



Timo Lappeteläinen

# Hukkalämmön hyödyntäminen kaup- pan kiinteistöissä – parhaat käytän- nöt saneerauskohteissa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (YAMK)

Talotekniikka

Opinnäytetyö

16.10.2021

## Tiivistelmä

Tekijä: Timo Lappeteläinen  
Otsikko: Hukkalämmön hyödyntäminen kaupan kiinteistössä  
Sivumäärä: 84 sivua  
Aika: 16.10.2021

Tutkinto: Insinööri (YAMK)  
Tutkinto-ohjelma: Talotekniikka tutkinto-ohjelma  
Suuntautumisvaihtoehto: LVI-tekniikka  
Ohjaajat: Diplomi-insinööri, Esko Kaappola, Metropolia  
Filosofian maisteri, Miika Kakko, SOK Kiinteistöissä

---

Työssä tutkitaan viiden kauppakiinteistön lauhdelämmön hyödyntämistä. Kohteet on valittu sen perusteella, että niihin on tehty viimeisen kolmen vuoden aikana kaupan kylmäjärjestelmän hukkalämpöä hyödyntävän lauhdelämmön talteenottojärjestelmän saneeraus. Työssä keskitytään tutkimaan ja vertailemaan kohteiden mitattuja energiankulutustietoja.

Energiankulutustietojen perusteella pystytään selvittämään, kuinka suuri osa rakennuksen lämmitykseen kuluva energiasta saadaan katettua kaupan kylmäjärjestelmän tuottamaa hukkalämpöä hyödyntämällä. Työn tavoitteena on esitellä parhaat käytännöt lauhdelämmön talteenottojärjestelmän saneerauksen toteuttamiseksi. Edelleen pyritään selvittämään, kuinka paljon rakennuksen lämmitykseen käytettyä ostoenergian kulutusta voidaan pienentää hukkalämpöä hyödyntämällä.

Työn alussa esitellään käytetyt tutkimusmenetelmät. Tämän jälkeen käydään karkealla tasolla läpi yleisimmin käytetyt kylmäkoneistotyypit sekä lauhdelämmön hyödyntämis- ja kytkentäperiaatteet. Seuraavaksi pohditaan hiilidioksidikylmäprosessin alijäähdyttämisen etuja. Myöhemmin työssä esitellään vielä viiden erilaisten lauhdelämmön talteenottototeutuksen avulla saavutetut ostoenergian kulutussäästöt takaisinmaksuaikoihin.

Tutkimus osoittaa, että vanhat lauhdelämmön talteenottojärjestelmät eivät käyttäneet lauhdelämpöä kovin tehokkaasti hyödykseen rakennuksen lämmityksessä. Lauhdelämmön talteenottojärjestelmän saneerauksen jälkeen lauhdelämmöllä saatiin parhaimmillaan katettu lähes 80 prosenttia kiinteistön kokonaislämmitysenergiasta. Tarkeimmat lopputulokset ja johtopäätökset on esitetty työn päätelmäosiossa.

Avainsanat: lauhdelämpö, hukkalämpö, hiilidioksidi, CO<sub>2</sub>, kylmäjärjestelmä, uusiutuva energia

## Abstract

Author: Timo Lappeteläinen  
Title: Utilization of waste heat in Supermarkets  
Number of Pages: 84 pages  
Date: 16 October 2021

Degree: Master of Science  
Degree Programme: Building Services Engineering  
Specialisation option: HVAC Engineering  
Instructors: Esko Kaappola, Master of Science  
Miika Kakko, Master of Science

---

The purpose of this final year project was to study waste heat utilization in five supermarkets, all supermarkets with a major renovation in the refrigeration systems heat recovery unit in past three years. The study focused on comparing the energy consumption of the buildings before and after the renovations.

The target was to establish how efficient the heat recovery unit of supermarket refrigeration systems can be. Furthermore an aim was to establish how much the energy consumption of a building can be decreased with a heat recovery. The final aim was to launch best practices to help build the most efficient heat recovery systems possible.

The final year project reviewed common refrigeration systems, heat recovery equipment and installation methods and gave an overview of mechanical subcooling as part of a heat recovery unit in refrigeration systems. Finally, the actual reduction in energy consumption after refurbishment and payback periods for heat recovery units was shown.

The results showed that obsolete heat recovery units are inefficient and inferior to modern ones. After the refurbishment of a heat recovery unit, the heat recovery unit can produce almost eighty percent of the heat demand of building.

Keywords: heat recovery, waste heat, carbon dioxide, CO<sub>2</sub>, refrigeration system, renewable energy

## Esipuhe

Fysiikan lämpöopin ensimmäisen pääsäännön mukaan energia on häviämätöntä. Tämä on yksi fysiikan perustotuksista. Tämä periaate vaikuttaa jääneen taka-alalle kohteiden suunnittelussa. Rakennusten jäähdytysjärjestelmät sekä kaupankiinteistöjen kylmäjärjestelmät työntävät merkittävän osan lauhdelämmöstään suoraan taivaalle. Samanaikaisesti kiinteistöä lämmitetään ostoenergialla, esimerkiksi kaukolämmöllä. Ostettua energiaa puhalletaan siis taivaan tuuliin ja samaan aikaan ostetaan uutta energiaa tilalle. Tämä kuulostaa aivan yhtä järjettömältä, kuin hölmöläisten peiton jatkaminen. Silti näin on aina tehty. Se ei kuitenkaan tarkoita sitä, etteikö asioita voisi tehdä paremmin.

Suomessa on tällä hetkellä noin 2 800 päivittäistavarakauppaa [1, s. 6]. Elintarvikemyymälöiden kylmäjärjestelmien lauhde-energian kokonaismäärän on arvioitu olevan 1 300 gigawattituntia vuodessa. Tästä hyödyntämätöntä potentiaalia on noin 700 GWh [2]. Jos tuo hukkalämpö saataisiin hyödynnettyä esimerkiksi kaukolämmön tuotannossa niin hukkalämmön osuus vuotuisesta kaukolämmön tuotannosta nousisi, yhdeksällä prosenttiyksiköllä, 19 prosenttiin. Muutos vastaisi puolta siitä kaukolämpöenergian määrästä, joka tuotettiin vuonna 2019 kivihiilellä [3]. Aivan pienestä energiamäärästä ei siis ole kysymys.

Jos lasketaan lauhdelämmön arvo, käyttämällä konservatiivista (50 €/MWh) arviota hyödyntämättömän lauhdelämmön arvoksi tulee vuositasolla noin 35 miljoonaa euroa [2]. Kaukolämmön keskihinta on kuitenkin Suomessa lähempänä 80 €/a/MWh, joten paljon suurempikin arvio hukkalämmön arvosta olisi perusteltu [3, s. 14].

Kaupparyhmän (S-ryhmän) markkinaosuus oli vuosina 2018–2019 hieman yli 46 prosenttia Suomen päivittäistavarakaupasta [1; 4], joten Kaupparyhmän hyödyntämättömän lauhdelämmön potentiaali on vuositasolla noin 16 000 000 euroa! Hyödyntämällä hukkalämpöä rakennusten lämmityksessä nykyistä suuremmassa määrin voitaisiin säästää vuositasolla 16 miljoonaa euroa.

## Sisällys

1	Johdanto	1
2	Opinnäytetyön tutkimuksesta ja tutkimusmenetelmistä	2
2.1	Opinnäytetyön rajaukset	2
2.2	Tutkimusmenetelmät	3
2.3	Tutkimuskohteet	4
2.4	Tutkimustavoitteet ja tutkimuskysymykset	4
2.5	Tutkimusongelmat	5
2.6	Tutkimuksen toteutus	6
3	Kylmäkoneistotyypit	7
3.1	Johdanto	7
3.2	Liuoslauhdutteiset koneikot (R404A/R407A)	8
3.2.1	Yleistä	8
3.2.2	Energiatehokkuus	9
3.3	Hiilidioksidikoneistot	9
3.3.1	Yleistä	9
3.3.2	Energiatehokkuus	14
3.4	Waterloop – liuoslauhdutteinen propaanikoneikko (R290)	14
3.4.1	Yleistä	14
3.4.2	Propaanilaitoksen energiatehokkuus	15
4	Lauhdelämmön hyödyntämisperiaatteet	15
4.1	Tapojen määrittely	15
4.2	Paineenkorotus	16
4.3	Lauhdelämpöpumppu	19
4.4	Paineenkorotus sekä lauhdelämpöpumppu	20
4.5	Maalämpö ja lauhdelämpöpumppu	21
4.6	Yhdistetty lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmä	24
5	Alijäähdytys CO <sub>2</sub> -kylmälaitoksessa	25
6	Lauhdelämmön talteenoton kytkentäperiaatteet	30
6.1	Yleistä	30
6.1.1	Paineenkorotus	30
6.1.2	Tulistuslämmön poistovaihdin	31

6.1.3	Alijäähdytin	31
6.1.4	Kaksi lämmönvaihdinta	32
6.2	Lauhdelämpökytkennät lämmitysverkostoissa	35
6.2.1	Ilmanvaihdon lämmitys	35
6.2.2	Ulkoalueiden sulatus	36
6.2.3	Rakennuksen lämmitys	37
6.2.4	Käyttöveden lämmitys	38
7	Tulistuslämmön poistosiirtimen mitoitus	38
8	Kohteiden esittely ja energiankulutustiedot	40
8.1	Hypermarket, liuoslauhdutteinen kylmäjärjestelmä ja lämpöpumppu	40
8.1.1	Esimerkkikohteen energiakulutus	41
8.1.2	Energian jakautuminen	44
8.1.3	Yhteenveto	47
8.2	Supermarket, CO <sub>2</sub> -kylmäjärjestelmä ja lämpöpumppu	48
8.2.1	Energiankulutus	49
8.2.2	Energian kulutuksen jakautuminen	51
8.2.3	Yhteenveto	51
8.3	Supermarket, CO <sub>2</sub> -kylmäjärjestelmä lämpöpumppu ja alijäähdytys	52
8.3.1	Kohteen energiakulutus	54
8.3.2	Energian kulutuksen jakautuminen	60
8.3.3	Yhteenveto	62
8.4	Supermarket CO <sub>2</sub> -kylmäjärjestelmä ja paineenkorotus	63
8.4.1	Kohteen energiakulutus	64
8.4.2	Energian jakautuminen	66
8.4.3	Yhteenveto	68
8.5	Supermarket, CO <sub>2</sub> -kylmäjärjestelmä ja paineenkorotus	68
8.5.1	Kohteen energiakulutus	70
8.5.2	Energiankulutuksen jakautuminen	72
8.5.3	Yhteenveto	74
9	Lopputulokset	75
10	Päätelmät	78
10.1	Paras tapa toteuttaa lauhdelämmön talteenotto	78
10.1.1	Lämpöpumppu ja paineenkorotus	79
10.1.2	Paineenkorotus	80

10.1.3 Alijäähdytys	80
10.2 Kuinka suuri osa lauhdelämmöstä voidaan hyödyntää?	81
10.3 Paljonko ostoenergiankulutusta voidaan pienentää?	82
10.4 Millä kylmlaitoksella on kokonaistaloudellisesti paras lauhdelämpöpotentiaali?	83
10.5 Mitä tutkitaan seuraavaksi?	84
Lähteet	85

## **Määritelmät**

### **Hukkalämpö**

Hukkalämpö on, jonkin prosessin sivutuotteena väistämättä syntyvää ylijäämälämpöä, joka katoaisi käyttämättömänä ympäristöön, jos ei sitä hyödynnettäisi mihinkään. [5, s. 25; 6, s. 21].

### **Hybridilämmitysjärjestelmä**

Hybridilämmitysjärjestelmällä tarkoitetaan kahden tai useamman lämmitysmuodon vuorottelua esimerkiksi ulkolämpötilasta riippuen.

### **Kaskadilaitos**

Kaskadilaitoksessa on kaksi erillistä, sarjaan kytkettyä, eri lämpötilatasoilla toimivaa, kompressorikoneistoa.

### **Hinnat**

Lopputyössä esitetyt urakoiden budjettihinnat ovat arvonlisäverottomia hintoja.

### **Takaismaksuajat**

Takaisinmaksuajat ovat suoria takaisinmaksuaikoja, joissa arvioitu budjettihinta on jaettu saavutetuilla energiansäästöillä.

# 1 Johdanto

Hukkalämmön suuri osuus ja vähäinen käyttöase on todettu yhtenä nykyisen energian käytön ongelmana lämmitysenergian tuotannossa. [7, s. 9]. Tähän asiaan on puututtu ja siihen vaaditaan korjausta EU-tasolla. Euroopan parlamentti ja Euroopan neuvosto ovat ottaneet kantaa asiaan ja vaativat hukkalämmön nykyistä tehokkaampaa hyötykäyttöä sekä energiatehokkuusdirektiivissä (EED) [8] että uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian käytön direktiiveissä (REDII) [6]. Direktiiveistä EED ja REDII välitty Euroopan Unionin selkeä tahtotila, hukkalämmön selvästi nykyistä tehokkaampaan hyödyntämiseen [5, s. 25].

Tässä lopputyössä keskitytään tarkastelemaan hukkalämmön nykyistä tehokkaampaan hyödyntämistä kiinteistön lämmityksessä. Aiheen valinta on lähtenyt omasta kiinnostuksesta energiatehokkuutta sekä uusiutuvan energian käytön lisäämistä kohtaan. Viimeiset viisi vuotta, jotka olen työskennellyt SOK Kiinteistöissä lauhdelämmön hyödyntämisen parissa, ovat olleet erittäin opettavaisia sekä mielenkiintoisia.

