilmanvaihtoverkoston kautta, jossa hyödynnetään kylmäjärjestelmästä talteenotettua tulistuksenpoistolämpöä. Lisälämmityksenä kiinteistössä käytetään kaukolämpöä.

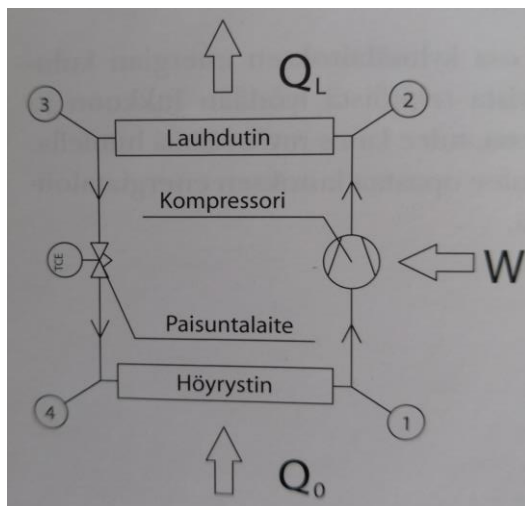
Tarkasteluajanjakson aikana kiinteistöstä seurattiin sähkönkulutusta ja kylmäjärjestelmän sekä lämmöntalteenottoverkoston toimivuutta. Järjestelmien toimivuutta arvioitiin kiinteistöstä saatujen mittaustietojen sekä teoreettisten laskujen avulla. Lisäksi olemassa olevalle lämmöntalteenottoverkostolle pohditaan vaihtoehtoista lämmöntalteenotto kokonaisuutta, jossa lauhdelämpöä otettaisiin talteen lämpöpumpputekniikkaa hyödyntäen.

2 Teoria

Opinnäytetyön teoriaosuudessa perehdytään kylmäaineen kiertoprosessiin. Kiertoprosessista käytetään nimitystä faasimuutos. Kylmäaineen kiertoprosessi eli faasimuutos tarkoittaa muutosta kiinteään, nesteeseen ja kaasumaiseen olomuodon välillä. Kiertoprosessia hyödynnetään kylmän ja lämmön tuotannossa. [3, 107.] Lisäksi teoriaosuudessa käsitellään hiilidioksidin kylmäprosessit, hiilidioksidin Booster-järjestelmää sekä vaihtoehtoisia lämmöntalteenottoratkaisuja.

2.1 Kylmäprosessi

Kylmän tuottaminen kylmäkoneistoissa perustuu kiertoprosessiin. Kiertoprosessissa koneistossa kiertää kylmäaine, joka höyrystyy ja lauhtuu eri painetasoilla. Kylmäkoneisto koostuu höyrystimestä, kompressorista, lauhduttimesta ja paisuntalaitteesta. Paisuntaventtiili toimii usein paisuntalaitteena. [3, 10.] Kylmäkoneisto on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Kylmäkoneisto [3, 10].

Kiertoprosessissa höyrystimessä oleva kylmäaine höyrystyy ja sitoo ympäristöstä lämpöä, kun sen lämpötila on matalampi kuin ympäristön. Kompressorin tehtävänä on imeä matalapaineinen kylmäainehöyry ja puristaa se korkeampaan

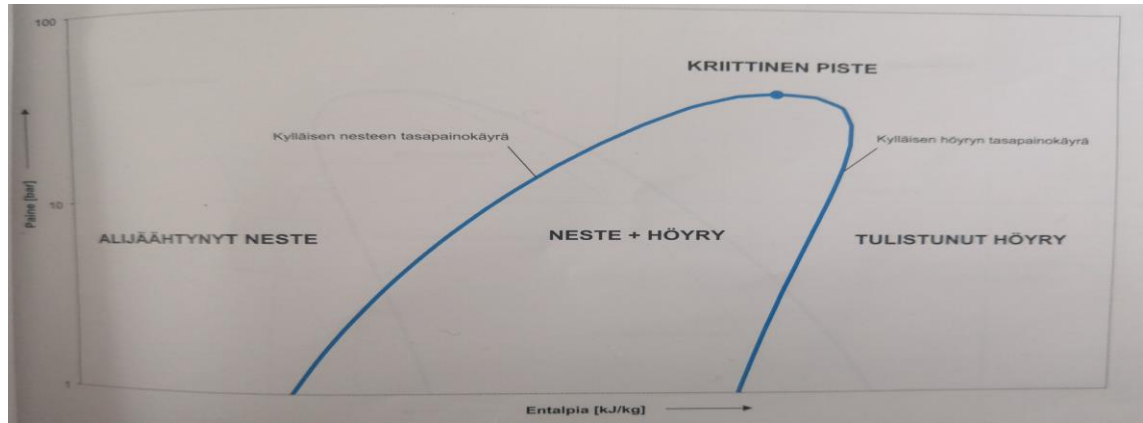
paineeseen. Puristamisen yhteydessä höyryn lämpötila kohoaa. Kompressorin jälkeen höyry siirtyy lauhduttimelle, jossa se lauhtuu. Lauhduttimessa kylmäaine on ympäristöä korkeammassa lämpötilassa, jolloin kylmäaine luovuttaa ympäristölle lämpöä ja nesteytyy. Lauhduttimelta kylmäaine siirtyy paisuntalaitteelle. Paisuntalaitteessa nestemäisen kylmäaineen paine sekä lämpötila laskevat. Paisuntalaitteessa nestemäinen kylmäaine muuttuu nestehöyryksi hakeutuen höyrystimen paineeseen ja näin kiertoprosessi alkaa uudelleen. [3, 10.] Kylmäprosessin hyötysuhde esitetään kylmäkertoimella ε . Kylmäkertoimeen vaikuttaa vallitsevat lämpötilaerot. Laskennallisesti kylmäkertoimen saa jakamalla höyrystimen sitoman lämmön Q_0 kompressorin tekemällä työllä W .

$$\varepsilon = \frac{Q_0}{W}$$

Kaava 1

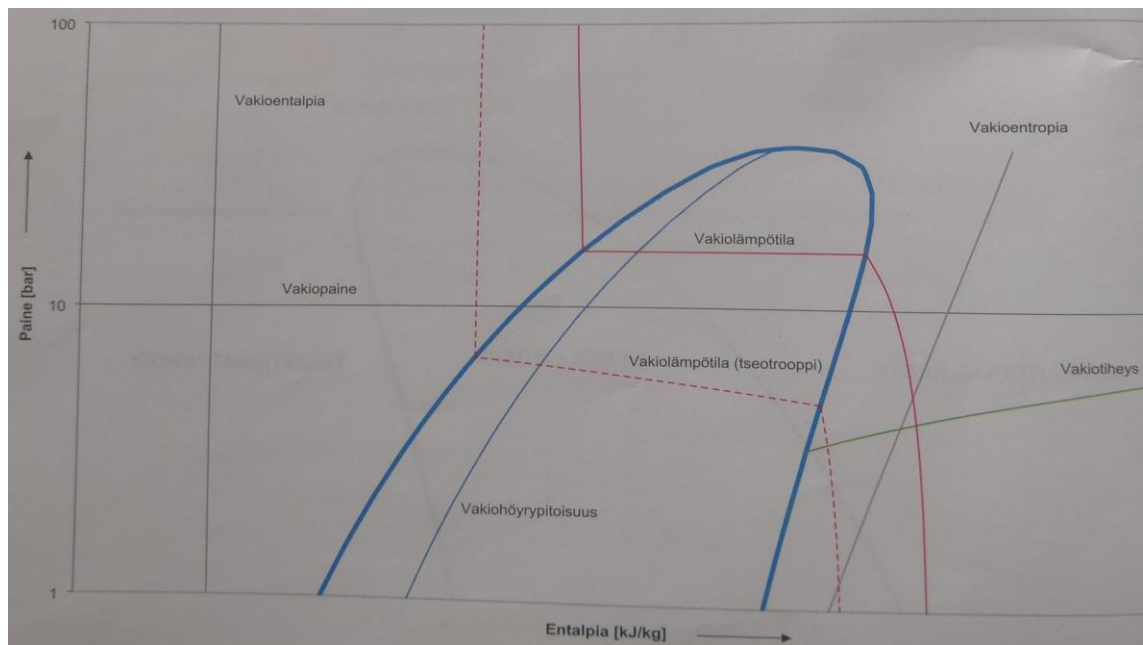
Kylmätekniinen kiertoprosessi esitetään käytännön kylmätekniikassa jokaiselle kylmäaineelle ominaisen paine- entalpia- tilapiirroksen avulla. Tilapiirroksessa entalpian, h , arvot on esitetty piirroksen x-akselilla ja absoluuttisen paineen, p , arvot on esitetty y-akselilla. Tilapiirrosta kutsutaan tämän vuoksi $\log p, h$ -tilapiirroksiksi. [2, 19.]

Tilapiirroksessa rajakäyrä erottaa kylmäaineen eri olomuotoihin. Kriittisellä pistellä kutsutaan pistettä, joka jakaa rajakäyrän kahteen eri osaan. Kriittisen pisteen vasemmalla puolella on kylläisen nesteen tasapainokäyrä ja oikealla puolella kylläisen höyryn tasapainokäyrä. Käyrästön avulla erotellaan alijäähtynyt neste sekä tulistunut höyry. Käyrästön välissä olevalla alueella kylmäaine esiintyy nesteen ja höyryn seoksena. Kuvassa 2 on esitetty kylmäaineen olomuodot $\log p, h$ -tilapiirroksessa. Kriittinen piste jakaa myös kylmätekniiset kiertoprosessit alijäähtyneiksi prosesseiksi. Alikriittisessä prosessissa kiertoprosessi tapahtuu kokonaan kriittisen pisteen alapuolella ja ylikriittisessä prosessissa kompressorin puristaa kylmäainehöyryn kriittistä pistettä korkeampaan paineeseen. Ylikriittisestä prosessista käytetään myös nimitystä transkriittinen prosessi. [2, 19.]



Kuva 2. Kylmäaineen olomuodot log p, h -tilapiirroksessa [3, 19].

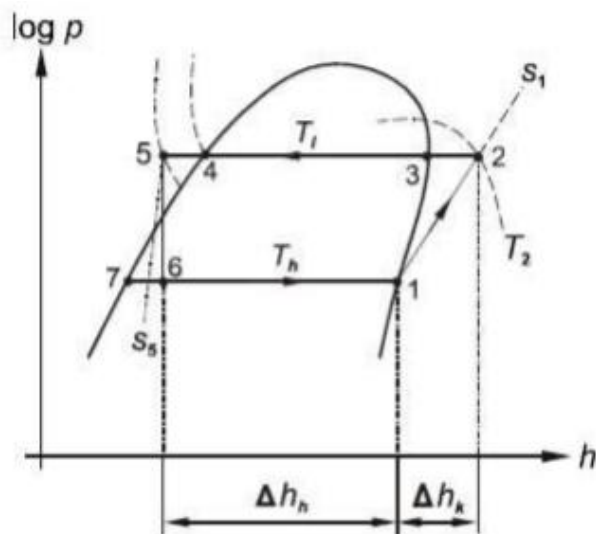
Tilapiirroksessa esitetään kylläisen nesteen ja höyryn tasapainokäyrien lisäksi myös muita tasapainokäyriä, jotta pystytään esittämään kylmätekniinen prosessi. Kylläisen nesteen ja höyryn tasapainokäyrien lisäksi kylmäaineen tasapainokäyrästä esitetään: vakioämpötila-, vakioentropia-, vakioentropia-, vakioentalpia- sekä vakiohöyrypitoisuuskäyrät. Kylmäaineen tasapainokäyrien periaatteet ovat esitetty kuvassa 3.



Kuva 3. Tasapainokäyrien periaatteet log p,h -tilapiirroksessa [3, 20].

2.2 Höyryprosessit

Carnot-prosessi on kaikkien kiertoprosessien ideaalinen vertailuprosessi. Carnot-prosessissa lauhduttimen sekä höyrystimen lämpötilat pysyvät vakiona. Höyrystyminen ja lauhduttimen lämpötilan pysyessä vakiona on aikanaan kokeiltu isotermistä lämmön tuontia sekä poistoa kostean höyryn alueella. Käytännössä tämä niin sanottu märkäprosessi on vaikea toteuttaa. [1, 66.] Teoreettisessa kylmäaineen kiertoprosessissa puristus oletetaan ideaaliksi ja putkissa kulkeva virtaus häviöttömäksi. Käytännössä teoreettisuus tarkoittaa tässä ideaalista virtausta ja puristusta ilman painehäviöitä. Kuvassa 4 on esitetty teoreettinen kiertoprosessi Log p,h -tilapiirroksessa.



Kuva 4. Kylmäaineen teoreettinen kiertoprosessi Log p,h -tilapiirroksessa [1, 66].

Kuvassa kiertoprosessin vaiheet ovat:

1–2 Isentrooppinen puristus, kompressorin tekemä työ on h_1-h_2

2–3 Tulistuksen jäähdytys lauhduttimessa tai erillisessä lämmönsiirtimessä, poistuva lämpö h_2-h_3

3–4 Lauhdutus lauhduttimessa, poistettava lämpö/massa on h_3-h_4

4–5 Mahdollinen alijäähdytys vakiopaineessa

5–6 Osa nesteestä höyrystyy paisuntaventtiilissä

6–1 Seoksen höyrystyminen kylläiseksi höyryksi, sitoutuva lämpömäärä h_1-h_6 [1, 66].

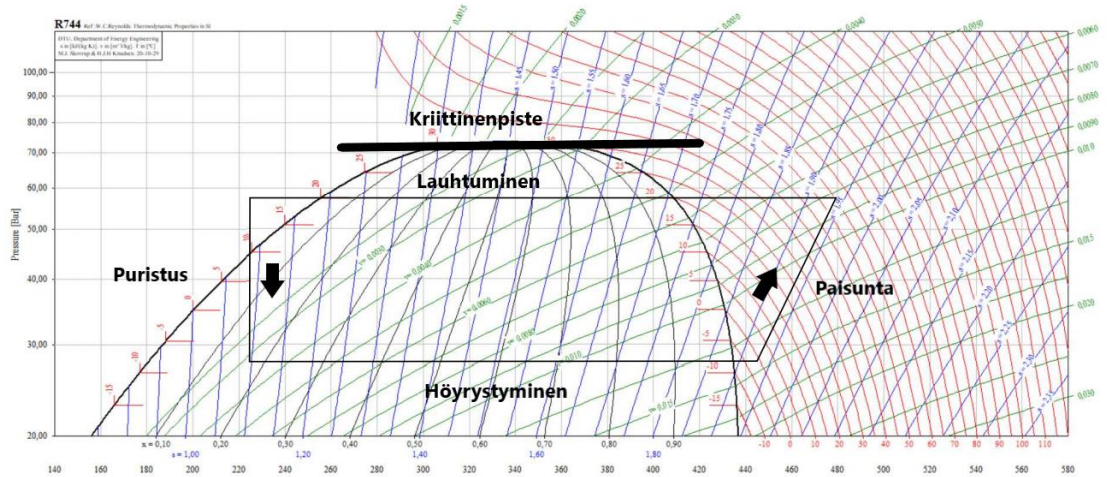
Todellisuudessa prosessissa syntyy useita häviöitä. Todellisen ja teoreettisen prosessin erot koostuvat useista tekijöistä. Todellisessa prosessissa puristus ei ole häviötön, joka lisää tarvittavaa puristustyötä. Kompressorin venttiileissä on myös painehäviöitä. Todellisessa prosessissa höyry lämpiää imukanavissa ja venttiileissä sekä jäähtyy paisuntaventtiileissä ja painekanaavissa puristuksen jälkeen. Prosessista syntyy myös painehäviöitä putkistoissa, höyrystimessä sekä lauhduttimessa. Lisäksi kylläinen höyry voi mahdollisesti tulistua höyrystimessä ja imuputkessa. [1, 67.]

2.3 Hiilidioksidin kylmäprosessit

Hiilidioksidilla on kaksi kylmäprosessia. Kylmäprosessit voivat toimia ali- tai transkriittisenä prosessina. Alikriittiseksi kylmäprosessiksi kutsutaan tilannetta, missä kylmäaine prosessi tapahtuu kriittisen pisteen alapuolella log p,h -tilapiirroksessa. Transkriittiseksi kylmäprosessiksi taas kutsutaan tilannetta, missä prosessi ylittää kriittisen pisteen log p, h -tilapiirroksessa. Kriittinen piste hiilidioksidilla sijaitsee lämpötilassa +31,1 °C ja paineessa 73,8 bar log p,h -tilapiirroksessa. [1, 19.]

2.3.1 Alikriittinen kylmäprosessi

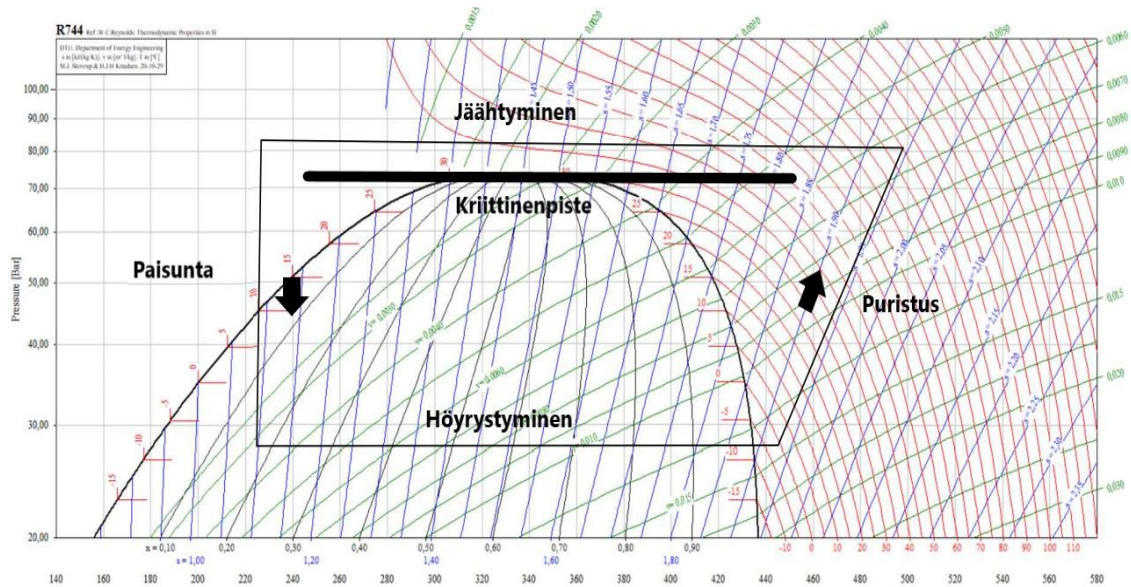
Alikriittistä kylmäprosessia hyödynnetään pohjoisen viileissä lämpötiloissa. Kylmäprosessissa hiilidioksidin paine pysyy kriittisen paineen alapuolella. Alikriittisessä prosessissa suurin osa lämmönluovutuksessa tapahtuu lauhtumisessa korkeassa paineessa. [1, 19.] Kompressorista tulevan höyryn jäähdytyksessä jäähtyy ensin tulistus, jonka jälkeen lämpötila laskee alikriittisessä prosessissa [8, 16]. Tämän jälkeen hiilidioksidi lauhtuu ja lämpötilataso pysyy vakiona. Kuvassa 5 on esitetty hiilidioksidin yksinkertainen alikriittinen prosessi logaritmissen paineen ja entalpian kuvaajassa.



Kuva 5 Hiilidioksidin yksinkertainen alikriittinen prosessi. [Refrigeration Utilities - ohjelma, 2020].

2.3.2 Transkriittinen prosessi

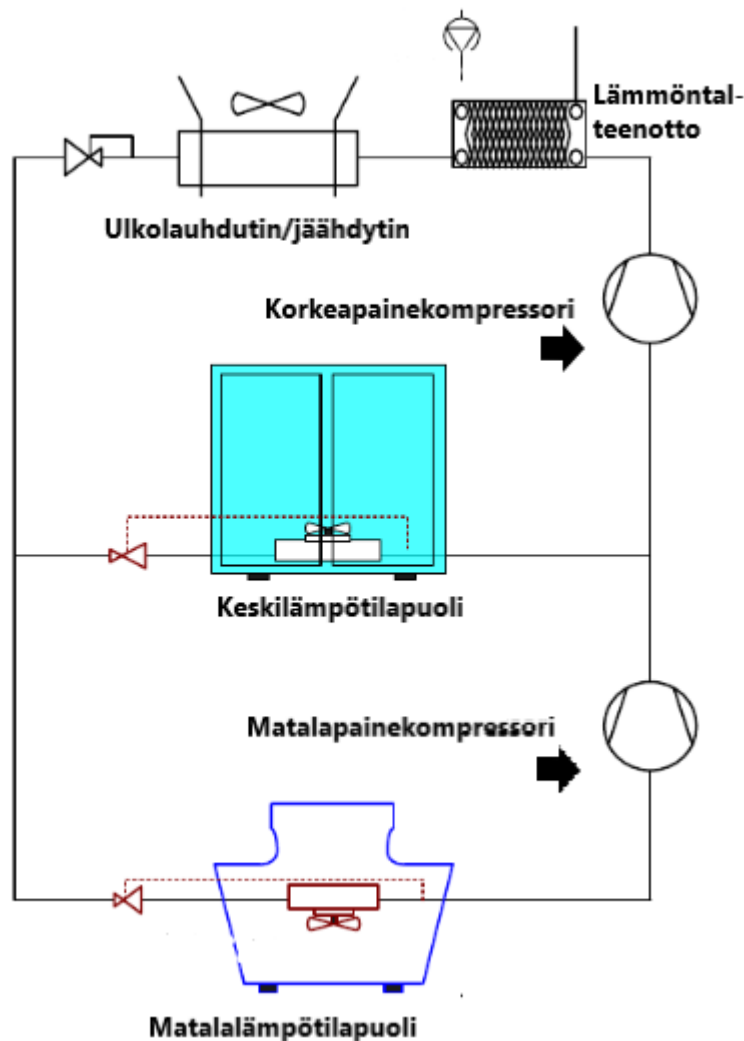
Korkeapainepuolen paine ja lämpötila ovat kriittisen pisteen arvoja suuremmat transkriittisessä prosessissa. Nestettä ja höyryä ei voida erottaa mentäessä kriittisen pisteen yläpuolelle. Kriittisen pisteen yläpuolella hiilidioksidi ei lauhdu, vaan lauhtumisen sijaan hiilidioksidi jäähtyy. Tästä syystä hiilidioksidin lämpötila ei pysy vakiona lämmönluovutuksessa, kuten alikriittisessä järjestelmässä, vaan se vaihtelee merkittävästi. [1,71.] Kylmäprosessin paisuntavaiheessa paine laskee kriittisen paineen alapuolelle, jolloin neste ja höyry jälleen erottuvat. Hiilidioksidin transkriittisessä prosessissa tulistuksen jäähtymisen ja kuristuksen seurauksena häviöt ovat suuremmat verrattuna kriittisenpisteen alapuolella riittävästi toimivissa prosesseissa. Tämän seurauksena transkriittisessä prosessissa kylmäkerroin on huonompi, kuin samalla lämpötila-alueella toimivalla alikriittisellä prosessilla. [1, 72.] Kuvassa 6 on esitetty hiilidioksidin yksinkertainen transkriittinen prosessi logaritmisella paineen ja entalpian kuvaajassa.



Kuva 6. Hiilidioksidin yksinkertainen transkriittinen prosessi. [Refrigeration Utilities -ohjelma, 2020]

2.3.3 Booster-järjestelmä

Booster-järjestelmässä puristus tapahtuu kahdessa portaassa. Järjestelmän portaita kutsutaan matala- ja korkeapainepuoliksi. Molemmilla puolilla kiertää sama hiilidioksidi. Matalapainekompressoria kutsutaan Booster-kompressoriksi. Matalapainepuolella jäähdytetään pakkashuoneita ja -kalusteita. Matalapainepuolen Booster-kompressori kuristaa hiilidioksidin korkeapainepuolen kompressorin kanssa samaan paineeseen. Paineen ollessa sama korkeapainepuolen kanssa hiilidioksidia siirtyy korkeapainepuolen kompressorille. Korkeapainepuolella jäähdytetään kylmähuoneita ja -kalusteita. [1, 280.] Kuvassa 7 on esitetty yksinkertainen Booster-järjestelmä.



Kuva 7. Yksinkertainen Booster -järjestelmä. [9, 10].

2.3.4 Lauhdelämmöntalteenotto

Tulevaisuudessa sähkön hinta tulee todennäköisesti nousemaan entisestään. Energiansäästöajattelu yhdessä jatkuvan tekniikan kehityksen ja sähkön hinnan nousun kanssa ohjaa tehokkaampiin toimenpiteisiin puhuttaessa lämmöntalteenotosta. Lauhdelämmöntalteenotolla voidaan parantaa kylmäjärjestelmän energiatehokkuutta merkittävästi. [1, 208.] Lauhdelämmöntalteenotto kasvattaa kylmäjärjestelmän energiankulutusta, mutta hyvin suunnitelluilla lämmöntalteenotto kokonaisuuksilla voidaan vähentää lämmitysjärjestelmien energiankulutusta merkittävästi. Lauhdelämpöä talteenottaessa on huomioitava, että talteenotettu lämpö saataisiin hyödynnettyä mahdollisimman hyvin samanaikaisesti kiinteistössä. Jos kaikkea talteenotettua

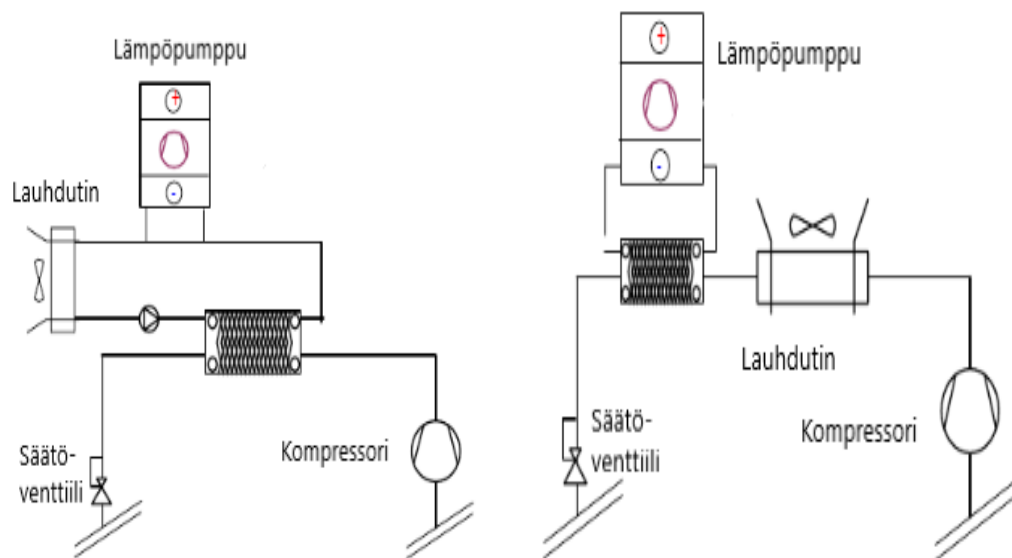
lämpöä ei ole mahdollista hyödyntää lämpöä voidaan varastoida esimerkiksi vesi- tai faasimuutosvaraajiin myöhempää käyttöä varten. [5, 13.] Talteenotettua lauhdelämpöä voidaan hyödyntää päivittäistavarakaupan lämmityksessä. Lämmitettävänä kohteena voi olla esimerkiksi päivittäistavarakaupan tilat, käyttövesi, tuloilman esilämmitys tai lattialämmitys.

Lämmöntalteenoton suunnittelussa on ehdottoman tärkeää huomioida kylmäjärjestelmän toiminta, koska elintarvikkeiden jäähdytys ei saa häiriintyä lämmöntalteenoton vuoksi. Lauhdutuslämpö koostuu kolmesta osasta. Lauhdutustehosta tulistusslämmön osuus on noin 10–20 %, kun taas varsinainen lauhdutuslämpö on 80–90 % välillä. Alijäähdytyksen osuus vaihtelee 0–5 % välillä koko lauhdutustehosta. [3, 217.] Lauhduttimesta poistuva lämpötila jakaantuu eri kylmäaineiden välillä toisistaan. Poikkeavuudet johtuvat kylmäaineiden välillä puristuksessa tapahtuvan lämpenemisen ja entalpiaosuuden osalta. [1, 208.] Hiilidioksidilla tulistuksen osuus ja höyryn korkea paine ovat korkeampia kuin muilla kylmäaineilla [1, 212]. Hiilidioksidin korkean paineen vuoksi on kylmäjärjestelmän suunnittelussa huomioitava käytettävä putkimateriaali sekä käytettävä putkenlaatu.