Perinteisesti kylmälaitosten suunnittelu sekä niiden käyttö on tapahtunut, erittäin suuressa määrin, kylmäprosessin ehdoilla. Tämä tarkoittaa sitä, että kylmäjärjestelmän energiakulutusta ja hyötysuhdetta on tarkasteltu erillään kiinteistön kokonaisenergiakulutuksesta. Näin ollen lämpö- ja kylmäprosessia sekä lauhdelämmön hyödyntämistä ei ole optimoitu yhdeksi kokonaisuudeksi, jossa otettaisiin huomioon kokonaistaloudellisuus. Sen sijaan ollaan keskitytty liikaa kylmälaitoksen hyötysuhteeseen. Tämä osaoptimointi on johtanut siihen, että kylmälaitoksien lauhdelämpöä ei ole hyödynnetty rakennuksien lämmityksessä parhaalla mahdollisella tavalla. Kiinteistön energiatehokkuutta voidaankin merkittävästi parantaa lauhdelämmön hyödyntämisen tehostamisella.

Kiinteistöjen kokonaisenergiatehokkuuden parantamiseen onkin viime vuosina herätty ensin elintarviketeollisuudessa ja sen jälkeen myös päivittäistavarakaup-

pojen toiminnassa. Lauhdelämmön paremmalla hyödyntämisellä toimijat tavoittelevat alempien käyttökustannusten avulla kilpailuetua sekä ympäristöystävällisyyttä. Lauhdelämmön tehokkaampi hyödyntäminen on kustannustehokasta, koska kylmäkoneikossa syntyvää hukkalämpöä voidaan pitää lähes ilmaisena energiana. [9, s. 3 – 4; 10, s. 24 ja 11 s. 33].

## 2 Opinnäytetyön tutkimuksesta ja tutkimusmenetelmistä

### 2.1 Opinnäytetyön rajaukset

Vaikka kyseessä on ylemmän ammattikorkeakoulun opinnäytetyö pyritään asiat kertomaan kansanomaisesti ja käyttämään mahdollisimman vähän teknistä sanastoa ja lyhenteitä. Koska kyseessä on ylemmän ammattikorkeakoulun opinnäytetyö perusoletuksena on, että lukija hallitsee sekä LVI- että kylmätekniiikan perusteet. Työssä ei siis keskitytä toistamaan perusteoriaa, jonka hallintaa työssä tutkittavien asioiden ymmärtäminen vaatii. Mikäli työssä käsitellyt asiat eivät aukea lukijalle tarpeeksi hyvin niin alle on listattu muutamia lähteitä, joihin tutustumalla saa omaa tietopohjaa nopeasti laajennettua:

Kylmätekniiikka:

- Kylmäaineet ja niiden historia [12]
- F-kaasuasetus [12]
- Kylmätekniiikan perusteet [10]
- Kompessorit [13, s. 17 – 20]
- Ylikriittinen kylmäprosessi [14, s. 12; 12, s. 54 ja 15, s. 10]
- Hiilidioksidikylmälaitoksen (CO<sub>2</sub>, R744) toimintaperiaate [16; 14; 17; 18]
- Hiilidioksidijärjestelmä booster-kytkennällä [14, s. 17; 12, s. 28; 19, s. 5 ja 15, s. 11]
- Maalämmön hyödyntäminen lauhdelämmön talteenotossa [17; 20; 21 ja 11]

Työssä esitellään muutamien yleisimmin käytössä olevien kylmäjärjestelmien lauhdelämmön talteenoton toteutustavat ja pyritään löytämään lauhdelämmön talteenottojärjestelmän toteuttamista varten parhaat käytännöt. Työn pääpaino on hiilidioksidia kylmäaineena käyttävissä kylmäkoneistoissa. Tähän rajaukseen on päädytty sen takia, että valtaosa, noin 65 %:ia, viimeisen viiden vuoden aikana toteutetuista kaupan kylmäjärjestelmistä on hiilidioksidikoneistoja [22, s. 35].

Lisäksi viime aikoina lauhdelämmön talteenotossa on aloitettu hyödyntämään alijäähdytystä. Alijäähdytyksen käyttäminen lauhdelämmön talteenotossa vaikuttaa jakavan alan asiantuntijoiden mielipiteet kahteen koulukuntaan, joilla on keskenään eriävä näkemys siitä parantaako alijäähdytyksen käyttäminen järjestelmän kokonaisyötysuhdetta vai ei. Kysymys onkin mielenkiintoinen, eikä siihen ole löytynyt valmista vastausta. Lopputyössä pyritään löytämään vastaus myös tähän asiaan. Tästä syystä alijäähdytyksen roolia lauhdelämmön talteenottotapoja tarkasteltaessa käsitellään laajasti luvussa 5.

## 2.2 Tutkimusmenetelmät

Tutkimusmenetelmänä käytetään tapaustutkimusta, jossa tutkitaan lauhdelämmön hyödyntämisen ilmiökokonaisuutta tutustumalla valittuihin todellisiin kohde-toteutuksiin. Luonteeltaan työssä käytettävä tutkimustapa on toteava. Työssä kuvaillaan tutkittavien kohteiden lauhdelämmön talteenoton toteutustapa, arvioidaan lauhdelämmön talteenoton hyötysuhde, hyödyksi saadun kokonaislauhde-energian määrä sekä lauhde-energian suhde kiinteistön kokonaislämmitysenergiaan. Samalla pyritään tekemään uusia havaintoja ja kuvailemaan löydökset mahdollisimman kattavasti [23].

Tarkoituksena on laajentaa ja tarkentaa aiempaa teoriapohjaa lauhdelämmön talteenotosta. Tiedon keruutapana käytetään pääasiallisesti S-ryhmän kohteiden energiankulutustietoja, jotka saadaan raportoitua järjestelmästä energianhallintajärjestelmästä tuntitasolla. Osassa kohteista on käytössä myös laajat energian-

kulutuksen alamittaukset, joiden avulla on mahdollista vertailla vaikkapa kylmäkoneikon sähköenergian tai kiinteistön lämmityksessä hyödynnettävän lauhdeenergian määrää tuntitasolla.

## 2.3 Tutkimuskohteet

Työssä tutkitaan, vertaillaan ja analysoidaan viittä viimeisen kolmen vuoden aikana toteutettua saneerauskohdetta, joissa on tehty parannuksia lauhdelämmön talteenottojärjestelmään. Tarkasteltavien kohteiden määrä rajattiin viiteen, jotta työmäärä saadaan pysymään kohtuullisena.

Yksi kohteista on hypermarket. Lisäksi tutkitaan kahta suurempaa ja kahta pienempää supermarketia. Suurella supermarketilla tarkoitetaan pinta-alaltaan yli 3 000 neliömetrin rakennusta. Kohteet on valittu sillä perusteella, että niistä on saatavissa tarpeeksi kattavat energian kulutustiedot sekä ennen ja jälkeen lauhdelämmön talteenottojärjestelmän saneerauksen.

Hypermarketissa on vanha liuoslauhdutteinen kylmälaitos. Yhdessä suuressa ja yhdessä pienessä supermarketissa lauhdelämmön talteenottojärjestelmän saneeraus tehtiin olemassa olevaan hiilidioksidikylmäkoneistoon. Lisäksi yhdessä suuressa ja yhdessä pienessä supermarketissa vanha kylmäkoneisto uusittiin ja vanha Kryotherm purettiin lauhdelämmön talteenottojärjestelmän saneerauksen yhteydessä.

Kohteiden arviointi halutaan toteuttaa mahdollisimman objektiivisesti, joten eri kohteiden toteutuksien teknisten ratkaisujen valintaperusteita käytiin tarkemmin läpi rakennuttajan, kylmäurakoitsijan sekä kylmä- ja LVI-järjestelmän suunnittelijoiden kanssa.

## 2.4 Tutkimustavoitteet ja tutkimuskysymykset

Opinnäytetyön tavoitteena on selvittää mikä on paras käytäntö lauhdelämmön hyödyntämiseksi. Tämä on tärkeää, koska lauhdelämmön hyödyntäminen on

oleellinen osa Kaupparyhmän (S-ryhmän) keinovalikoimaa, jolla varmistetaan hiilinegatiivisuustavoitteen saavuttaminen vuonna 2025 [24]. Hiilinegatiivisuustavoite ohjaa siis osaltaan opinnäytetyön tekemistä.

Lisäksi tavoitteena on arvioida valittujen myymälöiden lauhdelämmön kokonaismäärä sekä vertailla kohteiden energian kulutustietoja ennen ja jälkeen saneerauksen. Lisäksi tavoitteena on selvittää kylmäjärjestelmän sähkönkulutuksen ja vuosihyötysuhteen avulla ja kuinka suuri osa syntyneestä lauhdelämmöstä saadaan hyödynnettyä. Samalla selviää myös kesäaikana syntyvän, mutta hyödyntämättä jäävän lauhdelämmön osuus.

Edelleen tavoitteena on selvittää lauhdelämmön osuus kiinteistön kokonaisenergiankulutuksesta, tarkastelemalla hyödyksi saadun lauhdelämmön ja ostoenergian suhdetta.

Toisaalta opinnäytetyössä halutaan selvittää myös, miten hyödynnetty lauhdelämpö jakautuu eri lämmitysverkostojen kesken niissä myymälöissä, joissa energiankäytön seurantaan varten on olemassa verkostokohtaiset alamittaukset.

Alla vielä listattuna tutkimuskysymykset, joihin opinnäytetyössä etsitään vastaukset:

1. Mikä on paras tapa toteuttaa lauhdelämmön talteenotto?
2. Kuinka suuri osa lauhdelämmöstä on mahdollistaa hyödyntää?
3. Kuinka paljon ostoenergiankulutusta voidaan lauhdelämmön avulla pienentää?
4. Millä kylmäjärjestelmällä saadaan suurin hyöty lauhdelämmön hyödyntämistä ajatellen?

## 2.5 Tutkimusongelmat

On syytä nostaa esille, että kiinteistöjen välisiin eroihin ostoenergian kulutuksessa sekä hyödyksi saatavan lauhdelämmön määrässä, vaikuttavat käytössä

olevan kylmäjärjestelmän teknisten yksityiskohtien ja lauhdelämmön talteenotto-ratkaisujen eroavaisuuksien lisäksi kohdekohtaiset erityispiirteet, kuten rakennuksen rakentamisvuosi, lämmönjakotapa, sekä lämmitysverkostojen toimintalämpötilat, muutamia mainitakseni. Kaikista kohteista ei ole saatavilla yksityiskohtaisia energiankulutuksen alamittaustietoja. Tämän takia kaikkien kiinteistöjen energiankulutuksesta ei saada yhtä tarkkaa ja yksityiskohtaista tietoa, eivätkä kulutustiedot ole keskenään täysin vertailukelpoisia.

Lisäksi on syytä pitää mielessä, että sama ratkaisu ei sovi kaikkiin kiinteistöihin. Siten kohteiden erityispiirteet vaikuttavat valitun lauhdelämmön talteenotonjärjestelmän toteutukseen. Näiden syiden takia luvussa 9 esitettyjä lopputuloksia ja luvussa kymmenen esitettyjä johtopäätöksiä ei voida pitää yleispätevinä totuuksina vaan pikemmin suosituksina siitä, mitä seikkoja erilaisissa kohteissa on hyvä ottaa huomioon, kun halutaan rakentaa mahdollisimman tehokas lauhdelämmön talteenottojärjestelmä.

## 2.6 Tutkimuksen toteutus

Vaikka olen työskennellyt viimeiset viisi vuotta tiiviisti lauhdelämmön talteenotto-ratkaisuiden parissa ja vaikka pidän tietämystäni näistä ratkaisuista jokseenkin kattavana, on tämä aihekokonaisuus erittäin laaja ja monitahoinen. Monet aiheeseen liittyvät asiat eivät ole ydinosaamisalueellani. Tämän takia koin välttämättömäksi laajentaa tietopohjaani. Siten ennen varsinaisen kirjoitustyön aloittamista käytin paljon aikaa siihen, että syvennyin alan kirjallisuuteen ja siihen, mitä tähän mennessä on tutkittu.

Kaupan kiinteistöjen ja kylmälaitoksien energiatehokkuutta sekä lauhdelämmön talteenottoa on tutkittu hyvinkin kattavasti. Varsin hiilidioksidikylmälaitoksen toimintaan liittyvää aineistoa löytyi erittäin paljon. Erilaisia opinnäytetöitä, tieteellisiä tutkimuksia sekä muita alan julkaisuja tuli luettua kolmen viikon aikana noin sata. Lopullisessa lähdeaineistossa keskityttiin uudempiin ja merkittävimpiin julkaisuihin.

Tämän jälkeen valittiin vertailtavat kohteet ja poimittiin niiden energian kulutustiedot Enerkey-energianhallintajärjestelmästä. Valittujen kohteiden energiankulutustiedot saatiin järjestelmä pääsääntöisesti vuodesta 2017 eteenpäin. Lisäksi alamittarikohtaisia energiankulutustietoja saatiin kohteesta riippuen joko Schneiderin tai Fidelixin rakennusautomaatiojärjestelmistä.

Kaikkiin kohteisiin on tehty kylmäjärjestelmän ja/tai lauhdelämmön talteenottojärjestelmän uusiminen tarkastelujakson aikana, joten tutkimuksessa päästiin vertailemaan kiinteistön ostoenergian kulutustietoja ennen ja jälkeen lauhdelämmön talteenottojärjestelmien uudistamista. Näin kohteiden ostoenergian kulutustietoja sekä erilaisten toteutusten paremmuutta pystyttiin vertailemaan keskenään. Lopputulokset on esitetty luvussa 9.

### **3 Kylmäkoneistotyypit**

#### **3.1 Johdanto**

Tässä luvussa käydään karkealla tasolla läpi kohteissa käytettyjä kylmäkoneistotyyppejä sekä niiden erityispiirteitä.

Perinteisillä kylmäjärjestelmillä tarkoitetaan tässä lopputyössä fluorihilivetyä (HFC) kylmäaineenaan käyttäviä kylmäkoneistoja. Koneistot ovat tyypillisesti liuoslauhdutteisia ja niitä on käytetty sekä super- että hypermarket-kokoluokassa.

Esimerkkinä tällaisesta kylmäaineesta on R404A. Tämän kylmäaineen käyttö uudiskohteissa on kielletty vuonna 2020 [25, s. 7], joten uusia laitoksia ei enää rakenneta ja vielä käytössä olevien laitosten kylmäaineet on pääasiassa korvattu kylmälaitossaneerauksien yhteydessä ympäristöystävällisemällä kylmäaineella, kuten 407A:lla.