Hiilidioksidin lauhdelämmöntalteenottoratkaisuja on useita. Kuvassa 8 on esitetty tulistuksenpoistolämmönsiirrin. Tulistuksenpoistolämmönsiirtimellä otetaan talteen lämpöä tulistuksen jäähdytyksestä. Talteenotettua lämpöä voidaan hyödyntää kiinteistön lämmityksessä. Suoraan ulkoilmaan lauhdutetaan lauhduttimelta lämpöä, jota ei ole hyödynnetty kiinteistön lämmittämiseen. Tulistuksenpoistolämmönsiirrinratkaisua voidaan hyödyntää hiilidioksidilla hyvin, koska kompressorilta ulostuleva lämpötila on korkea. Lauhduttimen jälkeisellä säätöventtiilillä säädetään kompressorin ulostulopainetta lämmitystarpeen mukaan. [9, 8.]

Lämpöpumpuilla otetaan talteen lauhdelämmöstä se osuus, jota ei suoraan voida hyödyntää perinteisillä menetelmillä [5, 10]. Lämpöpumpua voidaan hyödyntää tehokkaasti lauhdelämmöntalteenotossa. Kytchentäpoja on useita. Lämpöpumppu voidaan kytkeä kylmäjärjestelmän lauhduttimeen tai vastaavasti alijäähdyttimenä toimivaan lämmönsiirtimeen. Lauhduttimeen kytketty

lämpöpumppu ottaa lämpöä talteen kylmäjärjestelmän lauhdepiiristä ja nostaa lämpötilatason lämmitysjärjestelmän lämpötilaan. Lauhduttimeen kytketyllä lämpöpumpulla lämpö saadaan tehokkaasti talteen ja lauhtumispaine voidaan pitää alhaisena. Alijäädyttimenä toimivaan lämmönsiirtimeen kytketyllä lämpöpumpulla voidaan lauhdutuslämpöä ottaa talteen niin, että lauhdutuslämpötila huomioi ulkoilman lämpötilan. Tällaista järjestelmää kutsutaan kelluvaksi lauhdutukseksi. [9, 8.] Kuvassa 7 on esitetty edellä mainitut lauhdelämmöntalteenottoratkaisut lämpöpumpua hyödyntäen.



Kuva 8. Lauhdelämmöntalteenotto ratkaisut lämpöpumpua hyödyntäen. [9, 8].

3 Lämmitysenergian tarve

Päivittäistavarakaupoissa kiinteistön lämmitysenergian tarve koostuu usean tekijän summasta. Kiinteistössä lämpöä johtuu rakennuksen vaipan läpi sekä ovien kautta, mutta myös myymälän aukioloajat vaikuttavat lämmityksen tarpeeseen. Lämmitystarpeeseen vaikuttaa myös tuloilman lämmitystehontarve, joka ilmalämmityksessä vastaa raitisilman osuutta ilmanvaihdossa. Kylmäkalusteista aiheutuu kiinteistöön jäähdyttävä vaikutus, jonka osuus on kompensoitava samanaikaisella lämmityksellä.

Energiataseen perusteella määritetään kiinteistössä tarvittava lämmöntarve. Energiatase koostuu kiinteistön lämpöhäviöistä sekä ilmaisenergioista. Energiatase saadaan laskettua kaavan 2 mukaisesti.

$$Q_{\text{lämmitystarve}} = Q_{\text{joht}} + Q_{\text{iv}} + Q_{\text{vuoto}} + Q_{\text{kaluste}} - Q_{\text{aurinko}} - Q_{\text{sis}} \quad \text{Kaava 2}$$

jossa

- Q_{joht} = kiinteistön rakennusvaipan johtumislämpövirtojen summa,
- Q_{iv} = tuloilman lämmitystarve,
- Q_{vuoto} = rakenteiden läpi tulevan vuotoilman lämmitystarve,
- Q_{kaluste} = kylmäkalusteiden jäähdytyskuorma,
- Q_{aurinko} = auringon lämmittävä vaikutus,
- Q_{sis} = kiinteistön ilmaisenergioiden summa.

Kiinteistön johtumislämpöhäviöt koostuvat sisä- ja ulkolämpötilan erotuksesta, rakenneosan pinta-alasta sekä rakennusosan lämmönsiirtokertoimesta. Rakennusosien johtumislämpöhäviöiden summa koostuu vaipan eri rakennusosien johtumislämpöhäviöistä kaavan 3 mukaisesti.

$$Q_{\text{joht}} = Q_{\text{ulkoseinä}} + Q_{\text{yläpohja}} + Q_{\text{alapohja}} + Q_{\text{ikkuna}} + Q_{\text{ovi}} + Q_{\text{muu}} + Q_{\text{kylmäsiilat}} \quad \text{Kaava 3}$$

jossa	Q_{joht}	= kiinteistön johtumislämpöhäviöt rakennusvaipan yli,
	$Q_{\text{ulkoseinä}}$	= kiinteistön ulkoseinien johtumislämpöhäviöiden summa,
	$Q_{\text{yläpohja}}$	= kiinteistön yläpohjien johtumislämpöhäviöiden summa,
	Q_{alapohja}	= kiinteistön alapohjien johtumislämpöhäviöiden summa,
	Q_{ikkuna}	= kiinteistön ikkunoiden johtumislämpöhäviöiden summa,
	Q_{ovi}	= kiinteistön ovien johtumislämpöhäviöiden summa,
	Q_{muu}	= kiinteistön johtumislämpöhäviö tilaan, joka poikkeaa ulkolämpötilasta,
	$Q_{\text{kylmäsiilat}}$	= kiinteistön ilmaisenergioiden summa.

Lämpöhäviöitä vähentävät rakennuksen sisäiset lämpökuormat. Sisäiset lämmönlähteet koostuvat auringon säteilystä ikkunoiden ja vaipan läpi, henkilöiden luovuttamasta lämpöenergiasta, kiinteistön sähkölaitteiden luovuttamasta lämpöenergiasta sekä lämpimien käyttövesilaitteiden luovuttamasta lämpöenergiasta. Ilmaisenergioiden hyödyntämiseen vaikuttaa kiinteistössä toimivan lämmityksen säätöjärjestelmä. Kiinteistön ilmaisenergioiden summa voidaan laskea kaavalla 4.

$$Q_{\text{sis}} = Q_{\text{ihmiset}} + Q_{\text{aurinko}} + Q_{\text{sähkö}} + Q_{\text{lv}} \quad \text{Kaava 4}$$

jossa	Q_{ihmiset}	= henkilöiden luovuttama lämpöenergia,
	$Q_{\text{valaistus}}$	= ikkunoiden ja vaipan läpi tuleva auringon säteily energia,
	$Q_{\text{sähkö}}$	= kiinteistön sähkölaitteiden luovuttama lämpöenergia,
	Q_{lv}	= lämpimän käyttöveden laitteista vapautuva lämpöenergia.

Ilmanvaihdon lämpöhäviöiden määrä koostuu ilmavirrasta, lämpötilaerosta ja lämmön talteenoton tehokkuudesta. Ilmanvaihdosta aiheutuvat lämpöhäviöt lämmön talteenoton kanssa lasketaan kaavan 5 mukaisesti.

$$Q_{iv} = q_m c_{ilma} \rho_{ilma} \eta_{LTO} (T_{tuloilma} + T_u) \quad \text{Kaava 5}$$

jossa	Q_{iv}	= kiinteistön ilmanvaihdon lämmitystarve,
	c_{ilma}	= ilman lämpökapasiteetti kJ/kg,
	ρ_{ilma}	= ilman tiheys kg/m ³ ,
	η_{LTO}	= lämmön talteenoton hyötysuhde,
	$T_{tuloilma}$	= tuloilman lämpötila °C,
	T_u	= ulkoilman lämpötila °C.

Kiinteistön rakennusvaipan tiiveys vaikuttaa vuotoilman määrään. Vuotoilman määrään vaikuttaa lisäksi rakennusvaipan lämpötilaerot. Vuotoilman määrä lasketaan kaavan 6 mukaisesti.

$$Q_{vuoto} = c_{ilma} \rho_{ilma} n_v V (T_s + T_u) \quad \text{Kaava 6}$$

jossa	Q_{vuoto}	= kiinteistön vuotoilmasta syntyvä lämmitystarve lämpötila °C,
	T_u	= ulkoilman lämpötila °C.
	c_{ilma}	= ilman lämpökapasiteetti kJ/kg,
	ρ_{ilma}	= ilman tiheys kg/m ³ ,
	n_v	= vuotoilmakerroin 1/h,
	V	= Kiinteistön tilavuus m ³
	T_s	= sisäilman lämpötila.

Päivittäistavarakaupoissa kalusteista aiheutuva jäähdytys aiheuttaa merkittävän osan myymälää viilentävästä jäähdystystehosta, joka täytyy kompensoida samanaikaisella lämmityksellä. Kalustejäähdytyksestä aiheutuvan jäähdytyksen teho on haastava arvioida. Usein käytetään kokemusperäisiä arvoja arvioidessa kalusteista aiheutuvaa jäähdyttävää vaikutusta. Laskennallisesti yksi tapa arvioida kalustejäähdytyksestä syntyvää lämmitystehoa on esitetty kaavassa 7.

$$Q_{\text{kaluste}} = Q_{\text{tuotevaihto}} + Q_{\text{valaistus}} + Q_{\text{ilmaverho}} + Q_{\text{sähkösulatus}} \quad \text{Kaava 7}$$

jossa Q_{kaluste} = kalustejäähdytyksen tarvitsema lämmitysteho,
 $Q_{\text{tuotevaihto}}$ = tuotevaihdon ja kalusteiden käytöstä aiheutuva lämpökuorma,
 $Q_{\text{valaistus}}$ = valaistuksesta aiheutuva lämpökuorma,
 $Q_{\text{ilmaverho}}$ = ilmaverhon tarvitsema energia,
 $Q_{\text{sähkösulatus}}$ = sulatuksen aiheuttama lämpökuorma.

[10, 102-103.]

Mikäli kylmäkalusteista kiinteistöön johtuvaa jäähdyttävää vaikutusta halutaan tarkemmin tarkastella, täytyy laskennassa huomioida kostean sisäilman entalpiat. Ulkoilman absoluuttisen kosteuden ja sisäilman lämpötilan avulla saadaan laskettua sisäilman entalpiat kaavan 8 mukaisesti, kun nollapisteksi valitaan nesteinä oleva 0 °C vesi.

$$h = c_i T_s + x c_h T_s + x l_{h0} \quad \text{Kaava 8}$$

jossa c_i = vakiopaineessa olevan ulkoilman ominaislämpö 1,01 kJ/kgK,
 T_s = sisäilman lämpötila,
 x = ulkoilman absoluuttinen kosteus,
 c_h = vakiopaineessa olevan vesihöyryn ominaislämpö 1,85J/kgK
 l_{h0} = 0 °C veden höyrystymislämpö 2501 kJ/kg.

Kylmäkalusteiden jäähdyttävää vaikutusta arvioidessa täytyy huomioida kylmä- ja pakkaskalusteiden sisäisen ilman entalpiaero suhteessa päivittäistavarakaupan sisäilman lämpötilaan. Kylmä- ja pakkaskalusteiden entalpiaerot suhteessa sisäilmaan pystytään arvioimaan h,x -piirroksen eli Mollier-diagrammin avulla. Kalusteiden sisällä oleva ilma on kylläistä ilmaa, koska se jäähdyttää kiinteistön sisäilmaa. Mollier-diagrammista saadaan katsottua kalusteen sisälämpötilaa vastaavaa ominaisentalpia, joka vähennetään kaavan 7 saadusta tuntikohtaisesta tuloksesta ja näin saadaan kylmäkalusteiden sisäilman entalpiaero laskettua. [1, 27-28.]

Jotta kalusteista aiheutuvaa jäähdyttävää vaikutusta pystytään tarkemmin tutkimaan, täytyy olemassa olevien kalusteiden tunnittainen jäähdytystehontarve tuntea. Tunnittainen jäähdytystehontarve voidaan laskea kaavan 9 mukaisesti.

$$Q_j = Q_{jmk} k \frac{h_s - h_k}{\Delta h k} \quad \text{Kaava 9}$$

jossa Q_{jmk} = kylmäkalusteiden mitoitusjäähdytystehontarve yhteensä,
 k = käyttökerroin,
 h_s = sisälämpötila,
 $\Delta h k$ = kylmäkalusteen sisäilman ja päivittäistavarakaupan sisäilman entalpian ja mitoitustilanteen entalpianero.

Pakkaskalusteille jäähdytystehontarve lasketaan muuten samalla tavalla kuin kylmäkalusteille. Mitoitusjäähdytystehontarpeeksi määritellään pakkaskalusteiden vastaava arvo ja entalpiaerona käytetään pakkaskalusteen sisäilman ominaisentalpiaa. Käyttökertoimena käytetään aukioloaikoina 1 ja kiinnioloaikoina 0,7. Kylmäkalusteista aiheutuva jäähdyttävä vaikutus sisäilmaan riippuu kalusteiden ovituksista sekä yöverhouksista. Kokemusperäisesti on käytetty ovettomien kalusteiden kohdalla kerrointa 0,3 ja ovellisissa 0,2. Kylmäkalusteiden tunnittainen jäähdyttävä vaikutus sisäilmaan lasketaan kaavan 10 mukaisesti.

$$Q_{jv} = x_o k_o Q_j + (1 - x_o) k_{ot} Q_j \quad \text{Kaava 10}$$

jossa x_o = ovellisten/ovettomien kalusteiden osuus kiinteistössä olevista kalusteista.
 k_o = ovellisten kerroin,
 Q_j = tunnittainen kylmäkalusteiden jäähdytystehontarve,
 k_{ot} = ovettomien kerroin.