Uuden sukupolven kylmäjärjestelmillä tarkoitetaan tässä lopputyössä nykyisin rakennettavia kylmäjärjestelmiä. Yleisimpiä nykyään rakennettavista kylmäjärjestelmistä ovat luonnollisilla kylmäaineilla, kuten hiilidioksidilla (R744) tai propanilla (R290), toimivat kylmäkoneistot.

## 3.2 Liuoslauhdutteiset koneikot (R404A/R407A)

### 3.2.1 Yleistä

Kaupparyhmässä (S-ryhmä) ennen vuotta 2013 toteutetut kohteet on pääsääntöisesti toteutettu kylmäaineella R404A, joka on myöhemmin korvattu ympäristöystävällisemmällä kylmäaineella. Laitokset on toteutettu tyypillisesti liuoslauhdutteisina, joten kylmäaineen lauhdelämpö siirretään ensiksi vesiglykoliliuokseen, joka jäähdyttää lauhdelämmön ulkoilmaan.

Liuosverkostoissa on tyypillisesti suuret virtaamat. Tämä tarkoittaa myös suuria pumppauskustannuksia. Liuoslauhdutteisen järjestelmän pumppauskustannukset ovat suoralauhdutteista hiilidioksidijärjestelmää huomattavasti korkeammat. Kylmäaineen lauhtumislämpötila on tyypillisesti +40 astetta, joten liuoksen lämpötila on korkeimmillaan +36 astetta, talvella jopa vähemmän. Nesteen matala lämpötilataso rajoittaa huomattavasti lauhdelämmön hyödyntämistä perinteisessä kylmäjärjestelmässä verrattuna esimerkiksi hiilidioksidijärjestelmään. [26, s. 13].

Liuoslauhdutteisen kylmäjärjestelmän lauhdelämmön hyödyntämisessä huomioitavia asioita:

- Käytettävissä olevan lauhdelämmön lämpötilataso on matala.
- Lauhdelämpöä voidaan hyödyntää vain matalalämpöpiireissä.
- Lauhdelämmön hyödyntäminen on rajallista, vain 20 – 30 %:ia.

Kylmälaitoksen lauhtumispaineenkorotuksen korotuksen hyödyntämisen liuoslauhdutteisissa kylmäjärjestelmissä on havaittu olevan taloudellinen tapa lisätä hyödyksi saatavan lauhde-energian määrää, varsinkin, jos lauhde-energian

määrä on lähes yhtä suuri kuin kiinteistön lämmitysenergian tarve [27, s. 55 ja 28]. Lauhtumispaineen korotusta on käsitelty tarkemmin luvussa 4.2.

Lauhdelämmön matalan lämpötilatason takia lauhdelämpöä käytetään myymälöissä pääosin tuloilman esilämmitykseen, mutta lauhdelämpöä voidaan ohjata myös kiertoilmakoneen lämmityspatteriin, joka lämmittää tilassa olevaa ilmaa. Lisäksi suuremmissa myymälöissä, joissa lauhdelämpöä on enemmän saatavilla sitä käytetään ulkoalueiden tai parkkihallien ajoluiskan sulana pitämiseen. [29, s. 21.]

Lisäämällä järjestelmään lämpöpumppu on mahdollista, jopa tuplata hyödyksi saatavan lauhdelämpöenergian määrä. Kun lämpöpumppu mitoitetaan oikein, on kaikki lämmityskauden aikana syntyvä lauhdelämpö mahdollista hyödyntää rakennuksen lämmitykseen. Tarkempi tuloksia lämpöpumpun lisäämisestä liuoslauhdutteeseen kylmäjärjestelmään on esitelty luvussa 8.

### 3.2.2 Energiatehokkuus

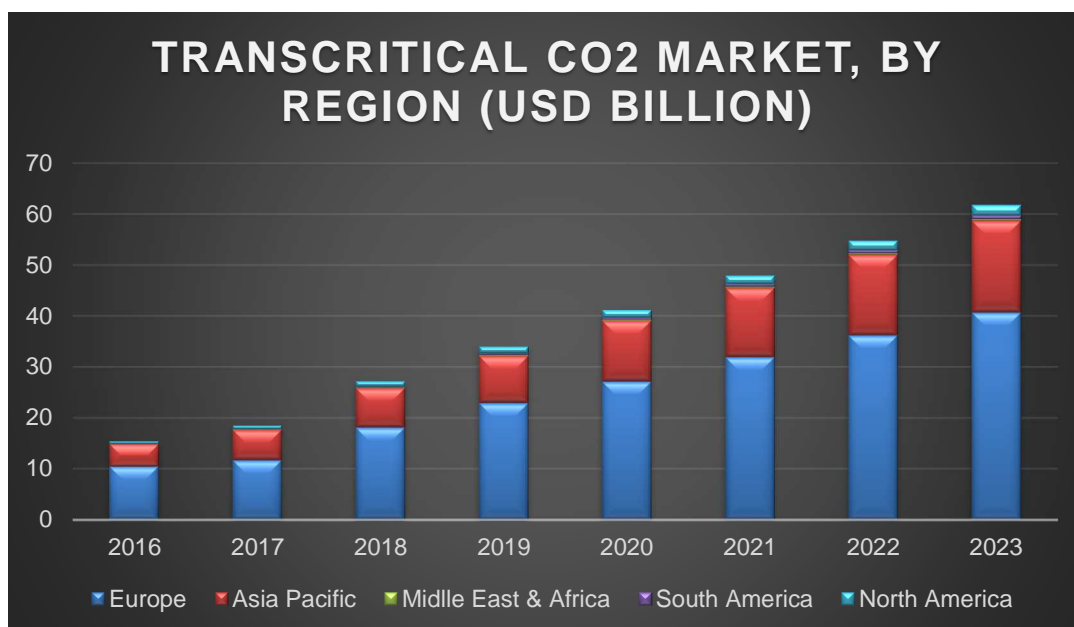
Suomessa ja Ruotsissa tehtyjen mittausten perusteella voidaan todeta, että perinteinen kylmälaitos kuluttaa vuodessa noin 17–20 prosenttia enemmän energiaa kuin uuden aikainen hiilidioksidikoneisto [30, s. 28 ja 31, s. 181]. Kun huomioidaan, että supermarketin kokonaisenergiankulutuksesta noin 30–40 % on kylmälaitteiden kuluttamaa sähköenergiaa saadaan perinteisen kylmäjärjestelmän uusimisella hiilidioksidijärjestelmäksi 5–8 prosentin vuotuinen säästö sähköenergian kulutuksessa. [32].

## 3.3 Hiilidioksidikoneistot

### 3.3.1 Yleistä

Hiilidioksidikoneistojen markkinaosuus on kasvanut voimakkaasti viimeisen viiden vuoden aikana. Voimakkainta kasvu on ollut Euroopassa, kuten kuvasta 1 selviää [33]. Vuosina 2016–2020 hiilidioksidijärjestelmien markkinaosuuden

kasvu kaupankylmässä on ollut 28 % vuodessa ja 2020-luvun loppupuolelle mentäessä markkinaosuuden on arveltu kasvavan jopa yli 30 prosentin vuosivauhtia [34]. Tämä tarkoittaa, että markkina kasvaisi vuodesta 2020 yhdeksänkertaiseksi vuoteen 2027 mennessä.



Kuva 1. Ylikriittisten hiilidioksidijärjestelmien markkinaosuus maanosittain (42, muokattu).

Jo viisi vuotta sitten suuri osa kaupan kylmäkoneistoista toteutettiin hiilidioksidilla [12, s. 23]. Kun asiaan syvennyttiin tarkemmin, saatiin selville, että viiden viime vuoden aikana luonnollisella kylmäaineella Suomessa toteutetuista järjestelmistä 65 % oli hiilidioksidikoneistoja ja 35 % oli propaanikoneistoja [1, s. 13 ja 22, s. 35]. Oletuksena on, että hiilidioksidin käyttö kaupan kylmäjärjestelmien kylmäaineena tulee jatkossa lisääntymään entisestään. Kuvassa 2 on esitetty luonnollisten kylmäaineiden osuus kaupan kylmäjärjestelmissä Suomessa.



Kuva 2. Luonnollisten kylmäaineiden markkinaosuus Suomen marketkaupassa vuonna 2020 (1, s. 13; 22, s. 35, muokattu).

Suomessa suurin osa kauppojen kylmäjärjestelmistä käyttää kylmäaineina, ei niin ympäristöystävällisiä, fluorihillivetyjä (HFC). Tarkastellaan vertailun vuoksi Euroopan suurinta osuuskauppaa Migrosia. Mirgosilla on noin 620 market-yksikköä ja osuuskauppa on vähittäiskaupassa Sveitsin markkinajohtaja [35, s. 10 ja 15]. Mirgosin kylmäjärjestelmistä 71 % käytti vuonna 2019 kylmäaineena hiilidioksidia [36, s. 7]. Suomessa kylmäkoneistojen uusimistahti on ollut huomattavasti maltillisempaa. Meillä riittää vielä tekemistä, ennen kuin pääsemme luonnollisissa kylmäaineissa yhtä suureen markkinaosuuteen kuin Sveitsissä.

Hiilidioksidikoneikkoja on vuosien saatossa tehty erilaisilla toteutustavoilla. Tällä hetkellä suoralauhdutteen booster-koneikko vakiinnuttanut asemansa. Tämä johtuu booster-koneikon paremmasta energiatehokkuudesta. [37, s. 646.]

Lähes kaikki hiilidioksidijärjestelmät Skandinaviassa tehdään ylikriittisillä, suoralauhdutteisilla booster-koneikoilla. [14, s. 16–17; 38, s. 7; 37, s. 1]. Tämä johtuu booster-koneikon paremmasta hyötysuhteesta verrattuna perinteiseen HFC-koneistoon, kun ulkona on alle 25–27 astetta [37, s. 633].

Vaikka CO<sub>2</sub>-booster-koneikot ovat Pohjois- ja Keski-Euroopan viileässä ilmastossa valtavirtaa asia muuttuu, kun siirrytään Etelä-Euroopan lämpimämpään

ilmastoon, kuten Espanjaan tai Kreikkaan. Lämpimissä maissa käytetään paljon kaskadilaitoksia, joissa kylmäaineena on esimerkiksi CO<sub>2</sub>/R134. Kaskadikytkennän suosio Etelä-Euroopassa johtuu siitä, että ensimmäiset booster-koneikot kuluttivat jopa 20 % enemmän energiaa kuin kaskadilaitokset. Vasta kolmannen sukupolven booster-koneikolla on päästy lämpimässä ilmastossa samaan energiatehokkuuteen kuin kaskadilaitoksella tai perinteisellä HFC-laitoksella. [39, s. 77; 38, s. 1.]

**Suoralauhdutteen** koneikon hukkalämpö siirtyy suoraan kylmäaineesta ulkoilmaan ja/tai lämmöntalteenottojärjestelmään, eikä erillistä liuospiiriä tarvita, kuten perinteisissä kylmäkoneistossa.

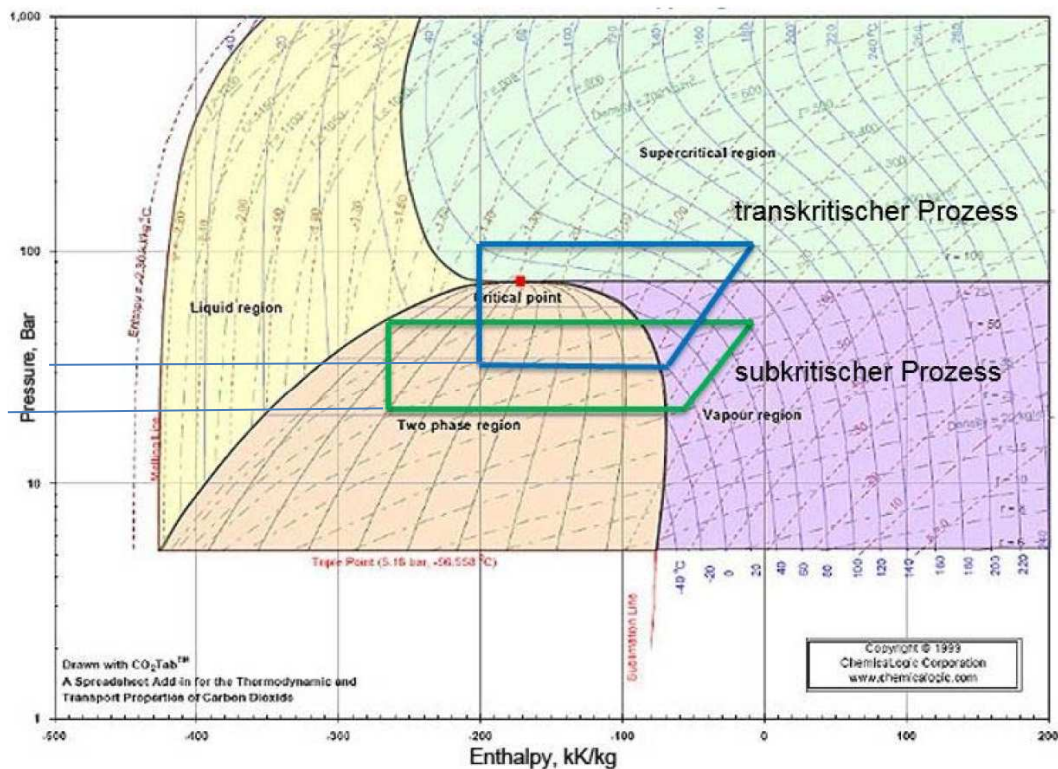
Liuoslauhdutteen järjestelmän liuospiirin putkikoot voivat olla DN150–DN250. Lisäksi liuospiiri tarvitsee pumppu- ja venttiiliryhmän. Kun käytetään suoralauhdutteista järjestelmää, riittää putkikooksi tyypillisesti DN 50–DN80, eikä erillistä venttiili- ja pumppuryhmää tarvita. Suoralauhdutteen kylmäjärjestelmä on sekä edullisempi että nopeampi rakentaa kuin liuoslauhdutteen järjestelmä.

Lisäksi suoralauhdutteisessa järjestelmässä hukkalämpö siirtyy ulkoilmaan tehokkaammin suoraan kaasusta kuin käytettäessä väliainetta. Toisin sanoen kaasunjäähdytin jäähdyttää kylmäaineen kesällä alempaan lämpötilatasoon kuin nestejäähdytin.

Booster-koneikossa yhdellä kylmäainekierrolla voidaan toteuttaa sekä pakka- että kylmäkalusteiden jäähdytys. Perinteisissä kylmäjärjestelmissä käytetään yleensä erillistä kylmäkoneistoa pakka- ja kylmäkalusteille. Siten booster-kytkennän etuina on kylmäkoneiston yksinkertaisempi rakenne ja halvemmat toteutuskustannukset.

**Ylikriittisellä** (transkriittisellä) kylmäprosessilla tarkoitetaan sitä, että jäähtyessä kylmäaine pysyy koko ajan höyrynä. Perinteisessä alikriittisessä kylmäprosessissa kylmäaine lauhtuu ja sen olomuoto muuttuu höyrystä, nesteen ja höy-

ryn seokseksi ja siitä edelleen nesteeksi. Kuvassa 3 esitetään ylikriittinen ja alikriittinen CO<sub>2</sub>-kylmäprosessi. Kesällä, kun ulkoilma on lämmintä, booster-koneikko toimii ylikriittisellä alueella ja talvella normaalisti alikriittisenä.



Kuva 3. Ylikriittinen (sininen) ja alikriittinen (vihreä) CO<sub>2</sub>-kylmäprosessi kuvattuna paine-entalpia-tilapiirroksessa [40, s. 7].

Yhteenvedona voidaan todeta, että ylikriittisen, suoralauidutteisen booster-koneikon yleistymiseen on vaikuttanut, kylmäaineen (hiilidioksidin) ympäristöstävällisyyden lisäksi kylmäkoneiston hyvä energiatehokkuus sekä booster-kytkennän liuoslauidutteisia koneistoja yksinkertaisempi rakenne.

CO<sub>2</sub>-järjestelmän eduiksi voidaan laskea myös parempi kylmäkerroin, pienemmät pumppauskustannukset [10, s. 7] sekä korkeampi kuumakaasun lämpötila kompressorin jälkeen 80–130 astetta.

### 3.3.2 Energiatehokkuus

Ensimmäisen sukupolven booster-koneistot tulivat markkinoille vuonna 2007. Niiden on osoitettu olevan Pohjois-Euroopan kylmässä ilmastossa noin 17 % energiatehokkaampia kuin perinteinen R404A-kylmäkoneisto [16, s. 38].

Toisen sukupolven koneistot, joissa on rinnakkainen puristus korkeapainepuolella, tulivat markkinoille 2011 ja niiden on arvioitu olevan Pohjois-Euroopassa, esimerkiksi Tukholmassa, noin 23 % energiatehokkaampia kuin perinteiset kylmäkoneistot [16, s. 38].

Kolmannen sukupolven booster-koneisto, jossa on rinnakkaisen puristuksen lisäksi kaasuejektorit, on noin 26 % energiatehokkaampi kuin perinteinen R404A-kylmäkoneisto [16, s. 39].

## 3.4 Waterloop – liuoslauhdutteinen propaanikoneisto (R290)

### 3.4.1 Yleistä

Waterloop-laitoksella tarkoitetaan omakoneellista kylmäjärjestelmää, jossa kaikki komponentit on integroitu samaan laitteeseen [16, s. 28]. Jokaisella kylmäkalusteella on kompressorikoneisto. Lauhdelämpö johdetaan keskitettyyn liuoskiertoiseen verkostoon, jonka avulla lauhdelämpöä voidaan hyödyntää rakennuksen lämmityksessä.

Waterloopista poiketen perinteisissä kylmälaitoksissa ja CO<sub>2</sub>-kylmälaitoksissa, käytetään keskuskoneellista järjestelmää, jossa kaikkien kylmä- ja pakkaskalusteiden kompressorikoneistot sijaitsevat kylmäkonehuoneessa.

Viime aikoina propaania kylmäaineena käyttäviä omakoneellisia waterloop-järjestelmiä on käytetty lähinnä market-kokoluokan kohteissa.

### 3.4.2 Propanilaitoksen energiatehokkuus

Omakoneellisen waterloop-järjestelmän on market kokoluokassa arvioitu kuluttavan 14 % enemmän sähköä kuin ylikriittisen booster-koneiston [12, s. 59–60].

Sveitsiläisen Osuuskauppojen Keskusliiton Migrosin energiatehokkuuspäällikön Andreas Moserin mukaan propaania käyttävä waterloop-järjestelmä kuluttaa enemmän sähköä kuin CO<sub>2</sub>-järjestelmä:

“Our best CO<sub>2</sub> installation still consumes 30% less electricity than our best water-loop system,” Moser said. [41].

Sveitsiläisten kokemusten mukaan CO<sub>2</sub>-booster-koneisto on energiatehokkaampi kuin propanikoneisto Sveitsin Suomea lämpimämmässä ilmastossa. Tämän perusteella vaikuttaa siltä, että propanikoneisto ei voi olla Suomessa-kaan hiilidioksidilaitosta energiatehokkaampi vaan Suomen viileämmästä ilmastosta johtuen ero vain kasvaisi CO<sub>2</sub>-laitoksen eduksi.

Myös Suomessa CO<sub>2</sub>-koneiston on havaittu olevan energiatehokkaampi kuin omakoneellisen waterloop-järjestelmän, erityisesti kun lämmöntalteenotto on käytössä. Pienissä marketeissa omakoneellinen waterloop-toteutus voi silti olla hyvä vaihtoehto. [12, s. i.]

## 4 Lauhdelämmön hyödyntämisperiaatteet

### 4.1 Tapojen määrittely

Lauhdelämmön hyödyntämisessä on kyse kylmäkalusteiden jäähdytysprosessissa syntyvän hukkalämmön hyödyntämisestä. Perinteisesti kylmäkoneistot on viritetty toimimaan mahdollisimman hyvällä hyötysuhteella. Tämä tarkoittaa lauhtumispaineen pitämistä mahdollisimman matalana. Näin myös lauhdelämpöä syntyy vähemmän.

Kirjallisuudessa lauhdelämmön hyödyntämistavat jaetaan yleensä suoraan lämmöntalteenottoon ja välilliseen lämmöntalteenottoon. Suorassa lämmöntalteenotossa hukkalämpö siirtyy suoraan kylmäaineesta esimerkiksi lämmitysverkostoon. Välillisessä lämmöntalteenotossa lämpö siirretään ensin väliaineeseen kuten vesiglykoliseokseen ja siitä lämpö siirretään edelleen esimerkiksi lämmitysverkostoon. [7, s. 75.]

Tässä työssä ei käytetä edellä mainittua jaottelua, koska se ei kuvaa käsiteltävää asiakokonaisuutta tarpeeksi hyvin. Nykyisin käytössä oleville lämmöntalteenotto tavoille ei ole olemassa vakiintuneita termejä. Joten lauhdelämmön hyödyntämistavat jaetaan tässä työssä kahteen ryhmään: lauhdelämmön hyödyntämiseen lämpöpumpulla ja lauhdelämmön hyödyntämiseen kylmälaitoksen lauhtumispainetta korottamalla eli lauhdelämmön hyödyntämiseen paineenkorotuksen avulla.

## 4.2 Paineenkorotus

Ilman lämpöpumpua toteutettavan lämmöntalteenoton ongelmana on, erityisesti liuoslauhdutteisissa järjestelmissä, lauhdelämmön matala lämpötilataso [42, s. 59]. Tämän takia lauhdelämpöä ei pystytä hyödyntämään kovin tehokkaasti, koska lämmitysjärjestelmän menoveden lämpötila on, suuren osan lämmityskaudesta, korkeampi kuin käytettävissä olevan lauhdelämmön lämpötilataso.

Liuoksen lämpötilatasoa on mahdollista nostaa lisäämällä kylmäkompressorin tehoa. Tehon korotus nostaa kylmälaitoksen lauhtumispainetta, joten sekä kylmäkoneikon kompressorin sähkön kulutus että hyödyksi saatavan lauhdelämmön määrä kasvavat.

Jos ajatellaan pelkästään kylmälaitoksen hyötysuhdetta, voidaan tulla siihen lopputulokseen, että lauhtumispaineen korottaminen ei olisi järkevää, koska kylmälaitoksen sähkön kulutus lisääntyy. On jopa kuultu sanottavan, että paineenkorotus ”vastaisi” suoraa sähkölämmitystä.

Jos paineenkorotusta tarkastellaan kiinteistön kokonaisenergian kulutuksen kannalta, *on paineenkorotuksen käyttäminen lähes aina järkevää*. Vaikka kylmälaitoksen sähkönkulutus lisääntyy samalla kasvanut lauhde-energian määrä pienentää kiinteistön lämmitykseen tarvittavan ostoenergian määrää, *mikäli lisääntynyt lauhde-energia saadaan hyödynnettyä* rakennuksen lämmityksessä.

Paineenkorotuksen kannattavuutta voidaan tarkastella kaavojen yksi ja kaksi avulla. Toisin sanoen niin kauan, kuin kylmälaitoksen hyötysuhde on korkeampi kuin sähköenergian hinnan suhde lämpöenergian hintaan, kannattaa paineenkorotusta käyttää.

$$\frac{COP * h_{le}}{h_{se}} > 1 \quad (\text{kaava 1})$$

$$COP > \frac{h_{le}}{h_{se}} \quad (\text{kaava 2})$$

jossa

COP on kylmäkoneen hyötysuhde

$h_{se}$  on sähköenergian hinta [€/MWh]

$h_{le}$  on lämpöenergian hinta [€/MWh]

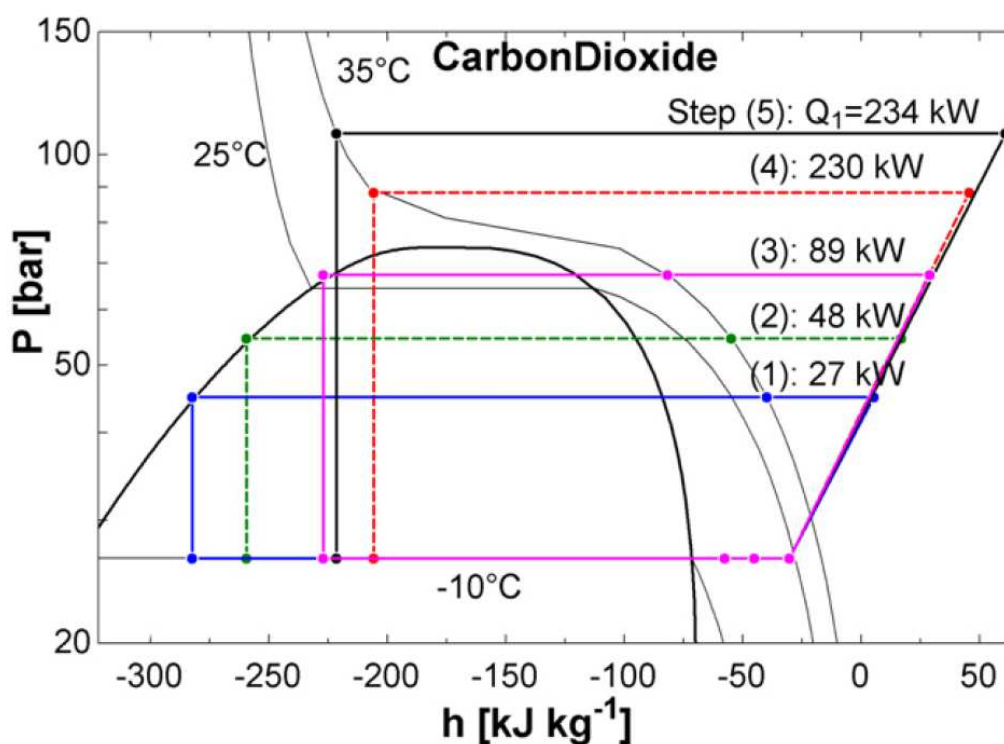
Kun ulkoilman lämpötila on +5 astetta tai sitä alempi kylmälaitoksen, hyötysuhde on liuoslauhdutteisissa keskuskoneellisissa kylmälaitoksissa  $\geq 3,5$  ja vastaavasti hiilidioksidilaitoksissa hyötysuhde on lähempänä viittä [56, s. 181]. Jos ajatellaan paineenkorotuksen laskevan liuoslauhdutteisen kylmäkoneikon hyötysuhdetta vaikka 3,5:stä 2,5:een tai hiilidioksidikoneikon hyötysuhdetta 5,0:sta 4,0:aan, Suomessa vallitsevilla kaukolämmön (75 €/MWh) ja sähköenergian (120 €/MWh) hinnoilla paineenkorotuksen käyttäminen vaikuttaa varsin järkevältä, kunhan lauhdelämpö saadaan hyödynnettyä. Kannattaa ottaa huomioon, että kaava on erittäin konservatiivinen, koska se ei huomioi kylmäkoneikon jo valmiiksi tuottamaa hyödyntämätöntä hukkalämpöä.

Paineenkorotusta käytettäessä kannattaa ottaa huomioon, että kylmäaineesta riippuen hyödyksi saatavan lauhde-energian määrä voi kasvaa merkittävästi,

koska lauhteen lämpötila kasvaa. Tämä pätee erityisen hyvin hiilidioksidikoneistoihin. Kuva 4 esittää, kuinka paljon lauhdelämpöä kylmäjärjestelmästä saadaan hyödyksi eri korkeapaineilla, kun lämmitysjärjestelmän paluuveden lämpötila on 35 astetta.

Jos tarkastellaan kuvan 4 esimerkkejä 1 ja 4 huomataan, että kylmälaitoksen lauhtumispaineen nostaminen 45 baarista 90 baariin kasvattaa hyödyksi saatavaa lauhdetehoa 27 kilowatista 230 kilowattiin toisin sanoen hyödynnettävän lauhdetehon määrä kasvaa 8,5-kertaiseksi.