Pakastekalusteiden osalta laskenta toimii samalla tavalla kuin kylmäkalusteiden osalta. [10, 32, 38.] Tutkittavassa kohteessa saneerauksen yhteydessä vaihdettiin vanhan kylmä- ja pakkaskalusteet uusiin ovellisiin kalusteisiin, joten laskennassa käytetään kertoimena 0,2 kylmä- sekä pakkaskalusteilla.

4 Tutkimuskohde

Opinnäytetyössäni tarkasteltava päivittäistavarakauppa sijaitsee Pohjois-Karjalassa. Tarkasteltavassa kiinteistössä on neliöitä 2 100 m². Myymälätiloja kiinteistössä on 1 690 m² ja loput 410 m² koostuu varasto- ja taustatiloista. Kohteesta löytyy yksi ilmanvaihtokone, jolla hoidetaan kiinteistön ilmanvaihdon lisäksi kiinteistön lämmitys. Ilmanvaihdon lämmitysverkostossa hyödynnetään kylmäjärjestelmän lauhtuksesta talteenotettua lämpöä. Tarvittaessa lisälämpöä tuotetaan kiinteistöön kaukolämmön avustuksella. Kiinteistössä on lämmitys- sekä kylmäjärjestelmien lisäksi käyttövesiverkosto ja jäähdytysverkosto, joka on liitetty ilmanvaihdon jäähdytyspatterille. Nykyisessä jäähdytysverkostossa tarvittava jäähdytys tuotetaan liuoslauhdutteisesti. Vedenjäähdytyskoneen kylmäainetta jäähdytetään lauhduttimessa vesiglykoliseoksella. Vesiglykoli-seos puolestaan jäähdytetään ulkoilmassa sijaitsevalla nestejäähdyttimellä. Jäähdytyspatterille tulevaa vesivirtaa säädetään 3-tieventtiilillä, jolla varmistetaan verkoston vakiovesivirta.

Kiinteistössä on toteutettu kylmäjärjestelmäsaneeraus kesällä 2019, jolloin luovuttiin haitalliseksi määritellystä R404A kylmäaineesta. Saneerauksen yhteydessä vanha kylmäjärjestelmä sekä kylmäkalusteet uusittiin. Vanha kylmäjärjestelmä korvattiin nykyaikaisella hiilidioksidia käyttävällä Booster-järjestelmällä. Kylmäjärjestelmäsaneerauksen lisäksi kiinteistön energiatehokkuutta haluttiin parantaa, joten kylmäjärjestelmän lauhtelämpöä ryhdyttiin ottamaan talteen.

Kohteen pakkas- ja plusjärjestelmät ovat toteutettu omina koneikkojärjestelminä. Pakkaspuolella toimii kaksi rinnakkain kytkettyä kompressoria ja pluspuolella kolme rinnankytkettyä kompressoria. Pakkaspuolella ja pluspuolella yksi kompressoreista on varustettu taajuusmuuntajalla. Taajuusmuuntajalla ohjataan käytössä olevien kompressorien määrää. Käytössä olevien kompressorien lukumäärä riippuu tarvittavasta tehon tarpeesta. Kohteessa on keskuskoneelliset kylmäkalusteet ja varastot. Pakkaspuolen mitoitusteho on 22 kW ja pluspuolen

mitoitusteho on 85 kW. Kylmäjärjestelmät mitoitetaan niin, että ne pystyvät pitämään kalusteiden vaatimat lämpötilat lämpiminä kesäkuukausina.

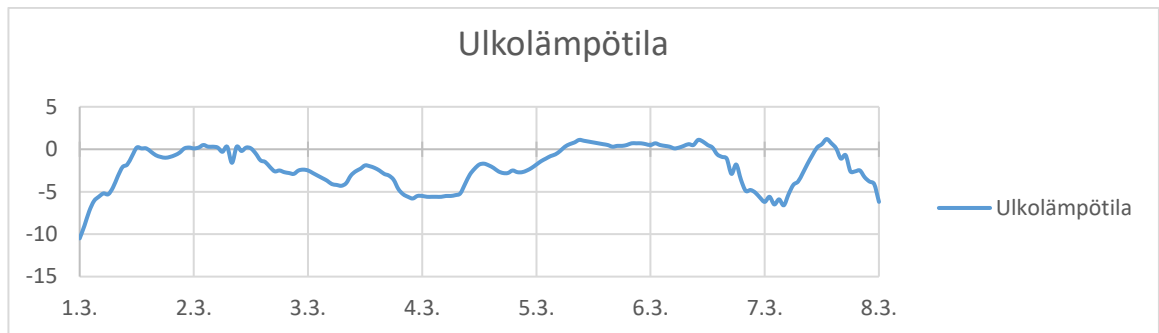
Saneerauksen yhteydessä kiinteistöön lisättiin erillinen lämmöntalteenotto kokonaisuus, jossa kylmäjärjestelmässä syntyvää lauhdutuslämpöä aloitettiin hyödyntämään kiinteistön lämmityksessä. Kylmäjärjestelmän lauhdutukseen lisättiin saneerauksen yhteydessä tulistuksenpoistosiirrin. Siirtimellä ryhdyttiin ottamaan kylmäjärjestelmän lauhdutuksen tulistuksenpoistosta lämpöä talteen, jota hyödynnetään kiinteistön ilmanvaihdon lämmityspatterissa. Loput kylmäjärjestelmän lauhdelämmöstä lauhdutetaan vesikatolla sijaitsevassa kaasujäähdyttimessä.

Lämmöntalteenottoverkostossa kiertää vesi-glykoliseos, joka kiertää tulistuksenpoistosiirtimeen läpi ja sitoo itseensä saatavilla olevaa lämpöenergiaa kylmäjärjestelmän hiilidioksidista. Talteenotettu lämpöenergia kulkee vesi-glykoliseoksen mukana talteenottoverkostossa sijaitsevalle vesisäiliölle, josta ilmanvaihdon lämmitysverkosto hyödyntää saatavilla olevaa lämpöä tarpeen mukaan. Lämmöntalteenottoverkostossa nestettä pyörittää verkostossa sijaitseva pumppu.

4.1 Mittausajanjakson olosuhteet

Mitoitus ajanjakso sijoittui lämmityskaudelle. Kohteesta kerättiin tietoa 1.3.-7.3.2020 väliseltä ajalta. Tarkasteluajanjakson aikana kohteesta seurattiin kylmäkoneikon toimintaa sekä kiinteistön hyödyntämää lämmöntalteenoton määrää. Teoreettinen lämmitysenergian tarve kiinteistölle suhteessa ulkolämpötilaan laskettiin kaavan 3.1 mukaisesti. Lämmitysenergiaa laskiessa ilmaisenergiat jätettiin huomioimatta, koska ilmaisenergioiden määrä olisi ollut suhteellisen vaikea määrittellä. Kalusteista aiheutuva sisäilmaa jäähdyttävä osuus huomioitiin lämmitysenergian tarpeessa kaavan 3.9 mukaisesti. Laskennassa oletettiin sisälämpötilan pysyvän 18 °C asteessa.

Mittausjakson aikana ulkolämpötila oli viileimmillään -10,5 ja lämpimillään 1,2 astetta. Keskiarvoltaan ulkolämpötila oli mittausjakson aikana -2,1 astetta. Kuvassa 9 on esitetty ulkolämpötilan vaihtelut tarkasteluajanjakson ajalta.

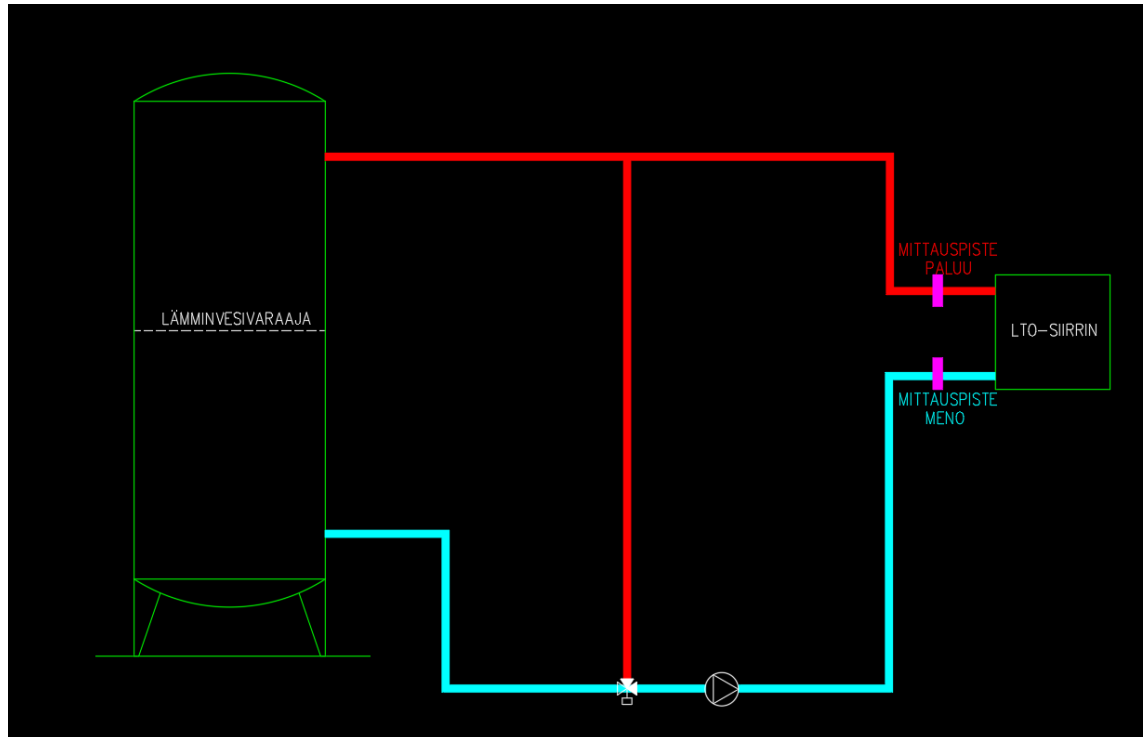


Kuva 9. Ulkolämpötila tarkasteluajanjakson aikana

4.2 Lämmöntalteenottoverkoston tarkastelu

Saneerauksen yhteydessä kiinteistöön lisättiin lämmöntalteenottoverkosto, jonka tarkoituksena on ollut pienentää ulkopuolelta ostettavan energian määrää. Tarkasteluajanjakson aikana lämmöntalteenottoverkoston toimintaa seurattiin sekä verrattiin, kuinka paljon se kattaa tarvittavasta teoreettisesta lämmitystehon tarpeesta. Lämmöntalteenottoverkostossa vesi-glykoliseos sitoo itseensä saatavilla olevaa lämpöä, jota hyödynnetään kiinteistön lämmityksessä.

Lauhdelämmön talteenottoverkoston vesi-glykoliseosta siirtimen ja lämminvesivaraajan välillä pyörittää pumppu. LTO-siirtimen ja lämminvesivaraajan välistä löytyy mittauspisteet meno- ja paluuputkesta. Talteenottoverkostossa olevan lämminvesivaraaja toimii puskurivaraajana. Mittauksista on luettavissa lämpötilat, joiden avulla voidaan laskea siirtimeltä saatava lämmitysenergia. Nykyisestä lauhdelämmön talteenottoverkostosta mitattiin tarkasteluajanjakson ajalta menoveden lämpötila ennen ja jälkeen siirtimen sekä vesi-glykoliseoksen virtausnopeus verkostossa. Kuvassa 10 on esitetty esimerkkikohteen yksinkertaistettu lauhdelämmön talteenottoverkosto sekä mittauspisteiden sijainnit.



Kuva 10. Lauhdelämmön talteenottoverkosto

Mittauksien avulla pystyttiin laskemaan lauhdelämmön talteenottoverkoston tuottama energian määrä ja vertailemaan sitä kiinteistön tarvitsemaan lämmitystehon tarpeeseen. Lämmöntalteenottoverkoston tuottama energia määriteltiin kaavan 11 mukaisesti.

$$\Phi = q_v * \Delta T * \rho * c_p$$

Kaava 11

jossa q_v = virtausnopeus,
 ΔT = meno- ja paluuveden lämpötilaero,
 ρ = veden tiheys,
 c_p = veden ominaislämpökapasiteetti vakiopaineessa.

[13, 69.]

4.3 Kylmäkoneikon toiminta tarkasteluajanjakson aikana

Kylmäkoneiden toimintaa ja toteutuneita arvoja pystyttiin seuraamaan tarkasteluajanjakson ajalta kylmäjärjestelmän koneikkosäätimeltä. Koneikkosäätimen tehtävänä on ohjata kylmäkoneiston toimintaa lämpötilojen ja

paineiden avulla. Koneikkosäätimeltä seurattiin seuraavia arvoja tarkasteluajanjakson ajan:

- kompressorien käyttämä teho
- höyrystymislämpötila ja paine
- kaasujäähdyttimeltä lähtevä lämpötila ja paine.

Saatujen mittaustietojen perusteella järjestelmä mallinnettiin kompressorien valmistajan Bitzerin tarjoamalla ohjelmalla ja näin saatiin parempi kokonaiskuva olemassa olevan kylmäjärjestelmän toiminnasta.

Lauhduttimen teho koostuu tulistus-, lauhtumis- ja alijäähdytystehosta. Kylmäaineiden välillä on eroa, kuinka lauhduttimessa poistuva lämpö jakaantuu. Mittaustietojen ja mallintamisen avulla pystyttiin seuraamaan tarkasteluajanjakson aikana toteutuneita lauhtumistehoja. Teoreettinen lauhtumisteho voidaan laskea kaavaan 12 mukaisesti.

$$Q_L = Q_o + W \quad \text{Kaava 12}$$

jossa Q_L = lauhtumisteho,
 Q_o = höyrystimen sitoma lämpöenergia,
 W = kompressorin tekemä työ.

[3, 78.]