Jos taas tarkastellaan kuvan 4 tapauksia 3 ja 4, huomataan, että lauhdelämpöteho kasvaa 89 kilowatista 230 kilowattiin. Samalla kylmälaitoksen hyötysuhde putoaa 3,3:sta vain 2,3:een.



Kuva 4. Hiilidioksidikylmälaitokselta hyödyksi saatava lauhdeteho tietyillä lauhtumispaineilla kuvattuna hiilidioksidin paine-entalpia-piirroksessa. [43, s 149].

Kuvasta 4 voidaan todeta, että paineenkorotuksesta on erityisesti hyötyä, kun lauhdetta hyödynnetään ilman lämpöpumppua. Kuvan 4 esimerkistä 3 huomataan, että käytettävissä olevasta kokonaislauhdetehosta menee ilman lämpöpumppua hukkaan noin 60 %.

Paineen korottamisen kanssa ollaan, ainakin aikaisemmin, oltu erittäin konservatiivisia. Tämän takia ennen paineenkorotuksen käyttöönottoa, on paineenkorotuksen yläraja käytävä läpi kylmäasiantuntijan tai kylmäsuunnittelijan kanssa.

Aikaisemmin on ajateltu, että jos kylmäkoneistoa ajetaan pitkään kovilla paineilla saattaisi tämä lyhentää kompressorin käyttöikä. Myös kompressorien rikkoontumisia tiedetään sattuneen. Rikkoontumiset vaikuttavat olevan yhteydessä öljynkierron häiriöistä johtuviin voiteluongelmiin. Erään hiilidioksidikoneikkojen valmistajan mukaan paineenkorotuksen käyttämisen vaikutus kompressorin käyttöikä on arvioitu minimaaliseksi [44]. Onhan kompressorikoneikon ylikriittinen toimintapiste aina kompressorin toiminta-alueella ja kompressorin hyötysuhde on optimoitu juuri kesätilanteeseen, kun kylmälaitosta ajetaan ylikriittisenä.

Hiilidioksidikoneiston perinteisellä paineenkorotusjärjestelmällä, jolla ei pystytä hyödyntämään alle 35 asteen lämpötilatasolla olevaa lauhde-energiaa, on arvioitu saatavan hyödyksi vain 30 % lauhde-energian kokonaismäärästä [45, s. 29].

### 4.3 Lauhdelämpöpumppu

Lämpöpumppua on mahdollista hyödyntää lauhdelämmön talteenotossa kaikissa kylmälaitoksissa. Lämpöpumpun avulla lauhdetta voidaan käyttää myös sellaisissa lämmitysverkostoissa, joissa on korkeammat toimintalämpötilat. Voidaan sanoa, että lämpöpumpun avulla lauhdelämpöä on mahdollista hyödyntää kaikissa verkostoissa.

Teollisuudessa on päästy alle kahden vuoden takaisinmaksuaikoihin lämpöpumppua hyödyntävissä lauhdelämpösovelluksissa [46, s. 22]. Tämä johtuu teollisuuden suuresta ja yhtäaikaisesta lämmitys- ja jäähdytystarpeesta. Myymälöissä takaisinmaksuaika on tyypillisesti noin viiden vuoden luokkaa, mutta myös tätä lyhyemmät takaisinmaksuajat ovat mahdollisia varsinkin suurissa kohteissa. Esimerkkikohteiden takaisinmaksuajat on esitetty luvussa 9.

Lämpöpumpun kompressori kuluttaa ostosähköä, jonka avulla hyödynnettävä lauhdelämpö nostetaan korkeampaan lämpötilatasoon. Lämpöpumpun sähkön kulutus on sitä pienempää, mitä alempi lämmitysverkoston menoveden lämpötila on [26, s. 71]. Tyypillisesti lämpöpumpun hyötysuhde (COP) vaihtelee 4–6 välillä, kohteen lämmitysverkoston toimintalämpötiloista ja jäähtymästä riippuen. Jos hyötysuhde on 6, se tarkoittaa, että yhdellä kilowatilla sähköenergiaa saadaan tuotettua kuusi kilowattia lämpöenergiaa.

Toinen lämpöpumpun hyötysuhteeseen vaikuttava tekijä on kompressorin höyrystimelle tulevan keruunesteen lämpötila. Mitä lämpimämpää keruuneste on, sitä vähemmän kompressori joutuu korottamaan keruunesteen lämpötilaa ennen kuin sitä voidaan käyttää rakennuksen lämmityksessä. Näin ollen korkeammalla keruunesteen lämpötilalla toimiessaan kompressori kuluttaa vähemmän sähköä ja sen hyötysuhde paranee.

Usein lauhdelämpöjärjestelmissä käytetään maalämpöpumppuja, joiden höyrystimet ja kompressorit on optimoitu maalämpöjärjestelmien matalia, alle 10 asteen lämpötiloja ajatellen. Näin ollen joissakin tilanteissa liian kuumana tuleva neste saattaa aiheuttaa järjestelmään toimintahäiriöitä. Tämä on hyvä ottaa huomioon lämpöpumpun valinnassa.

#### 4.4 Paineenkorotus sekä lauhdelämpöpumppu

Varsinkin suuremmissa kohteissa kuten super- ja hypermarketeissa saattaa olla järkevää käyttää sekä lämpöpumppua että paineenkorotusta. Näissä kohteissa

kylmäkoneistolta tulevasta kuumakaasusta saadaan tulistuslämmön poistosiiirtimellä talteen korkeamman lämpötilatason lauhdelämpöä, jota voidaan hyödyntää ilman lämpöpumppua. Silti suuri määrä matalan lämpötilatason lauhdelämmöstä ajetaan kaasunjäähdyttimen kautta katolle. Lämpöpumpulla myös tämä katolle ajettava hukkalämpö on mahdollista saada hyödynnettyä rakennuksen lämmityksessä.

Tulistuksen poistosiiirtimen toimintalämpötilat suunnitellaan niin, että lämpöä voidaan käyttää suoraan rakennuksen lämmitysverkostossa. Tämän jälkeen lämpöpumppu korottaa jäljelle jääneen matalamman lämpötilatason lauhdelämmön korkeampaan lämpötilatasoon.

Kokemuseräisesti sekä myös mitattujen että laskettujen tulosten perusteella, lämpöpumpun ja paineenkorotuksen yhdistelmällä on päästy parempaan lopputulokseen ja katolle ajettavan hukkalämmön määrä on saatu pienemmäksi kuin pelkällä paineenkorotuksella. Paineenkorotuksen avulla taas osa lauhdelämmöstä on mahdollista hyödyntää suoraan ilman lämpöpumppua, joten tämä osuus hukkalämmöstä saadaan talteen paremmalla hyötysuhteella kuin se osuus, jonka hyödyntämiseen tarvitaan lämpöpumppua. [15. s. 2, 28. s. 44.]

Paineenkorotuksen ja lämpöpumpun yhdistelmä sopii erityisesti suuriin uudiskohteisiin, jotka on toteutettu hiilidioksidikylmäkoneistolla. Pienissä kohteissa lämpöpumppuinvestoinnin takaisinmaksuaika venyy suuria kohteita pidemmäksi, koska kylmäjärjestelmän pienempi teho, tarkoittaa myös pienempää hyödyksi saatavaa lauhdelämpömäärää. Lisäksi hiilidioksidikoneikossa tulistuslämpötilat ovat paineenkorotusta käytettäessä huomattavasti perinteisiä liuoslauhdutteisia järjestelmiä korkeammat, joten tulistuslämmön poistosiiirtimestä saadaan suurempi hyöty.

#### 4.5 Maalämpö ja lauhdelämpöpumppu

Kun myymälän pinta-ala kasvaa yli 6 000 neliömetrin, lisääntyy myös ostoenergian kulutus. Tämä tarkoittaa sitä, että lauhdelämmön osuus kiinteistönkoko-

naisenergiankulutuksesta pienenee. Lauhdelämpöä ei siis ole tarpeeksi saatavilla, jotta sillä voitaisiin kattaa koko kiinteistön lämmitysenergian tarve. Tämän takia suuremmissa, paljon energiaa kuluttavissa marketeissa maalämpöjärjestelmän takaisinmaksuaika lyhenee. Tämä on johtanut ratkaisuihin, jossa lauhdelämmön talteenotto on yhdistetty maalämpöjärjestelmään.

Koska maalämpöjärjestelmässä on jo lämpöpumppu, voidaan tätä samaa lämpöpumppua hyödyntää lauhdelämmön talteenotossa. Lauhdelämpöä hyödynnetäessä lämpöpumpun höyrystinpuolen toimintalämpötila on 10–15 astetta korkeampi kuin perinteisessä maalämpöjärjestelmässä.

Normaalisti maalämpöpumpun hyötysuhde vaihtelee välillä 3,35–5,34 [47, s. 30-31]. Käytännössä on havaittu, että lauhdelämmön talteenoton liittämisen jälkeen lämpöpumpun hyötysuhde paranee hieman ja vaihtelee välillä 3,98–5,98 [48 ja 49].

Hyötysuhteen paranemisen lisäksi maalämmön ja lauhdelämmön yhdistämisellä samaan lämpöpumppujärjestelmään on muitakin hyviä puolia. Yksi on kesäaikaisen lauhdelämmön ajaminen maalämpökaivoihin. Asian on tutkittu jonkin verran [17, 18 ja 21], ja vaikuttaa siltä, että kesäaikainen maalämpökaivojen lataaminen parantaa maalämpökaivojen energiatasetta mahdollistaen pienempien maalämpökaivokenttien käyttämisen.

Yhdistetyssä maa ja lauhdelämpötoteutuksessa on hyvä ottaa huomioon kesäaikana maahan ladattavan lauhde-energian määrä maalämpökaivokentän mitoituksessa. Varovaisesti arvioiden kesällä kylmäjärjestelmästä saatavan lauhde-energian määrä pienentää kaivokentän mitoitusta jopa 1 500 metrillä [50]. Jos yhden kaivon syvyys on 300 metriä, tarkoittaisi kylmäjärjestelmän lauhde-energian maahan ajaminen sitä, että kaivokenttään tulisi viisi kaivoa vähemmän. Tällaiseen ratkaisuun on päädytty erityisesti kerrostalokohteissa, joissa tontin koko ei mahdollista riittävän kaivomäärän poraamista [50]. Suomessa maalämpökaivojen poraamisen kustannus on keskimäärin 32 €/m, joten on kyse kymmenien tuhan-

sien eurojen säästöistä. Voidaan siis todeta, että maalämpökohteessa energia-kaivojen lataaminen kylmälaitoksen hukkalämmöllä voi pienentää investointikustannuksia.

Kesäaikainen kaivokentän lataaminen mahdollistaa hiilidioksidikoneikon alkriittisen toiminnan kesällä. Tämä nostaa hiilidioksidikoneikon hyötysuhteen kesällä 2,5:stä 5,0:aan.

Kohteen 2 energiakulutustietoja tarkastelemalla selviää, että kylmäjärjestelmän sähkönkulutus kesäkaudella, (15.5.–15.9.) eli neljän kuukauden aikana, vastaa 40 % kylmäjärjestelmän koko vuoden sähköenergian kulutuksesta. Ajamalla kylmäkoneistoa tuona aikana paremmalla hyötysuhteella voidaan järjestelmän kesäajan sähkönkulutuksesta säästää 35 %. Vuositasolla tämä tarkoittaisi noin 15 % säästöä kylmäjärjestelmän sähkönkulutuksessa [51].

Eräästä kohteesta kerättyjen tietojen perusteella kaivojen lataaminen nostaa kaivoissa kiertävän liuoksen lämpötilaa 5 asteella. Kaivoihin ladatusta lämmöstä arviolta 40 % on käytettävissä vielä puolen vuoden päästä. [21 s. 41 – 43.]

Vaikka maalämpökaivojen liittäminen lauhdelämpöjärjestelmään vaikuttaa edellä esitettyjen seikkojen valossa erittäin houkuttelevalta, kannattaa yhdistämisessä ottaa huomioon, että jo pelkkä lauhdelämmön talteenottojärjestelmä on tekniseltä toiminnaltaan huomattavan monimutkainen verrattuna kaukolämpöjärjestelmään. Kun lauhdelämmön talteenottojärjestelmään liitetään vielä maalämpökaivot, niiden kesäaikainen lataaminen ja kylmäkoneiston alijäähdytys niin järjestelmän monimutkaisuus lisääntyy entisestään. Esimerkiksi pelkkien järjestelmän tarvitsemien lämmönsiirtimen lukumäärä voi kasvaa kahdesta helposti viiteen tai jopa seitsemään lämmön siirtimeen [20, s. 17]. Lisäksi järjestelmän asetusarvojen virittäminen niin, että järjestelmä toimii, jokaisessa käyttötilanteessa, parhaalla mahdollisella tavalla muuttuu sitä vaikeammaksi ja monitahoisemmaksi mitä monimutkaisemmaksi järjestelmä rakennetaan.

## 4.6 Yhdistetty lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmä

Perinteinen tapa pitää kohteen sisäilman olosuhteet haluttuina ympärivuoden on tehdä erilliset lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmät. Jäähdytysjärjestelmässä on monesti vapaajäähdytystoiminto, jossa jäähdytysteho saadaan talvella kylmästä ulkoilmasta. Lämmitysmuotona on monesti kaukolämpö ja sen lisäksi erillinen vedenjäähdytyskoje rakennuksen jäähdytystä varten.

Jos rakennuksessa on sellaisia tiloja, joita pitää jäähdyttää ympärivuoden kuu-  
lostaa tällaisen vapaajäähdytystä hyödyntävän järjestelmän toiminta jokseenkin hullunkuriselta, kun sitä ajattelee tarkemmin. Talvella ostetaan kaukolämpöä, jolla rakennusta lämmitetään ja samalla sitten osa tästä ostoenergiasta ajetaan taivaalle käyttämällä vapaajäähdytystä. Vähän sama kuin pitäisi talvella patte-  
reita täysillä ja ikkunoita auki samaan aikaan.

Esimerkiksi säävyöhykkeellä kaksi ulkolämpötilan pysyvyyskäyrän mukaan yli 22 asteen ulkolämpötiloja esiintyy vuodessa 183 tuntia, eli hieman yli 2 % vuoden tunneista. Yli 24 asteen lämpötiloja on vain 82 tuntia vuodessa eli alle 1 % vuoden tunneista. Jäähdytyskausi on siis suomessa todella lyhyt, joten erillisen vedenjäähdytyskojeen käyttöaste jää erittäin alhaiseksi ja samalla sen takaisinmaksuaika muodostuu kuitenkin pitkäksi.

Kun otetaan huomioon, että lämpöpumpun jäähdytysteho on vähintään  $2/3$  sen lämmitystehosta ja vedenjäähdytyskojeen lämmitysteho on 1,5-kertainen verrattuna sen jäähdytystehoon, on saman laitteen käyttäminen sekä rakennuksen lämmittämiseen että jäähdyttämiseen yleensä perusteltua, varsinkin suuremmissa kohteissa. Lämpöpumppujärjestelmän laajentamisesta jäähdytyskäyttöön aiheutuvien kustannuksien on arvioitu olevan vain  $1/3$  verrattuna erillisen jäähdytysjärjestelmän rakentamiskustannuksiin verrattuna. Sama pätee järjestelmän käyttökustannuksiin. [46. s. 18]. Näin ollen on kummallista, että yhdistettyjä lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmiä on alettu rakentaa vasta viime aikoina.

## 5 Alijäähdytys CO<sub>2</sub>-kylmälaitoksessa

Hiilidioksidilaitos toimii kesällä ylikriittisenä, eikä kylmäaine lauhdu kaasunjäädyttimessä ollenkaan. Etelä-Euroopan lämpimässä ilmastossa kylmäaineen massavirrasta keskimäärin 45 % pysyy koko ajan flas-gasina. [39, s. 66]. Suomessa vastaava osuus on 40 %. Tämä osuus kylmäaineesta ei osallistu suoraan kylmäprosessiin, koska sitä ei voida ajaa höyrystimelle vaan se syötetään suoraan kompressorin imukaasuksi ja kasvattaa kompressorin massavirtaa. Tätä kylmäprosessin lämmönsiirtoon osallistumatonta kaasua kutsutaan nimellä flash-gas. Toisen sukupolven booster-koneistoihin on lisätty oma erillinen apukompressori, jonka tarkoitus on kierrättää tuota flash-gasia. Flash-gas on yksi syy siihen, minkä takia kesällä hiilidioksidilaitoksien hyötysuhde putoaa 5,0:sta 2,6:een [31, s. 181].

Etelä-Euroopan korkeissa kesälämpötiloissa tehdyt tutkimukset osoittavat että, kun toisen sukupolven hiilidioksidikylmälaitokseen lisätään alijäähdytys, saadaan flash-gasin määrää kesällä pienennyttä 62–87 %, vaikka kylmäaine alijäädytettäisiin vain +15 asteeseen. [39, s. 74]. Suomessa +27 asteen ulkolämpötilassa flash-gasin määrää pienenee 66 prosenttia, kun kylmäaine alijäädytetään +15 asteeseen.

Myös toisessa tutkimuksessa on päädytty siihen lopputulokseen, että hiilidioksidikylmäkoneikolla saavutetaan paras vuosihyötysuhde (SCOP), kun kylmäaine alijäädytetään +15 asteeseen [52, s. 10]. Lisäksi ruotsalaisia supermarketteja tutkittaessa on havaittu, että poistamalla ylimääräinen flash-gas kylmäprosessista alijäädytyksellä saavutetaan hyötysuhteessa (COP) jopa 35 %:n paranus [37, s. 633].

Vaikuttaa siltä, että lämpöpumpulla tapahtuva koneellinen alijäähdytys parantaa tavallisen hiilidioksidikoneiston hyötysuhdetta merkittävästi ja tuo ero korostuu kesällä, kuumempiin ulkolämpötiloihin siirryttäessä.

“system with the mechanical subcooling is the most efficient choice”  
[52, s. 10].

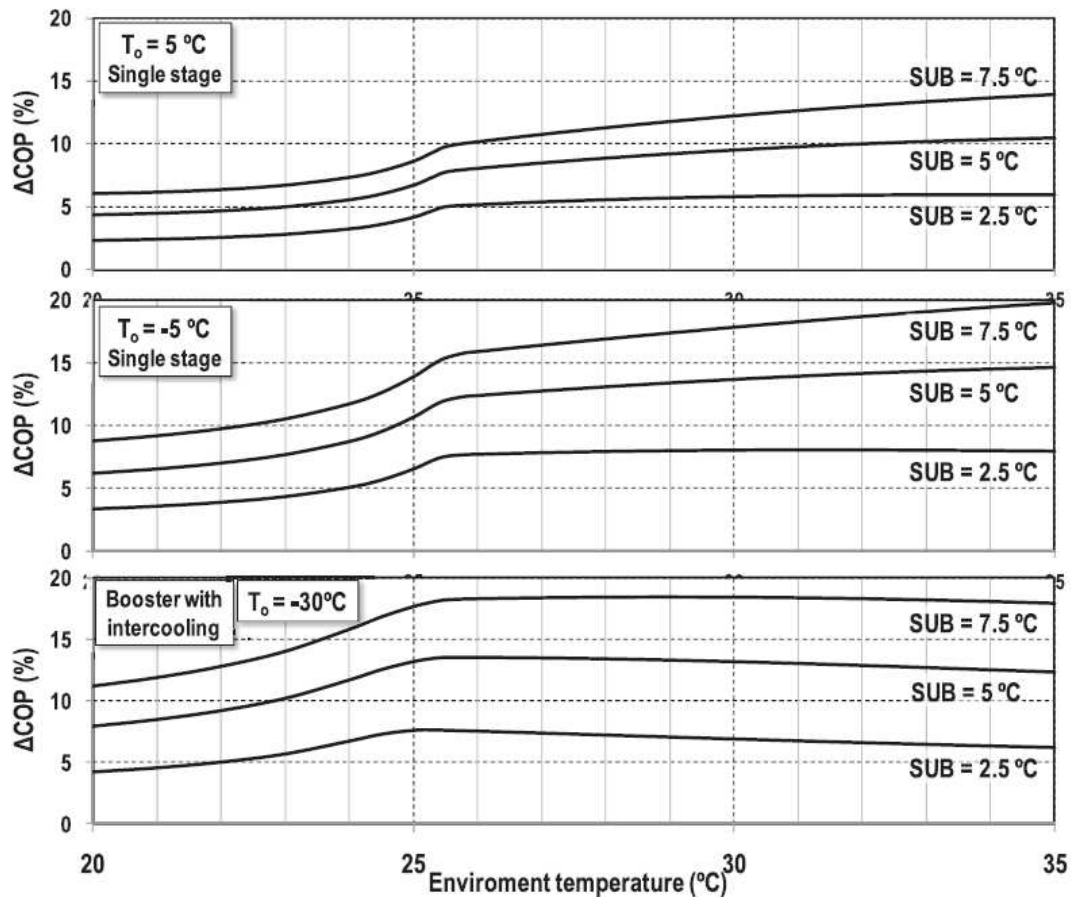
Alijähdytyksellä voidaan lisäksi saavuttaa korkeampi jäähdytysteho, koska kompressori ei pumpkaa turhaan flash-gasia. Tutkimuksen perusteella koneellisen alijähdytyksen käyttäminen siihen, että hiilidioksidilaitoista voidaan ajaa kesällä alikriittisenä vaikuttaa lupaavalta. [52, s. 11.]

Korkeammissa yli +25 asteen lämpötiloissa koneellisen alijähdytyksen on todettu parantavan kokonaishyötysuhdetta (COP) jopa 20 % sekä lisäävän koneikon jäähdytystehoa jopa 28 %. [53, s. 129]. Tämä tarkoittaa sitä, että hiilidioksidikylmälaitosten tehomitoitusta voisi olla mahdollista pienentää nykyisestä. Edellä mainituissa tutkimuksissa alijähdyttimen tuottamaan lauhde-energiaa ei hyödynnetty.

Voidaan todeta, että alijähdytyksen käyttäminen on kannattavaa aina, kun koneellista alijähdytystä tekevän lämpöpumpun hyötysuhde on korkeampi kuin kylmäjärjestelmän hyötysuhde ja lämpöpumpun kylmäaineen höyrystymislämpötila on korkeampi kuin kylmäjärjestelmän kylmäaineen höyrystymislämpötila [53, s. 131].

Nykyisten hiilidioksidikylmäjärjestelmien hyötysuhteet vaihtelevat +15...+25 asteen ulkolämpötiloissa välillä 3,3–2,0 [31, s. 181]. Alijähdytystä tekevän lämpöpumpppujärjestelmän hyötysuhde vaihtelee ulkolämpötilasta riippuen 3,5–4,2:n välillä [44]. Näin ollen alijähdytys vaikuttaisi kannattavalta ratkaisulta.

Tulee kuitenkin huomata, että alijähdytyksen vaikutus höytysuhteen paranemiseen ei ole lineaarinen vaan hyöty pienenee sitä mukaa mitä kylmemmäksi kylmäainetta alijähdytetään [53, s. 133]. Kuvassa 5 on esitetty alijähdytyksen järjestelmän kokonaishyötysuhteeseen. Koneellisen alijähdytyksen kuluttama kokonaissähköenergia on luonnollisesti huomioitu mukaan. Kuten kuvan 5 alimasta esimerkistä voidaan huomata alijähdytys parantaa kylmäjärjestelmän hyötysuhdetta 7–17 % ulkolämpötilan ollessa +25 astetta riippuen siitä, kuinka monta astetta kylmäjärjestelmän kylmäainetta alijähdytetään.

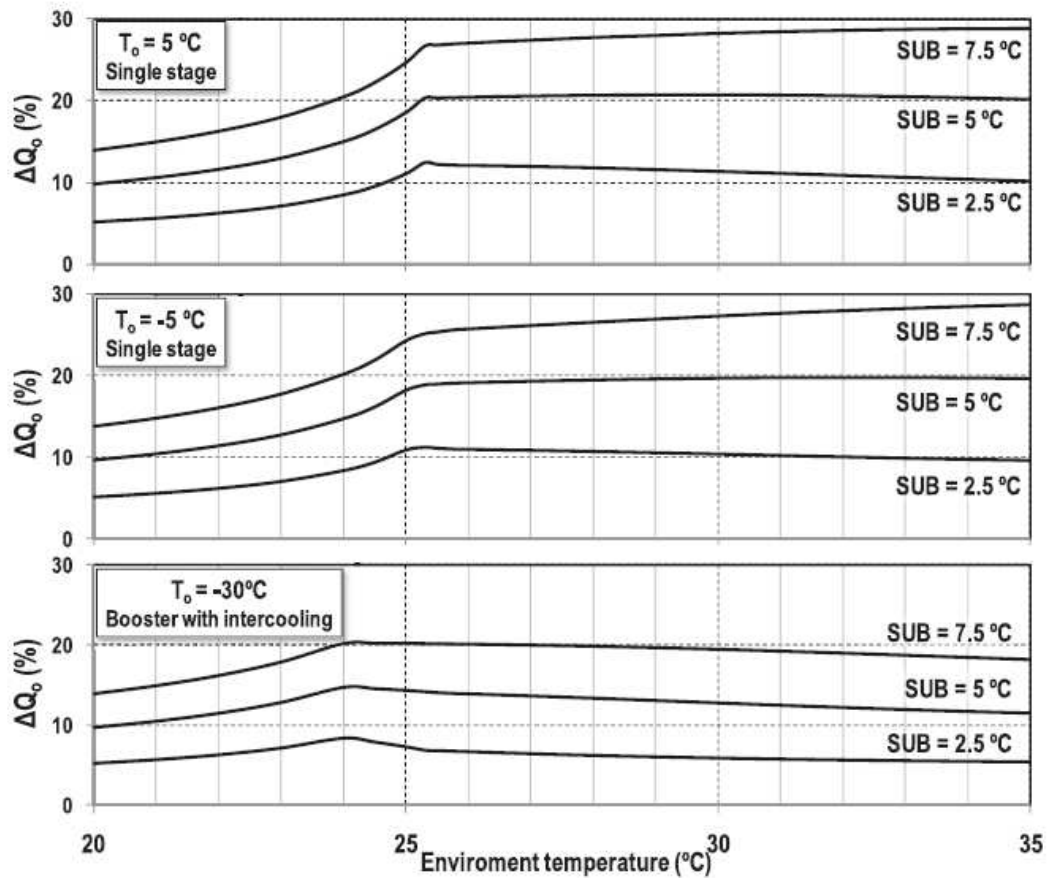


Kuva 5. Alijäähdetyksen vaikutus hiilidioksidikylmälaitoksen hyötysuhteeseen tietyissä ulkolämpötiloissa [53, s. 137].

Yli +15 asteen ulkolämpötiloja on säävyöhykkeellä kaksi vuodessa 1 111 tuntia. Tämä vastaa noin 1,5:tä kuukautta. Kylmäjärjestelmän sähköenergian kulutuksen osuus näiden 1,5 kuukauden aikana oli 17,6 % kylmäjärjestelmän koko vuoden sähköenergian kulutuksesta [54]. Näiden tuntien keskimäärinen ulkolämpötila asettuu 21 asteeseen, ulkolämpötilojen pysyvyyden kautta tarkasteltuna. Jos ajatellaan, että CO<sub>2</sub>-kylmälaitos toimisi tuon 1,5 kuukauden ajan keskimäärin 2,65:n hyötysuhteella. Kylmäaineen alijäähdytys 7,5 asteella nostaisi hyötysuhdetta 12 prosenttia eli 2,65:sta 2,97:ään. Tämä tarkoittaisi 10,7 %:n energiansäästöä puolentoista kuukauden energiankulutuksessa. Vuositasolla kylmäjärjestelmän kokonaisenergian kulutus pienenesi kuitenkin vain 1,9 %.