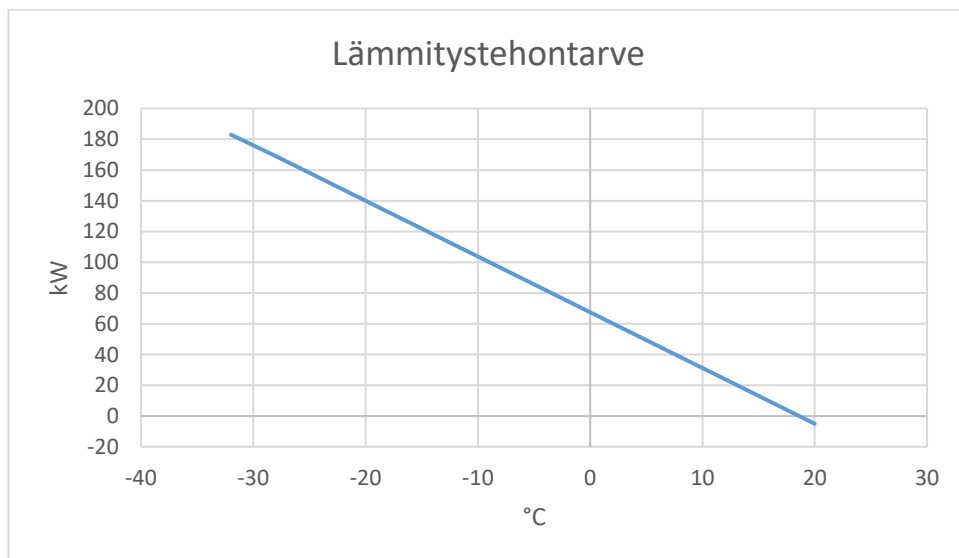
Saatavilla oleva todellinen lauhteen määrä voidaan laskea soveltamalla kaavoja 12 ja 1. Laskennassa on huomioitu toteutunut kylmäjärjestelmän lauhtumisteho sekä kompressoreista aiheutuva lämpötilan nousu. Kaavassa 13 on esitetty sovellettu kaava.

$$Q_{\text{hyöd}} = \frac{Q_L}{\varepsilon} + Q_L \quad \text{Kaava 13}$$

jossa $Q_{\text{hyöd}}$ = Saatavilla oleva lauhteen määrä,
 Q_L = lauhtumisteho,
 ε = kylmäkerroin.

4.4 Kiinteistön lämmitystehontarve

Esimerkkikohteen tarkastelussa määriteltiin kohteelle teoreettinen lämmitystehontarve. Lämmitystehon tarve laskettiin kaavan 3.1 mukaisesti. Kaavassa 3.1 ei laskennassa huomioitu ilmaisenergioiden määrää. Laskennassa huomioitiin kalusteista aiheutuva jäähtyyskuorma kaavan 3.9 mukaisesti. Kiinteistön sisälämpötilaksi laskennassa oletettiin +18 °C ja mitoitettavaksi ulkolämpötilaksi määriteltiin rakennusmääräyskokoelma D5 mukainen -32 °C, mikä vastaa Pohjois-Karjalan vaatimaa mitoitus ulkolämpötilaa. Kuvassa 11 on esitetty esimerkkikohteen teoreettinen lämpötehtarve ulkolämpötilan funktiona.



Kuva 11. Lämmitystehontarve ulkolämpötilan funktiona

5 Tutkimuskohteen tulosten tarkastelu

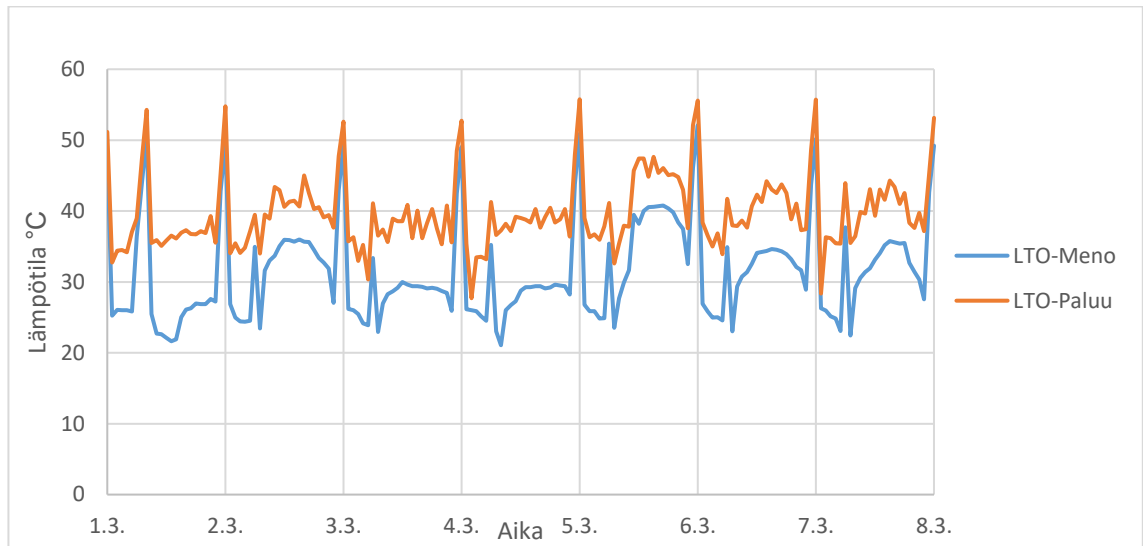
Tämän opinnäytetyön yksi tavoitteista oli tarkastella esimerkkikohteen avulla lämmöntalteenoton sekä kylmäjärjestelmän toimintaa päivittäistavarakaupassa. Lämmöntalteenoton kannalta keskeisenä tutkimuskohteena oli arvioida, miten nykyinen tulistuksenpoistolämmönsiirrin käytännössä toimii sekä kuinka paljon lämmöntalteenotolla katetaan kiinteistön tarvitsemaa lämmitystehoa. Kylmäjärjestelmän osalta tutkimuksessa pyrittiin arvioimaan saatavilla oleva lauhteen määrää ja sitä kuinka hyvin saatavilla olevaa lauhdetta kiinteistössä hyödynnetään. Tarkasteluajanjakson ajalta tietoa käsitellään tuntikohtaisesti.

Tarkasteluajanjakso on melko lyhyt, mutta tarkasteluajanjaksoon sisältyi ulkolämpötilan muutoksia riittävästi. Ulkolämpötilojen muutokset olivat tutkimuksen kannalta arvokkaita, sillä lämpötilavaihteluiden ansiosta järjestelmien toiminnasta pystyttiin hahmottamaan laajempi kokonaiskuva eri olosuhteissa. Tarkasteluajanjakson ajalta lämmitystehontarvetta arvioitiin teoreettisesti ulkolämpötilan funktiona. Toteutuneet ulkolämpötilat saatiin Ilmatieteenlaitoksen sivuilta saadusta datasta.

Kiinteistössä hyödynnettiin saatavilla olevaa lauhdetta keskimäärin 31 % saatavilla olevasta lauhdutustehosta. Huomioitavaa on se, että esimerkkikohteessa hyödynnettiin saatavilla olevasta lauhdutuksesta ainoastaan tulistuksenpoistoa tulistuksenpoistolämmönsiirtimellä. Hyödynnettävää tulistuksenpoiston osuutta voidaan pitää kohtuullisena. Hyödyntämätön lämpö tulistuksenpoistosiirtimeltä johdetaan vesikatolla sijaitsevalle kaasujäähdyttimelle, jossa kaasu jäähdytetään ulkoilmaan.

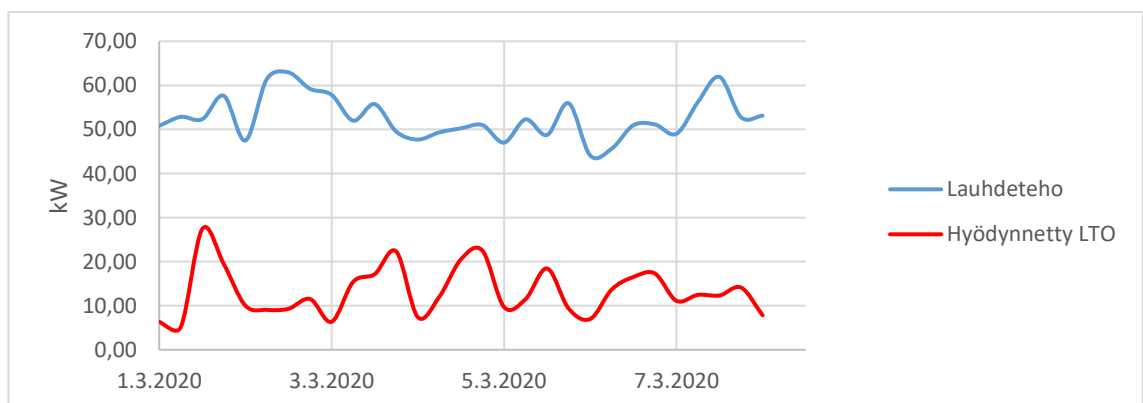
Tarkasteluajanjakson aikana kiinnitin huomioita lämmöntalteenotossa siirtimelle menevään vesi-glykoliseoksen korkeaan lämpötilaan. Talteenotettavaa lämpöä olisi ollut huomattavasti enemmän saatavilla, kuin mitä sitä tarkasteluajanjakson aikana lämmöntalteenottoverkosto hyödynsi. Samaan aikaan kiinteistössä oli lämmitystehon tarvetta ja saatavilla olevalle lauhteelle olisi ollut tarvetta kiinteistön lämmittämisessä. Lämmöntalteenottoverkostolla hyödynnetyllä

lauhdelämmöllä katettiin näin vain murto-osa lämmitystehon tarpeesta. Kuvassa 12 on esitetty vesi-glykoliseoksen meno- ja paluulämpötilat tulistuksenpoistosiirtimelle tarkasteluajanjakson ajalta.



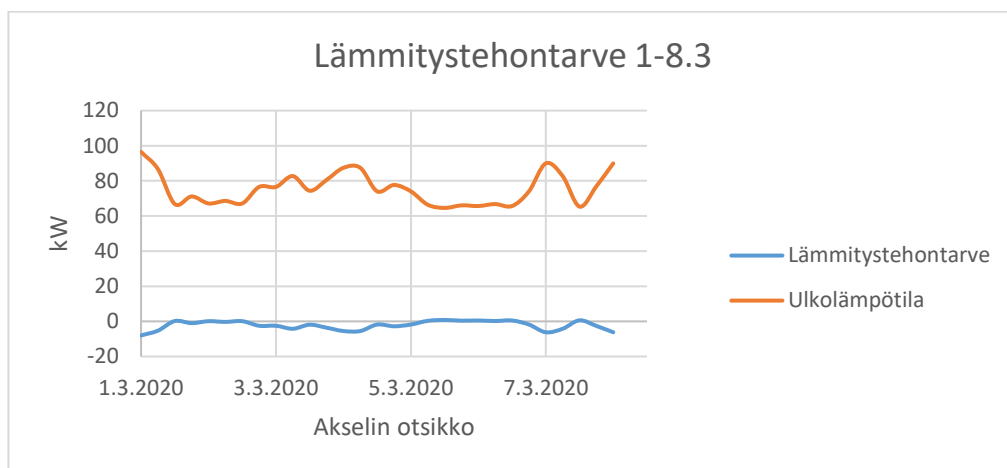
Kuva 12. Meno- ja paluulämpötilat lämmöntalteenotto siirtimelle

Kylmäjärjestelmän lauhdetta oli tarkasteluajanjakson aikana tasaisesti kiinteistössä saatavilla. Hiilidioksidia käytettäessä huomioitavaa on tulistuksenpoiston merkittävä osuus koko lauhdutustehosta. Tulistuksenpoistolämmönsiirrin on yleisesti käytössä, kun Booster-järjestelmistä otetaan lämpöä talteen. Kuvassa 13 on esitetty tarkasteluajanjakson aikana saatavilla olleen lauhdutustehon määrä sekä hyödynnetyn lämmöntalteenoton määrä.



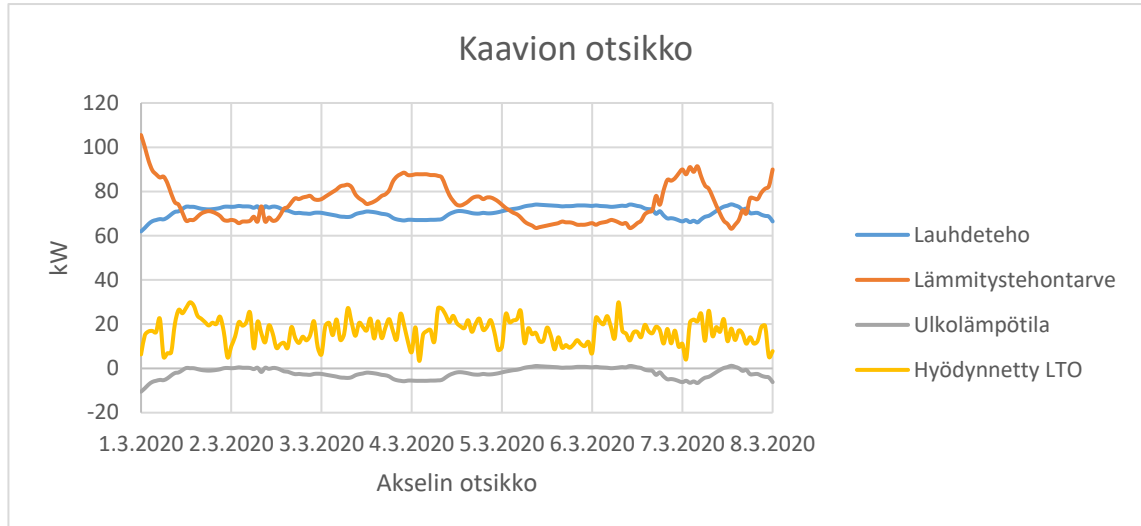
Kuva 13. Lauhdutustehon määrä sekä hyödynnetty lämmöntalteenotto

Kylmäjärjestelmän sekä lämmöntalteenottoverkoston toiminnan tarkastelun jälkeen työssä tarkasteltiin sitä, millaiset teoreettiset lämmitystehontarpeet tutkittavalla esimerkkikohteella oli tarkasteluajanjakson aikana. Teoreettinen lämmitystehontarve riippuu vallitsevasta ulkolämpötilasta. Teoreettisessa lämmitystehontarpeessa on huomioitu kylmäkalusteista sisäilmaan aiheutuva jäähdyttävä vaikutus, mikä täytyy kompensoida samanaikaisella lämmityksellä, jotta asetettu sisäilman lämpötila saavutetaan. Kuvassa 14 on esitetty esimerkkikohteen tarvitsema lämmitystehontarve ulkolämpötilan funktiona sekä ulkolämpötilan vaihtelut tarkasteluajanjakson ajalta.