Alijäähdytystä käytettäessä hiilidioksidilla toimivan booster-laitoksen jäähdytys-teho kasvaa parhaimmillaan jopa 20 %, kuten kuvasta 6 voidaan havaita. Mikäli

kylmäkoneistojen tehomitoitusta voidaan tulevaisuudessa tämän takia pienentää kertautuisi kustannussäästö läpi koko hiilidioksidijärjestelmän.



Kuva 6. Alijäähdytyksen vaikutus hiilidioksidikylmälaitoksen jäähdytystehoon tiettyissä ulkolämpötiloissa [53, s. 138].

Koneellista alijäähdytystä käytettäessä lämpöpumpun kylmäaineella ei havaittu olevan merkittävää vaikutusta järjestelmän kokonaishyötysuhteen paranemiseen [53, s. 139].

Vaikka tutkimusnäytön perusteella alijäähdytys vaikuttaa lupaavalta sen soveltaminen lauhdelämmön talteenoton hyödyntämisessä jakaa mielipiteitä. Kylmäprosessin kesäaikainen alijäähdytys ei ole vielä laajalle levinnyttä. Tämä ei sinänsä ole merkillistä, koska onhan hiilidioksidikoneikkoja tutkittu jo 15 vuotta ja ne rupesivat yleistymään Suomessa vasta 5 vuotta sitten. Alijäähdytystä on tutkittu vasta viisi vuotta, joten sen yleistyminen ottaa aikansa. [37; 52, s. 1].

Toisessa tutkimuksessa havaittiin ylikriittisen booster-kylmäkoneikon kokonaisyötysuhteen paranevan 6,6 prosenttia, kun kylmäainetta alijäähdytettiin +15 asteeseen. Kun alijäähdytystä jatkettiin +15 asteesta +7 asteeseen parani kokonaisyötysuhde yhteensä 8,2 prosenttia. Siten viimeisten seitsemän asteen tuoma lisähyöty alijäähdytyksessä oli vain 1,6 %. Hyötysuhdevertailut tehtiin ulkoilman lämpötilan ollessa +28 astetta. [39, s. 75.]

Tämän perusteella vaikuttaa siltä, että käyttämällä kesällä kiinteistössä valmiina olevan lämpöpumpun tai vedenjäähdytyskojeen vapaana olevaa jäähdytystehoja kylmäjärjestelmän kylmäaineen alijäähdytykseen voidaan päästä hyvään lopputulokseen jo pienemmillä osatehoilla. Tällä hetkellä alijäähdytyslaitteistoja on mitoitettu niin, että niillä pystytään alijäähdyttämään kylmäjärjestelmän kylmäaine noin 8 asteeseen. Vaikuttaisi kuitenkin siltä että nuo viimeiset asteet eivät oleellisesti paranna järjestelmän hyötysuhdetta. Näin ollen alijäähdytykseen käytettävän laitteiston tehomitoituksen ihanteellinen mitoitusaste vaikuttaisi tulevan vastaan jo kahdeksaa astetta korkeammassa lämpötiloissa.

Kolmannessa tutkimuksessa vertailtiin erilaisia CO<sub>2</sub>-kylmälaitoksia eri höyrystymis- ja ulkoilman lämpötiloilla. Esimerkiksi 30 asteen ulkolämpötilassa ja -5 asteen höyrystymislämpötilassa alijäähdytyksellä saavutettiin 11 % parempi hyötysuhde kuin toiseksi parhaalla kylmälaitoksella, jossa hyödynnettiin kaksivaiheista puristusta. [52, s. 12.]

Alijäähdytys tekee järjestelmäkokonaisuudesta monimutkaisemman ja vaikeammin ohjattavan [39, s. 76]. Havainto on osoittautunut paikkansapitäväksi myös toteutettujen kohteiden virittämisessä. Haasteita on ollut lähinnä rakennus- ja kylmäautomaation saumattomassa yhteensovittamisessa.

## 6 Lauhdelämmön talteenoton kytkentäperiaatteet

### 6.1 Yleistä

Heti alkuun voidaan todeta, että lauhdelämmön talteenottoon ei ole olemassa yhtä vakiintunutta toteutustapaa vaan toteutustavat vaihtelevat kohteiden erityispiirteiden lisäksi alueellisesti. Myös eri suunnittelutoimistoilla on havaittu olevan toisistaan poikkeavia näkemyksiä siitä, miten lauhdelämmön talteenotto tulisi toteuttaa.

Perinteisen jaottelun mukaan lauhdelämpö jaetaan kylmäaineen tulistuslämmön poistossa, lauhdutuksessa ja alijäähdytyksessä syntyvään energiaan. Tämä jaottelu ei ole työn kanalta mielenkiintoinen. Sen sijaan merkitystä on sillä, kuinka suuri osa lauhdelämmöstä saadaan hyödynnettyä.

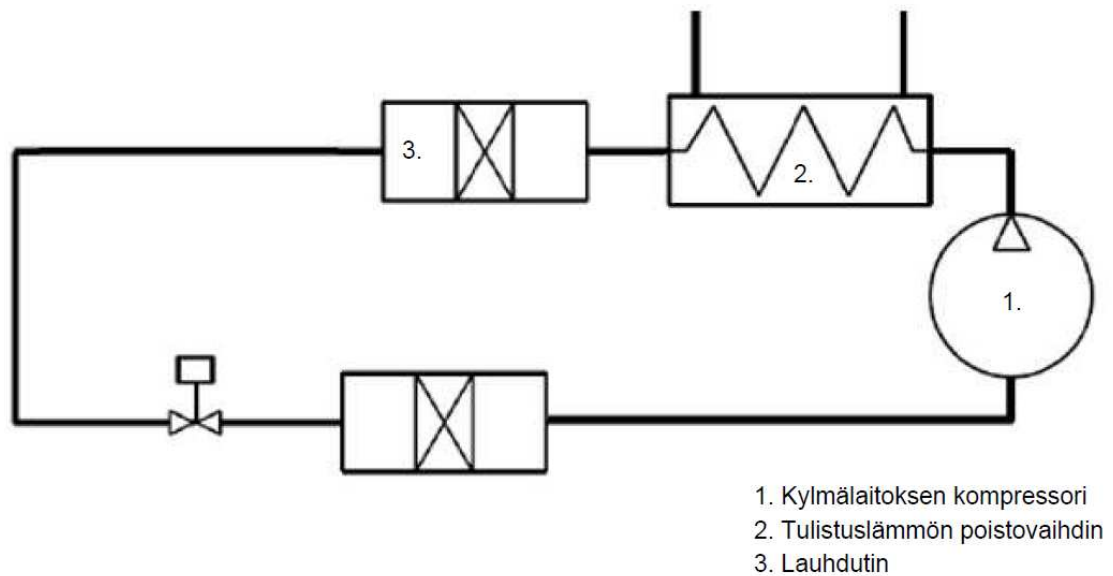
#### 6.1.1 Paineenkorotus

Perinteisesti lauhdelämpöä on käytetty ilmalämmitteisissä kiinteistöissä tuloilman esilämmittämiseen, lisäksi lauhdelämpöä on käytetty myös ulkoalueiden sulana pitämiseen. Tämä on johtunut pääasiassa siitä, että liuoslauhdutteisissa kylmäjärjestelmissä lauhteen lämpötilataso on ollut matala, vain +30...+40 astetta, joten sillä ei pystytä lämmittämään esimerkiksi ilmanvaihto- tai patteriverkostoa, koska niiden toimintalämpötilat ovat huomattavasti korkeammat, 40–60 tai 40–70 astetta. Näiden lämpötilaprofiilien epäsuhdan takia lauhdelämmöllä on pystytty perinteisesti kattamaan ainoastaan 20–30 % kiinteistön lämmitysenergian tarpeesta. Lisäksi suuri osa lauhdelämmöstä on ajettu liuosjäähdyttimellä ulkoilmaan, koska lauhdelämmön lämpötilataso on alempi kuin lämmitysverkon paluuveden lämpötila.

Seuraavissa luvuissa esitetään periaatteelliset kytkentätavat lauhdelämmön hyödyntämiseksi.

### 6.1.2 Tulistuslämmön poistovaihdin

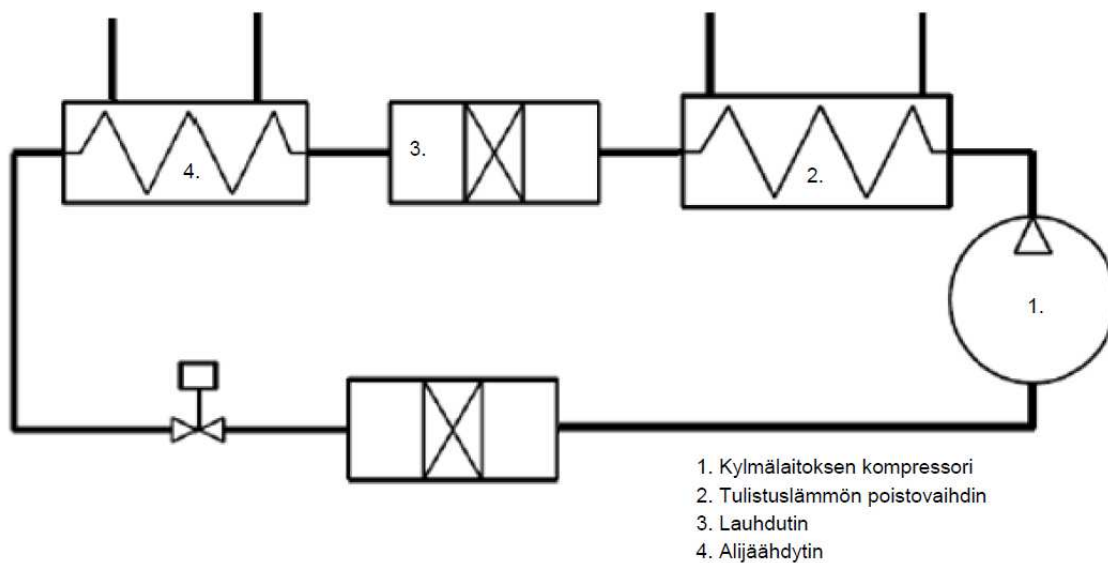
Perinteinen ratkaisu, toteuttaa lauhdelämmön talteenotto, on käyttää tulistuslämmön poistovaihdinta (kuva 7). Tulistuslämmön poistovaihdin (2.) on kylmälaitoksen kompressorin (1.) ja lauhduttimien (3.) välissä. Lämmönvaihtimella otetaan lauhdelämpö talteen. Tämän jälkeen kuuma kylmäainehöyry menee lauhduttimelle lauhtumaan.



Kuva 7. Lämmöntalteenotto tulistuslämmön poistovaihtimella.

### 6.1.3 Alijäähdytin

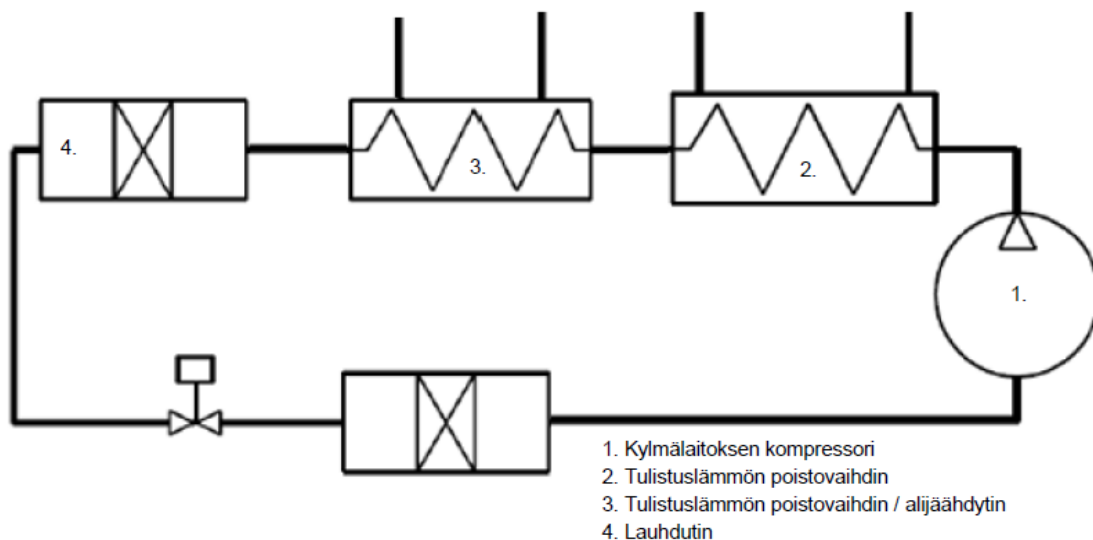
Kun kylmäaine on käynyt ulkona lauhtumassa, sen lämpötila on esimerkiksi viisi astetta ulkoilman lämpötilaa korkeampi. Näin matalan lämpötilatason lämpöä ei voida enää hyödyntää rakennuksen lämmitysverkostoissa, joten alijäähdytintä käytetään pääasiassa vain sellaisissa lämmöntalteenottojärjestelmissä, joissa on lämpöpumppu tai maalämpökyltkentä. Kuvassa 8 on esitetty lauhdelämmön talteenottokyltkentä alijäähdyttimellä.



Kuva 8. Lämmöntalteenotto tulistuksen poistovaihdin ja alijäädytin.