Kuva 14. Teoreettinen lämmitystehontarve tarkasteluajanjakson ajalta

Esimerkkikohteessa pystyttiin arvioimaan olemassa olevien järjestelmien toimintaa toteutuneiden sekä laskettujen arvojen perusteella. Työn yksi lähtökohdista oli tarkastella sitä, kuinka paljon lauhdetta kiinteistössä on saatavilla sekä kuinka suuri osuus kiinteistöstä lämmitetään talteenotetulla lauhdelämmöllä. Kuvassa 15 on esitetty tarkasteluajanjakson ajalta lämmitystehontarve sekä kuinka lauhdutustehoa on ollut saatavilla ja kuinka hyvin tulistuksenpoistosiiirtimellä on pystytty kattamaan kiinteistön tarvitsemaa lämmitystehoa.

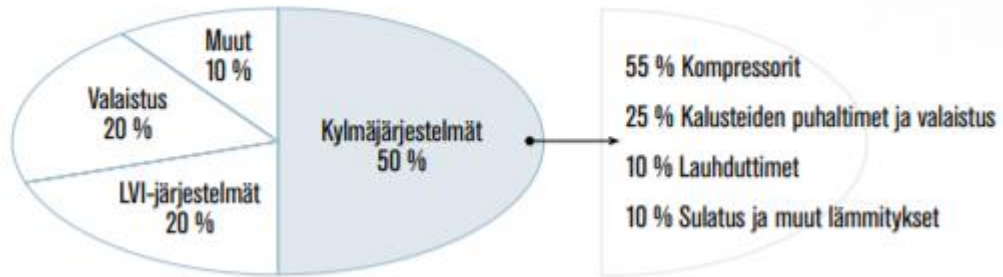


Kuva 15. Tarkasteluajanjakson tuloksia

Kuvassa 15 voidaan huomata, että lämmityksen tarvetta kiinteistössä on jatkuvasti. Kylmäjärjestelmistä saatavaa lauhdutustehoa on ollut tasaisesti saatavilla tarkasteluajanjakson aikana. Lauhdutusteholla ei olisi pystynyt kattamaan kiinteistön tarvitsemaa lämmitystehontarvetta täysin, mutta lauhdutusteholla olisi ollut mahdollista kattaa suuri osa tarvittavasta lämmitystehosta tarkasteluajanjakson aikana. Nykyinen lämmöntalteenottoverkosto hyödynsi saatavilla olevasta lauhteesta keskimäärin 22 %, joten suuri osa saatavilla olleesta lauhteesta jäi hyödyntämättä. Hyödyntämätön lauhde jäähdytettiin vesikatolla sijaitsevalla kaasujäähdyttimellä ulkoilmaan. Nykyisen talteenottoverkoston toimintaa seurattaessa huomioitavaa oli talteenottoverkostossa kiertävän nesteen korkeat lämpötilat, jolloin neste ei sido itseensä niin paljoa lämpöä mitä sitä olisi ollut saatavilla.

Päivittäistavarakaupoissa kylmäjärjestelmän kuluttaman sähkön osuus kokonaiskulutuksesta on merkittävä. Kylmäjärjestelmän vuotuiset energiankustannukset riippuvat kiinteistön koosta, mutta ne voivat vaihdella tuhansista euroista kymmeneen tuhansiin euroihin. Tyypillisesti sähkön kulutus jakaantuu päivittäistavarakaupassa kuvan 16 mukaisesti [6,4].

Sähkön kulutuksen tyypillinen jakauma päivittäistavarakaupassa



Kuva 16. Sähkön kulutuksen tyypillinen jakauma päivittäistavarakaupassa (6, 4).

Esimerkkikohteen sähkön kulutus tarkasteluajan jakson aikana oli 8352 kWh. Kylmäjärjestelmän sähkön kulutuksesta ei ollut saatavilla tarkkaa mittaustietoa, joten kylmäjärjestelmän oletettiin kuluttavan sähköä kohteessa kuvan 16 mukaisesti. Tällöin kylmäjärjestelmän sähkönkulutuksen oletetaan olevan tarkasteluajanjakson aikana 4176 kWh.

6 Lämpöpumpulla saatava hyöty

Esimerkkikohteen lauhdelämmöntalteenotto on nykyisellään suoritettu lämmönsiirtimien avulla. Nykyistä järjestelmää tutkittaessa havaittiin, että kylmälaitoksesta saatavaa lauhdelämpöä on hyödynnetty huomattavasti vähemmän, kuin sitä olisi ollut saatavilla. Kohteen lisälämmityksenä on käytetty kaukolämpöä, joten ulkopuolelta ostettavan energian pienentämisen kannalta tärkeää olisi selvittää, voisiko lämpöpumpputekniikkaa hyödyntämällä pienentää ulkopuolelta ostettavan energian määrää.

Tarkastelun kannalta olemassa oleva tulistuksenpoistolämmönsiirrin oletettiin jäävän kohteeseen entiselleen, koska sen avulla uudessa tilanteessakin saataisiin otettua osa korkeasta tulistuksenosuudesta talteen. Hyödyntämättömästä tulistuksen- ja lauhteenosuudesta pyritään saamaan talteen lämpöpumpulla. Lämpöpumppu tulitaisiin kytkemään samaan lämminvesivaraajaan, johon myös nykyinen tulistuksenpoistosiirrin on kytketty. Lämminvesivaraajalta johdettaisiin tarvittavaa lämpöä ilmanvaihtoverkostoon tarpeen mukaan.

Lämpöpumpputarkastelu tehdään tässä työssä karkealla arviointitasolla työn rajauksen vuoksi. Lämpöpumpun mahdolliset toiminta-arvot sekä tarvittavat mitoitukset on saatu lämpöpumpputoimittajalta ja näiden arvojen perusteella arvioin kokonaisuuden kannattavuutta.

Lämpöpumpputoimittajalta pyydettiin mitoituksia, jossa höyrystinpuolen lämpötilat meno- sekä paluulämpötilat ovat 10/15 ja lauhdutuspuolen 40/50. Siirtimelle menevän vesi-glykolin lämpötilaa ei haluttu laskea matalammaksi, sillä lämmön talteenoton nojalla ei haluttu vaarantaa varsinaisen kylmän tuottamista kiinteistössä. Kiinteistön ilmanvaihdon lämmitysverkoston meno- ja paluulämpötilat on asetettu mitoitusilanteessa 70/40. Käytännössä lämpöpumpulla voitaisiin tuottaa mitoitusilanteessa vain osa tarvittavasta lämmityksestä, mutta korkeammissa ulkolämpötiloissa lämpöpumpulla voitaisiin kattaa suurin osa, kiinteistön tarvitsemasta lämmitystehosta.

6.1 Lämpöpumpun lisääminen saneerauskohteeseen

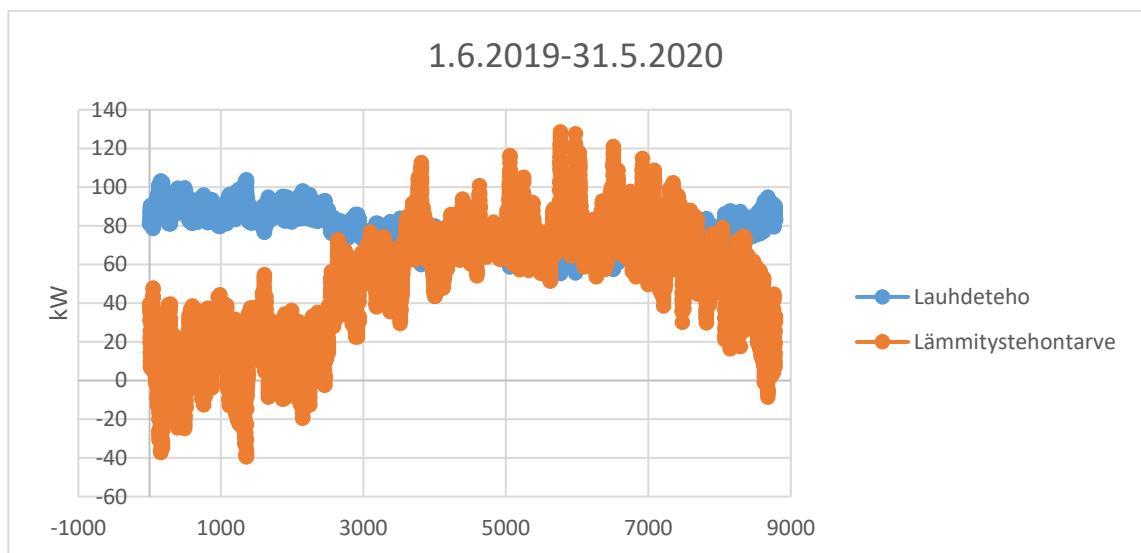
Lämpöpumppua lisättäessä saneerauskohteeseen huomioitavaa on se, minne tuotettua lämpöä voitaisiin hyödyntää. Lauhdelämpöä saadaan parhaiten talteen järjestelmiin, kun suunnittelussa on otettu huomioon talteenoton mahdollisuus esimerkiksi lämpötilatasojen osalta. [5, s.21.]

Saneerauskohteisiin lämpöpumppua lisättäessä esiintyy usein monia haasteita. Kiinteistöjen konehuoneet ovat usein suunniteltu niin ahtaaksi, jotta saneerausvaiheessa haasteeksi voi nousta konehuoneen ahtaus. Konehuoneeseen mahdollisesti tehtävät laajennustyöt nostavat usein kokonaiskustannukset niin suuriksi, jotta suunniteltu investointi ei välttämättä ole kannattava. Lämpöpumpun lisäyksen yhteydessä on tilaa varattava myös lämminvesivaraajalle, lämmönsiirtimelle ja näiden välillä kulkeville eristetyille putkistoille. Laitoskoon lisäksi laitteistojen sijoittelulla voidaan vaikuttaa tilantarpeeseen, mutta usein tilantarve lähtee noin kahdesta neliöstä ylöspäin laitoskoosta ja sijoittelusta riippuen. Huomioitavaksi haasteeksi kohteissa ilmenee usein kylmäkoneikkojen ja lämmönluovutuspiirin sijainti kiinteistössä. Putkilinjojen kasvaessa voi olla haastavaa toteuttaa tehokasta verkostoa olemassa olevaan kohteeseen. [5, 21.]

6.2 Kiinteistön mitoitusarpeet

Lämpöpumppuratkaisua mitoittaessa kiinteistön tarvittavat kulutukset ja tehontarpeet tulisi tuntea mahdollisimman tarkkaan, jotta lämpöpumppujärjestelmästä saataisiin mahdollisimman kustannustehokas. Saneerauskohteissa tarvittavat tiedot saadaan yleensä kaukolämmönoimittajalta tuntikohtaisesti, joiden perusteella tarvittavia tarkasteluja on mahdollista tehdä. Uudiskohteissa energian ja tehontarve selvitetään suunnitelmien pohjalta. Uudiskohteissa kiinteistö mallinnetaan hyödyntämällä simulointiohjelmaa esimerkiksi RiUSkaa tai IDA ICE:ä. Oppimisen kannalta tässä opinnäytetyössä energiasimulointeja vuositasolla tehtiin myös hyödyntämällä IDA ICE simulointiohjelmaa. Simuloinnissa käytettiin ohjelman tarjoamaa liikerakennuksien asetusarvoja. Simuloinnin avulla arvioitiin kiinteistön kuluttama kaukolämmön osuus ajanjaksolta 1.6.2019-31.5.2020. Vuoden 2019

kiinteistössä kulutetun sähkön määränä käytetään toteutunutta sähkönkulutuksesta, koska simulointiohjelmassa kylmäjärjestelmien kuluttamaa sähkönmäärää on haastava määrittää. Simuloinnin lisäksi aikaväliltä 1.6.2019-31.5.2020 tehtiin tuntikohtainen laskenta Excelillä, jossa huomioitiin tuntitasolla kiinteistön tarvitsema lämmitysteho sekä saatavilla oleva lauhteen määrä. Lämmitystehontarpeessa huomioitiin kiinteistön kylmäkalusteista aiheutuva sisäilmaa jäädyttävä vaikutus. Laskennassa hyödynnettiin Ilmatieteenlaitoksen tarjoamaa tuntikohtaista säädettä ajanjakson ajalta. Kuvassa 17 on esitetty vuositasolla kiinteistön lämmitystehontarve sekä saatavilla olevan lauhteen määrä.



Kuva 17. Lämmitystehontarve sekä lauhdeteho ulkolämpötilan funktiona

IDA ICE -simuloinnin perusteella kiinteistössä on kulunut vuoden 2019 aikana lämmitykseen sekä käyttöveteen yhteensä 185 MWh kaukolämpöä. Toteutunut sähkönkulutus vuodelta 2019 on 700 MWh. Kylmäjärjestelmien kuluttama sähkön osuus on noin 50 % kokonaiskulutuksesta arvioituna. Lämpöpumppua lisättäessä sähkönkulutus kasvaa hieman, mutta toisaalta kylmäjärjestelmän energiatehokkuus paranee, jolloin kylmäjärjestelmän sähkönkulutus voi pienentyä.

Simulointi ei huomionnut kaukolämmön kulutuksen laskennassa kiinteistössä olevaa tulistuksenpoistosiirintä, joten hyödynnetty talteenotto arvioidaan tarkasteluajanjakson aikana tehdyillä huomioilla. Tarkasteluajanjakson aikana kylmäjärjestelmästä talteenotetulla tulistuksella katettiin keskimääriin 22 %

lämmitystehontarpeesta, jota käyttämällä teoreettiseksi ulkopuolelta ostetuksi kaukolämmön määräksi saatiin vuonna 2019 153,5 MWh. Ilmanvaihdon lämmityksen osuus kokonaiskulutuksesta oli 140,2 MWh.

6.3 Lämpöpumpun valinta

Laitetoimittajalta saatujen mitoitus tietojen avulla valitsin kohteeseen sopivan lämpöpumpun. Valittaessa lämpöpumpua hyödynsin kiinteistöstä saatuja kylmä- ja pakkaskalusteiden tehoja. Kylmäkalusteiden mitoitus tehot olivat 85 kW ja pakkaskalusteiden 22 kW. Booster-järjestelmä on kaksiportainen järjestelmä, joten kylmäprosessissa kaasujäähdyttimelle menevä kaasu koostuu ainoastaan kylmäkalusteiden. Teoriassa tämä tarkoittaa, että lauhduttimen luovuttama lämpö vastaa höyrystimen sitomaa lämpöä. Esimerkkikohteessa tämä vastaisi kylmäjärjestelmän mitoitus tilanteessa 85 kW. Todellisuudessa laskennassa olisi hyvä huomioida lisäksi kylmäjärjestelmän kompressoreista aiheutuva höyryn lämpötilan nousu, joka vaikuttaa saatavilla olevan lauhteen määrään.

Lämpöpumpua valittaessa täytyy huomioida jo nykyisin kiinteistössä toimiva tulistuksenpoistolämmönsiirrin. Tarkasteluajanjakson aikana siirrin hyödynsi keskimäärin 22 % saatavilla olevasta lauhdutustehosta, mutta tarkastelussa arvioidaan siirtimen hyödyntävän 30 % saatavilla olevasta lauhdutustehosta. Tulistuksenpoistolämmönsiirtimen osuus saatavilla olevasta lauhteesta olisi tällöin 25,5 kW, joten lämpöpumpulle jäisi teoriassa 59,5 kW osuus jäähdytettävästä hiilidioksidista kylmäjärjestelmän mitoitus tilanteessa. Tällä käytänteellä ulkona sijaitsevalla kaasujäähdyttimellä ei tarvitsisi hiilidioksidia jäähdyttää ollenkaan ulkoilmaan tai enintään huomattavasti pienempi määrä kuin nykytilanteessa. Näiden tietojen sekä saatujen mitoitus tietojen avulla kiinteistöön valitsin liitteen 1 mukaisen lämpöpumpun.

6.4 Kaukolämmön energiakustannukset

Kiinteistöä on aikaisemmin lämmitetty pääasiassa kaukolämmön avulla. Kaukolämmön hinta koostuu kaukolämpötoimittajan antamasta energiamaksusta eli käyttäjä maksaa käytetystä kaukolämmöstä. Huomioitavaa on, että käyttäjän täytyy maksaa energiamaksun lisäksi tehomaksu. Tehomaksun suuruus riippuu,

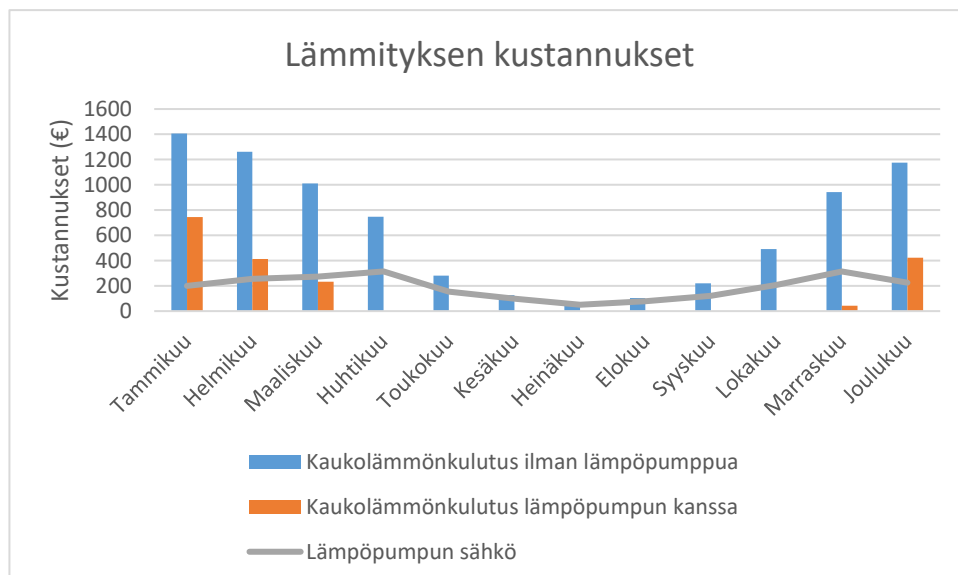
onko kyseessä asuinrakennus vai muut rakennukset. Tehomaksuun vaikuttaa kiinteistöön suunnitelluiden järjestelmien tehot, kuten käyttövesiverkoston tai lämmitysverkoston mitoitustehot. Kuvassa 18 on esitetty Savon Voiman tehonmaksu taulukko. Tehomaksu lasketaan kiinteistön mitoitus-teho kertaa kaukolämmötoimittajan ilmoittama kerroin ja siihen lisätään vuosittainen perusmaksu.

Tehomaksu €/vuosi, alv. 0 %

Asuinrakennukset		Muut rakennukset	
Teho (kW)	Tehomaksu (€/vuosi)	Teho (kW)	Tehomaksu (€/vuosi)
5–140	55 x kW - 60	5–80	54 x kW - 60
141–400	36 x kW + 2 600	81–250	41 x kW + 980
yli 400	17 x kW + 10 200	251–500	31 x kW + 3 480
		501–1 000	14 x kW + 11 980
		yli 1 000	10 x kW + 15 980

Kuva 18. Tehomaksu (Savon Voima, 2020, 1.)

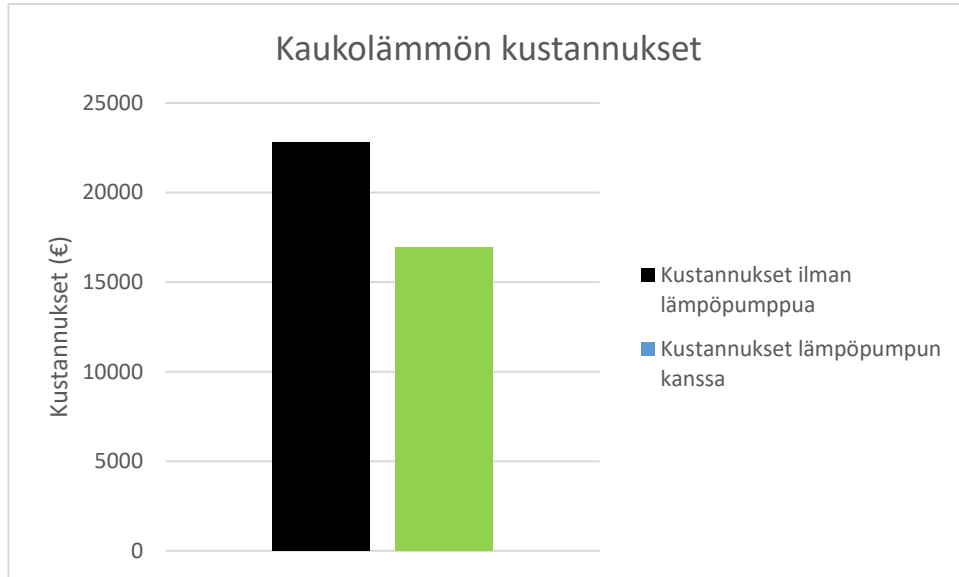
IDA ICE:llä tehdyn energiasimuloinnin avulla esimerkkikohteen kaukolämmön energiamaksun suuruus vuositasolla laskettiin niin, että toisessa laskennassa lämpöpumppua ei hyödynnetty kiinteistön lämmittämisessä ja toisessa laskennassa lämpöpumppua hyödynnettiin kiinteistön lämmityksessä. Huomioitavaa on, että käyttäessä lämpöpumppua ulkopuolelta ei ole tarvetta ostaa lämmitysenergiaa huhti-lokakuussa. Kuvassa 19 on esitetty kaukolämmön energiamaksut kuukausitasolla.



Kuva 19. Lämmityksen energiamaksut

Kuten kuvasta 19 voimme huomata kaukolämmön energiamaksut eivät ole kovin suuria suhteessa kiinteistön kokoon. Ilman lämpöpumppua kaukolämmön energiamaksut olisivat vuositasolla 7828 € ja vastaavasti lämpöpumppua hyödyntämällä 1853 €. Lämpöpumppua hyödyntämällä täytyy huomioida myös järjestelmän kuluttama sähkön määrä, koska se kasvattaa lämmityksen kokonaiskustannuksia lämpöpumppua käyttäessä. Lämpöpumppujärjestelmän tarvitseman sähkönkulutuksen hinnaksi vuositasolla arvioin 2300 €. Lämpöpumppua hyödyntäessä kaukolämmön ja lämpöpumppujärjestelmän sähkönkulutuksen kokonaiskustannukset ovat 4153€ vuositasolla. Energiamaksujen lisäksi täytyy huomioida kaukolämpötoimittajan asettamat tehomaksut, jotka ovat esitetty kuvassa 18. Tässä kohteessa lämmönjakokeskuksella verkostot ovat mitoitettu yhteensä 370 kW, joten tehomaksuun suuruus vuodessa ilman lämpöpumppua on noin 14950 €. Kokonaiskustannukset kaukolämmöstä ovat ilman lämpöpumppua energia- sekä tehomaksun kanssa noin 22778 €.

Lämpöpumppua kiinteistöön lisätessä on hyvä huomioida kiinteistöön nykyiset mitoitusarvot lämmönjakokeskuksessa. Pelkällä energiamaksujen hinnalla lämpöpumppu investoinnista on haastavaa saada houkutteleva, mutta mahdollisen tehomaksun aleneman jälkeen tilanne on toinen. Tässä tapauksessa arvioin, että nykyisiä mitoitusarvoja voitaisiin tiputtaa lämmitysverkoston osalta niin, että tulevaisuudessa lämmönjakokeskuksen mitoitus arvot voisivat olla noin 300 kW kokoluokkaa, sillä jatkossa lämpöpumpulla voitaisiin kattaa suurin osa kiinteistössä tarvittavasta lämmitystehosta. Uudessa tilanteessa kaukolämmön kokonaiskustannukset koostuisivat tarvittavasta tehomaksusta, ulkopuolelta ostettavan energian määrästä sekä lämpöpumppujärjestelmän kuluttamasta sähkön määrästä. Lämpöpumppua hyödyntämällä kaukolämmön kokonaiskustannukset uudessa tilanteessa olisivat noin 16924 €. Kuvassa 20 on esitetty kaukolämmön kokonaiskustannukset vuosi tasolla ilman lämpöpumppua sekä lämpöpumpun kanssa.



Kuva 20. Kaukolämmön kokonaiskustannukset

6.5 Investointikustannukset

Lämpöpumpun investointikustannukset riippuvat valitusta tekniikasta sekä tarvittavan järjestelmän koosta. Investointikustannuksiin sisältyy yleensä lämpöpumpun lisäksi varaaja ja lämmönsiirtimet lauhdepiiriin. Lisäkustannuksia voi syntyä, jos kiinteistöön täytyy tehdä rakenteellisia muutoksia esimerkiksi laajennuksia tai tilamuutoksia.

Esimerkkikohteeseen valikoitui liitteessä 1 esitetty lämpöpumppu. Investointikustannuksiin on arvioitu yleisellä tasolla järjestelmän hankintahinta sekä tarvittavat asennustyöt tarvikkeineen. Tilamuutoksia esimerkkikohteessa ei ole tarvetta tehdä. Investointikustannuksessa on huomioitu lämpöpumpun hinta, putkitarvikkeet, tarvittavat putkityöt, rakennusautomaation osuus sekä tarvittavat sähkötyöt. Investoinnin hinnaksi arvioin 45000 € kokonaisuutena arvonlisäveron ollessa 0 %. Taulukossa 1 on eritelty, mistä investoinnin hinta koostuu.

Lämpöpumppu asennettuna	25 000 €
Lauhdutuspuolen varaaja	5 000 €
Höyrystinpuolen varaaja	7 000 €
Oheislaitteet	2 000 €
Sähkötyöt	2 000 €
Rakennusautomaatiotyöt	4 000 €
Yhteensä	45 000 €

Taulukko 1. Lämpöpumppujärjestelmän investointikustannukset

6.6 Lämpöpumpun sähkönkulutus

Lämpöpumpputjärjestelmän lisääminen kasvattaa kiinteistön kuluttamaa sähkön määrää. Sähkönkulutuksen arvioimiseksi järjestelmälle täytyy määrittellä kylmä- ja lämpökerroin. Kaavassa 1 on esitetty, kuinka kylmäkerroin määritellään. Lämpöpumpun lämpökerroin saadaan määriteltä häviöttömässä kiertoprosessissa lisäämällä kaavaan 1 luku 1.

Lämpöpumpun sähkönkulutusta tarkastellessa hyödynnettiin lämpöpumpuntoimittajalta saatuja mitoitus tietoja, jonka avulla lämpöpumpun kuluttamaa sähkön määrää arvioidaan suhteessa tuotettuun lämpöön. Valitulla lämpöpumpulla kylmäkerroin eli EER (Energy Efficiency Ratio) on 3,56 ja lämpökerroin eli COP (Coefficient Of Performance) on 4,4 mitoitus tilanteessa. Havaintona voidaan huomioda, että kyseessä ei ole häviötön kiertoprosessi. Käyttämällä sähköä 17,33 kW tuotetaan lämpöpumpulla vastaavasti lämpöä 76,76 kW, josta saadaan lämpöpumpun lämpökerroin mitoitus tilanteessa. Lämpöpumpulla otetaan talteen kylmäjärjestelmän lauhdelämpöä, jossa kompressorin 17,12 kW käyttämällä sähköteholla tuotetaan kylmäjärjestelmän tarvitsemaa jäähdytystehoa 61,03 kW, josta saadaan lämpöpumpun kylmäkerroin mitoitus tilanteessa.

Lämpöpumpun arvioitiin lisäävän vuositasolla kiinteistön sähkön kulutusta 26 MWh. Sähkönhintana työssä on käytetty 85 €/MWh. Käytetyssä sähköhinnassa on huomioitu sähköenergia sekä siirtomaksu. Lämpöpumpun kuluttama sähkönhinta vuositasolla on noin 2300 €, mikä on myös huomioitu kuvassa 20.

6.7 Investoinnin takaisinmaksuaika

Takaisinmaksuajan tarkoituksena on laskea, kuinka nopeasti investoinnin vuotuiset nettotuotot ovat kattaneet hankintamenot. Tässä tapauksessa lasketaan, kuinka nopeasti lämpöpumpuun investoidut rahat ovat maksaneet itsensä takaisin, kun se on pienentänyt ulkopuolelta ostettavan kaukolämmön määrää. Tässä laskennassa ei oteta huomioon raha aika-arvoa eli laskentakorkokantaa, joten menetelmää kutsutaan korottomaksi

takaisinmaksuajaksi. Takaisinmaksuaika lasketaan kaavan 14 mukaisesti. [7, 327-328.]

$$Takaisinmaksuaika = \frac{\text{hankintameno}}{\text{vuotuinen nettotuotto}} \quad \text{Kaava 14}$$

Takaisinmaksu laskennassa huomioitiin hankintamena lämpöpumpun investointikustannukset. Vuotuisessa nettotuotossa huomioitiin hyödyt, jota kiinteistössä saadaan lämmityskustannuksien pienentyessä. Lämmityskustannuksissa on huomioitu järjestelmän käyttämä sähkönhinta, mutta kylmäjärjestelmän mahdollisia sähkönkulutuksen pienentymisiä ei ole laskennassa huomioitu. Investoinnille takaisinmaksuajaksi saatiin 7,7 vuotta.

7 Johtopäätökset

Esimerkkikohteen tarkastelussa havaittiin, että kiinteistön lämmöntalteenottoverkosto ei kykene hyödyntämään saatavilla olevaa lauhdetta niin hyvin kuin sitä olisi ollut saatavilla. Olemassa olevan lämmöntalteenottoverkoston toimivuutta voitaisiin mahdollisesti parantaa tarkastelemalla tarkemmin verkoston asetettuja meno-paluulämpötilojen asetusarvoja. Tarkastelussa ilmeni, että tulistusta saadaan talteen vaihtelevalla menestyksellä. Tässä työssä ei tarkemmin kohdennettu tutkimusta nykyisen verkoston parantamiseen, vaan vaihtoehtoiseen ratkaisuun, jolla lauhdetta voitaisiin hyödyntää tehokkaammin.

Vertailukohteeksi työssä valikoitui lämpöpumppujärjestelmä, jonka tarkoituksena olisi parantaa kiinteistöstä saatavilla olevaa lauhteen talteenottoa. Tutkimuksen edetessä havaitsin, että olemassa oleva tulistuksenpoistosiirrin kannattaa hyödyntää kiinteistössä lämpöpumpun rinnalla, sillä lämpöpumpulla on järkevämpi keskittyä alhaisempiin lämpötiloihin. Tällä menetelmällä kylmäjärjestelmästä saadaan tehokkaasti otettua tulistusta talteen tulistuksenpoistolämmönsiirtimellä ja lämpöpumppua hyödyntämällä alhaisemmat hiilidioksidin luovuttamat lämpötilat. Kesäkuukausina, jolloin kylmäjärjestelmä joutuu toimimaan lähellä mitoitusarvoja, on myös lauhdetta kiinteistössä eniten saatavilla. Näinä aikoina kylmäjärjestelmä joutuu jäähdyttämään osan saatavilla olevasta lauhteesta katolta, koska kiinteistössä ei ole saman aikaista lämmityksen tarvetta. Yhtenä vaihtoehtoina olisi tällöin myydä tuotettua lämpöenergiaa ulkopuolelle, mutta tässä työssä ei huomioitu tätä mahdollisuutta.

Työssäni havaitsin, että vaihtoehtoisena lämmöntalteenottoratkaisuna lämpöpumppukokonaisuus olisi kannattava investointi. Nykyisin kiinteistössä toimiva tulistuksenpoistolämmönsiirrin hyödyntää vain osan saatavilla olevasta lauhteesta ja näin potentiaalista lämpöä jäähdytetään ulkoilmaan. Uudessa lämmöntalteenotto kokonaisuudessa nykyistä tulistuksenpoistosiirrintä

hyödynnettäisiin edelleen, mutta rinnalle asennettaisiin lämpöpumppu. Tulistuksenpoistosiirtimen ja lämpöpumpun avulla ulkopuolelta ostettavan kaukolämmön määrää pystytään pienentämään huomattavasti.

Tulosten tarkastelusta huomattiin, että lämpöpumppu investointi maksaa itsensä melko nopeasti takaisin. Takaisinmaksuaikaan toki pitää suhtautua kriittisesti, sillä arvio tehtiin yleisellä tasolla. Takaisinmaksun lisäksi investoinnista olisi voinut tehdä elinkaariarvion, jossa olisi huomioitu tarkemmin investoidun laitteiston käyttöikä huoltoineen ja näin saatu laajempi käsitys elinkaarenaikaisista mahdollisista lisäkustannuksista.

Kaukolämmön kokonaiskulut koostuvat energiamaksun lisäksi tehomaksusta. Uuden lämmöntalteenotto menetelmän ansiosta kiinteistön tehonmaksun suuruus tulee pienentymään väistämättä. Työssäni arvioin, että lämmönjakokeskuksen nykyiset mitoitusarvot tulisivat laskemaan, mikä vaikuttaa suoraan olemassa olevaan tehonmaksuun. Todellisuudessa tehonmaksun kokonaisuus voisi olla huomattavasti pienempi, mitä itse työssäni arvioin. Tämän takia suosittelisin tehonmaksun perusteiden tarkistamista jokaiseen päivittäistavarakauppaan, joissa parannellaan kylmäjärjestelmän lauhteen lämmöntalteenottoverkostoja kylmäjärjestelmäsaneerauksen yhteydessä. Tehonmaksun tarkastamisen yhteydessä kiinteistön ylläpitäjä voi hyötyä tehdystä investoinnista huomattavasti enemmän kuin suunnitelmassa on arvioitu.

8 Pohdinta

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia päivittäistavarakauppojen kylmäjärjestelmien sekä lämmöntalteenottoverkostojen toimintaa esimerkkikohteen avulla. Aihe on hyvin ajankohtainen, sillä kylmäjärjestelmäsaneerauksia tullaan tekemään tulevina vuosina suuri määrä ja tässä työssä on pystytty esittämään huomioita, jotka on hyvä ottaa huomioon suunniteltaessa lämmöntalteenottoverkostoa. Tulosten perusteella voidaan arvioida, että kylmäjärjestelmästä saatavalla lauhteella voidaan kattaa merkittävä osa kiinteistön tarvitsemasta lämpöenergian tarpeesta. Tulistuksenpoistolämmönsiirrin on hyvä lisä lämmöntalteenotossa keskisuurissa päivittäistavarakaupoissa, mutta rinnalle on järkevää investoida lämpöpumppu talteenottamaan hyödyntämätöntä lauhdetehoa. Tulosten perusteella lämpöpumpulla sekä tulistuksenpoistosiirtimellä voidaan ulkopuolelta ostettavan kaukolämmön osuutta pienentää merkittävästi.

Kylmäjärjestelmän lauhdelämpöä hyödyntäessä on tärkeää huomioida saatavilla oleva lauhteen määrä. Lauhteen määrään vaikuttaa keskeisesti vallitseva ulkolämpötila. Lämmityskaudella ulkolämpötilat ovat lämmenneet viime vuosina. Tämän seurauksena kiinteistöiden tarvitsemat lämmitystehotkaan eivät ole kuin hetkittäin mitoitus arvoissaan. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että kylmäjärjestelmästä saatavalla lauhteella voidaan tulevaisuudessa kattaa yhä suurempi osa kiinteistön tarvitsemasta lämmitystehosta, sillä ulkopuolelta ostettavaa lisälämmitystä ei tarvita kuin hetkittäin.

Energiätehokkuutta voidaan parantaa huomattavasti päivittäistavarakaupoissa hyvin suunnitelluilla lämmöntalteenottoratkaisuilla. Suunnittelussa suunnittelijan täytyy huomioida laadukkaiden suunnitelmien lisäksi se, että käytännön toteutuksessa järjestelmiin lisätään riittävästi mittareita seuraamaan järjestelmän toimintaa. Mittareiden avulla pystytään seuraamaan järjestelmien käytön aikaisia arvoja sekä tarvittaessa tekemään tarvittavia parannuksia, jotta päästään parhaaseen mahdolliseen lopputulokseen. Laadukkaalla suunnittelulla ja käytönaikaisella hienosäädöllä voidaan varmistaa energiatehokas toiminta kiinteistön järjestelmissä.

Kiinteistön energiatehokkuuden parantamisen lisäksi saneerauksen yhteydessä kiinteistöstä aiheutuvat kasvihuonepäästöt pienenevät. Päivittäistavarakaupassa syntyviin kasvihuonekaasupäästöjen määrään vaikuttaa HFC-kylmäaineiden lisäksi kiinteistön ulkopuolelta ostetun energian määrä. Usein ulkopuolelta ostettu energia on tuotettu fossiilisilla polttoaineilla, joka kasvattaa kiinteistöstä aiheutuvia päästöjä huomattavasti. Kylmäjärjestelmäsaneerauksen yhteydessä kasvihuonekaasupäästöt pienenevät, kun siirytään käyttämään luonnollisia kylmäaineita sekä hyödyntämään kylmäjärjestelmässä sivutuotteena syntyvää lämpöä. Tulevaisuudessa mahdollisista kylmäaine vuodoista kiinteistössä ei synny enää haitallisia kasvihuonekaasupäästöjä, koska käytetyt kylmäaineet ovat luonnollisia kylmäaineita.

Työssä saatuja tuloksia ei voida pitää yleispätevinä jokaiseen suunnittelukohteeseen, sillä jokainen kiinteistö täytyy tarkastella erikseen. Toimintamallit suunnitellessa ovat samat, mutta työssä havaitut tulokset eivät ole suoraan hyödynnettävissä eri kohteisiin. Työssä saatuja tuloksia voidaan pitää suuntaa antavina ja suunnittelussa tukena.

Jatkotutkimuksena voisi tutkia syvällisemmin kohdetta, johon olisi tehty kylmäjärjestelmäsaneerauksen yhteydessä lämmöntalteenottoverkosto. Lämmöntalteenottoverkosto koostuisi lämpöpumpusta sekä tulistuksenpoistolämmönsiirtimestä riittävällä käytönaikaisella mittaroinnilla. Tällöin lämmöntalteenottoverkoston toiminnasta käytännössä saataisiin laajempi kokonaiskuva. Lisäksi jatkotutkimuksena voisi tutkia kuinka lämpöpumppua voitaisiin hyödyntää kiinteistön jäähdytyksessä silloin, kun kiinteistössä ei ole lämmitystarvetta. Kuten kuvasta 17 voimme nähdä kesäkuukausina kiinteistössä ilmenee jäähdytyksentarvetta, joka voitaisiin mahdollisesti hoitaa hyödyntämällä kiinteistössä olevaa lämpöpumppua.

Lähteet

1. Aittomäki, A. 2012. Kylmäteknikka, 4.painos. Suomen Kylmäyhdistys ry, Helsinki.
2. Kaappola, E. Hirvelä, A. Jokela, M. Kianta, J. 2015. Kylmäteknikan perusteet, 4.painos. Opetushallitus, Helsinki.
3. Hakala, P. Kaappola, E. 2013. Kylmälaitoksen suunnittelu, 3.painos. Opetushallitus, Helsinki.
4. Lavento, Dakota 2019. R404A poistuu kaupan kylmästä-mutta hitaasti. Talotekniikka nro 8
5. Motiva, 2012. Kaupan kylmälaitteiden ja -järjestelmien lauhdelämmön talteenotto.
https://www.motiva.fi/files/7973/Kaupan_kylmalaitteiden_ja_jarjestelmien_lauhdelammon_talteenotto_Laskentaohje.pdf 15.3.2020.
6. Motiva, 2012. Kylmää tehokkaasti päivittäistavarakaupalle.
https://www.motiva.fi/files/2889/Kylmaa_tehokkaasti_paivittaistavarakaupalle.pdf 18.3.2020
7. Saaranen, P. Koltola, E. Pösö, J. 2016. Liike-elämän MATEMATIIKKA, 11.uudistettu painos. Otava Kirjapaino Oy, Keuruu.
8. Kylmäextra, 2010. CO₂ kaupankylmässä.
https://issuu.com/skill6/docs/ke10_web_ii_20.5.2020 18.3.2020
9. Sawalha, S, 2012. Investigation of heat recovery in CO₂ trans-critical solution for supermarket refrigeration. International journal of refrigeration 36 (1), 145-156.
https://www.researchgate.net/publication/256967444_Investigation_of_heat_recovery_in_CO2_trans-critical_solution_for_supermarket_refrigeration 20.5.2020
10. Seppänen, O. 2001. Rakennusten lämmitys, 2.päivitetty painos. Suomen LVI-liitto ry, Gummerrus Kirjapaino Oy, Jyväskylä.
11. Karppinen, E. 2016. Euroopan unionin kylmäainelainsäädännön vaikutukset pienen kokoluokan markettien kylmäntuoton teknisiin sovellutuksiin ja energia tehokkuuteen. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Ympäristö- ja energiateknikan koulutusohjelma. Talotekniikka.
<https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/123456789/23765/karppinen.pdf?sequence=3&isAllowed=y> 13.4.2020

12. Savon Voima. 2020. Kaukolämpöhinnasto, taloyhtiöt ja yritykset.
https://www.savonvoima.fi/globalassets/dokumentit/hinnat-ja-ehdot/kaukolampo---joensuu/sv_kaukolampohinnasto_joensuu_01012020.pdf 15.10.2020
13. Mäkelä, V. Tuunanen, J. 2015. Suomalainen kaukolämmitys, Mikkelin ammattikorkeakoulu, Mikkeli.
<https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/97138/URNISBN9789515885074.pdf?sequence=1&isAllowed=y> 6.6.2020

Lämpöpumppu esimerkkikohteeseen

	RPM	Brine In °C	Brine Out °C	Brine Flow m ³ /h	Rad In °C	Rad Out °C	Rad Flow m ³ /h	ElecPwr, kW	HeatCap, kW	COP	CoolCap, kW	CompPwr, kW	HeatCap, kW
MEGA XL	4000	15	10	10,9	40	50	6,68	17,33	76,74	4,4	61,03	17,12	76,7