#### 6.1.4 Kaksi lämmönvaihdinta

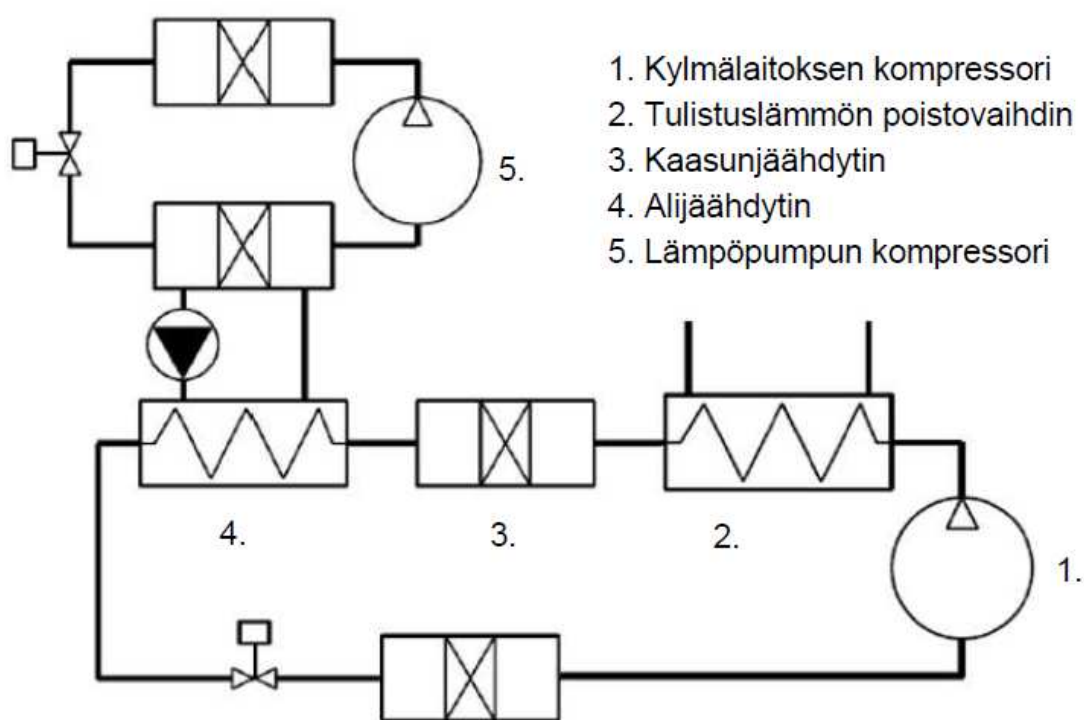
Joissain toteutuksissa kylmäkompressorin ja lauhduttimien välissä voi olla kaksi lämmönsiirintä peräkkäin. Näin kylmäjärjestelmästä saadaan talteen lauhdelämpöä kahdella eri lämpötilatasolla. Tämä kytkentä on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9. Lämmöntalteenotto kahdella peräkkäisellä tulistuksen poistovaihtimella.

Kahta tulistuslämmön poistosiirrintä saatetaan käyttää hiilidioksidikylmäjärjestelmien lauhdelämmön talteenotto-ovelluksissa, joilla tehdään lämmintä käyttövettä. Kahden siirtimen toteutuksia on myös liuoslauhdutteisissa HFC-järjestelmissä, vaikka näissä järjestelmissä kahden tulistuslämmön poistovaihtimen käyttö onkin harvinaisempaa.

Parhaaseen lopputulokseen, jolla on mahdollista saada suurin määrä lauhdelämpöä hyödynnettyä, päästään yhdistämällä tulistuslämmön poistovaihdin ja alijäähdytin samaan järjestelmään. Näin hiilidioksidikylmäkoneiston korkea tulistuslämpötila voidaan hyödyntää ilman lämpöpumppua ja matalamman lämpötilatason lauhdelämpö voidaan hyödyntää lämpöpumpun avulla [7. s. 77 ja 45, s. 40] Tämä kytkentä on esitetty kuvassa 10.



Kuva 10. Alijäähdytyskytkentä lämpöpumpulla.

Kylmälaitoksen kompressorin (1.) korkeampaan lämpötilaan puristama kylmäaine, johdetaan tulistuslämmön poistosiirtimen (2.) läpi ja siitä otetaan talteen korkeammassa lämpötilatasossa oleva lauhde-energia. Tätä energiaa hyödynnetään suoraan esimerkiksi lämmitysverkoston lämmitykseen. Lisäksi alijääh-

dyttimellä (4.) otetaan talteen alemmassa lämpötilatasossa oleva lauhde-energia, joka nostetaan lämpöpumpun kompressorilla (5.) korkeampaan lämpötilatasoon, jonka jälkeen energia hyödynnetään rakennuksen lämmitysverkostoissa.

Kuvasta 10 poiketen ennen kaasunjäähdytintä asennetaan kolmitieventtiili, jolla voidaan säätää, kuinka suuri osa kylmäaineen massavirrasta kulkee kaasunjäähdyttimen läpi. Näin talteen otettavan lämpöenergian määrä saadaan suuremmaksi talvella ohittamalla kaasunjäähdytysin kokonaan. [7. s. 77].

Lämmönsiirtimien 2 ja 4 yhteenlaskettu teho mitoitetaan esimerkiksi 70 %:iin kylmälaitoksen kesäaikaisesta huipputehon tarpeesta. Tämä tarkoittaa sitä, että kesätilanteessa osa kylmäaineesta käy jäähtymässä kaasunjäähdyttimessä.

Vaihtoehtoisesti alijäähdytys siirtimen (4.) sijainti voi olla myös ennen kaasunjäähdytintä (3.). Tämä kuitenkin tarkoittaa sitä, että kesällä alijäähdytystä ei ole mahdollista hyödyntää yhtä suurena määränä kuin kuvan 10 mukaisella kytkennällä. Tämä johtuu siitä, että kylmäaineen lämpötila alijäähdytys siirtimen jälkeen ei saa laskea ulkoilman lämpötilaa alemmaksi silloin kun kaasunjäähdytys on käytössä. Muutoin kylmäaine voi ruveta höyrystymään kaasunjäähdyttimessä aiheuttaen paineen nousemisen. Tämä voi johtaa kylmälaitoksen pysähtymiseen kylmäautomaation toimesta.

Kun hiilidioksidikylmälaitosta ajetaan kesällä alikriittisenä, toimii se huomattavasti paremmalla hyötysuhteella kuin, jos laitosta ajettaisiin ylikriittisenä. Ylikriittisen CO<sub>2</sub>-kylmälaitoksen hyötysuhde voisi olla 2.0, kun ulkoilman lämpötila on +28 astetta lämmintä. Kun kylmälaitosta ajetaan alikriittisenä voi sen hyötysuhde nousta jopa 4,5:een. Samalla kylmälaitoksen verkosta ottama sähköteho voi pudota jopa yli 50 % [55] eli saman verran kuin kompressorien flash-gasin pumppaamiseen tarvitsema energiankulutus vähenee. Tämä johtuu siitä, että flash-gasin pumppaukseen tarvittavia kompressoreja ei tarvitse käynnistää ollenkaan.

## 6.2 Lauhdelämpökytkennät lämmitysverkostoissa

Perinteisesti lauhdelämpöä on hyödynnetty vain matalilla menoveden lämpötiloilla toimivissa lämmitysverkostoissa, koska lauhdelämmön lämpötilataso on ollut liian matala, jotta sitä voitaisiin ajaa suoraan lämmitysverkostoon. Tällä tavalla hyödyksi saatavan lauhteen määrä on arvioitu oleva vain 20–30 prosenttia kokonaislämmitysenergian tarpeesta.

Uudemmissa hiilidioksidikoneistoilla toteutettujen kylmäjärjestelmien lauhdelämmön talteenotto-ovelluksissa kokonaislämmitysenergian kulutuksesta voidaan kattaa arviolta 40–80 %. Seuraavissa luvuissa käydään läpi, mihin lämmitysverkostoihin lauhdelämpöä on hyödynnetty.

### 6.2.1 Ilmanvaihdon lämmitys

Ilmanvaihdon lämmityksessä on neljä pääasiallista tapaa, joilla lauhdelämpöä hyödynnetään:

1. Tuloilman esilämmitys
2. Kiertoilman lämmitys
3. Tuloilman kuivaus
4. Koko ilmanvaihdon lämmitysverkoston lämmitys.

Tavat 1 ja 2 sopivat järjestelmiin, joissa lauhdelämmön lämpötilataso on matala. Näitä tapoja on tavanomaisesti käytetty liuoslauhdutteisten kylmäjärjestelmien lauhdelämmön talteenotossa [11, s. 14]. Tapaa 3 käytetään uudempien kylmäjärjestelmien kanssa myymälöissä, joissa on ovelliset kylmäkalusteet. Ovellinen kylmäkaluste ei kuivaa myymälän sisäilmaa yhtä tehokkaasti kuin avokaluste. Lisäksi kalusteen oven alhaisesta pintalämpötilasta johtuen oveen muodostuu kesällä helposti kastepiste, jos sisäilman absoluuttinen kosteussisältö ylittää 9 grammaa vettä kilossa kuivaa ilmaa. Tämän takia myymälöiden sisäilmaolosuhdeiden hallintaa varten tarvitaan tuloilman ilman kuivaustoiminto.

Kesällä lauhdelämpöä on paljon saatavilla eikä rakennusta tarvitse lämmittää, joten lauhdelämmölle ei ole muuta käyttökohdetta kuin ilman kuivaus. Tätä varten uudempien myymälöiden ilmastointikoneissa on monesti erillinen lauhdelämpöpatteri, jolla jäähdytetty tuloilma lämmitetään takaisin sisäänpuhalluslämpötilaan.

Neljäs tapa on hyödyntää lauhdelämpöä kiinteistön ilmanvaihdon lämmitysverkoston paluuveden lämmittämiseen. Mikäli näin tehdään, on tuloilma mahdollista lämmittää ilmanvaihtokoneen lämmityspatterilla eikä erillisiä lauhdelämpöpattereita välttämättä tarvita. Jotta koko ilmanvaihdon lämmitysverkostoa voidaan lämmittää lauhdelämmöllä tehokkaasti myös kovilla pakkasilla, pitää ilmanvaihdon lämmitysverkoston toimintalämpötilojen olla matalat esimerkiksi 30–40 astetta. Tällaisella kytkennällä on havaittu saavutettavan suurempi hyöty kuin pelkällä tuloilman esilämmityksellä. Seurattaessa ilmalämmityskohteiden energian kulutusta noin 80 prosenttia hyödyksi saadusta lauhdelämmöstä on saatu hyödynnettyä ilmanvaihdon lämmitykseen. Jakauma vastaa varsin hyvin verkostojen lämmitystehojen suhdetta.

### 6.2.2 Ulkoalueiden sulatus

Näissä verkostoissa on tyypillisesti matalammat toimintalämpötilat ja suuremmat jäähtymät kuin varsinaisissa lämmitysverkostoissa. Ulkoalueiden sulatusverkostoja on muutamissa saneerauskohteissa liitetty lämpöpumpun avulla toteutettuun lauhdelämmön talteenottojärjestelmään. Ulkoalueiden sulatusverkoston liittämisen on havaittu alentavan lämpöpumpun lauhduttimelle palaavan veden lämpötilaa muutamalla asteella ja parantavan näin lämpöpumpun hyötysuhdetta noin (COP) 0,5 yksiköllä.

### 6.2.3 Rakennuksen lämmitys

#### Lattialämmitys

Nykyään lattialämmitys on varsin yleinen lämmönjakotapa myymäläkiinteistöissä. Se onkin syrjäyttänyt perinteistä ilmalämmitystä. Lattialämmityksen matilien toimintalämpötilojen takia paineenkorotuksella toteutettu lauhdelämmön talteenottojärjestelmä sopii hyvin yhteen lattialämmityksen kanssa, eikä lämpöpumppua tarvita.

Kirjallisuudessa esitetyn arvion perusteella lattialämmitys tulee kaukolämpökoh-teissa, 15 vuoden elinkaarikustannuksia tarkasteltaessa, noin 15 % edullisem-maksi kuin ilmalämmitys [30, s. 36].

Kun huomioidaan lattialämmityksen alhaisempien toimintalämpötilojen tuoma lisähyöty lauhdelämmön hyödyntämistä ajatellen, lisää tämä entisestään lattia-lämmityksen kannattavuutta lämmönjakotavan valinnassa.

#### Ilmalämmitys

Vanhat ilmanvaihdon lämmitysverkostot on mitoitettu korkeille toimintalämpöti-loille. Jos samaan verkoston on liitetty vielä kiertoilmalämmittimiä, verkostoissa on monesti myös huono jäähtymä. Yhdessä nämä kaksi tekijää aiheuttavat suu-ria hankaluuksia lauhdelämmön tehokasta hyödyntämistä ajatellen. Olipa kyse sitten paineenkorotuksella tai lämpöpumpulla toteutetusta lauhdelämmön tal-teenottototeutuksesta. Erityisesti paineenkorotusjärjestelmässä alhainen jääh-tymä lauhdelämpöverkoston toisiopiirissä voi romuttaa koko järjestelmän hyöty-suhteen. Tämän saneerausta suunniteltaessa on hyvä kiinnittää huomiota il-manvaihdon lämmitysverkoston toiminta lämpötiloihin sekä jäähtymään.

Uudemmissa kohteissa ilmanvaihdon lämmitysverkostot tulisi mitoittaa alhai-semmalle lämpötilatasolle ja ulko-ovien kiertoilmapuhaltimien sijasta tulisi käyt-tää ilmasulkupuhaltimia. Näin lauhdelämpöä voidaan hyödyntää erittäin tehok-

kaasti eikä erillistä lämpöpumppua tarvita. Tarvittaessa kassa-alueen päälle voidaan sijoittaa vaikka lattialämmitysverkostoon liitetyt säteilylämmittimet, mikäli ilmasulkupuhaltimien ei uskota pitävän mahdollista vedontunnetta hallinnassa.

### Patterilämmitys

Patterilämmitystä saatetaan käyttää ilmalämmitteisen myymälän takatiloissa. Vanhat patteriverkostot sopivat korkeiden toimintalämpötilojen takia huonosti yhteen lauhtumispaineen korotuksella toteutettujen lauhdelämmön talteenottojärjestelmien kanssa. Korkeiden toimintalämpötilojen takia vanhat patteriverkostot vaativat kaverikseen lämpöpumpun.

Mikäli uusi patteriverkosto rakennetaan, tulisi se mitoittaa 45/30 asteen lämpötilatasolle. Näin lauhdelämpöä voidaan hyödyntää ilman lämpöpumppua.

#### 6.2.4 Käyttöveden lämmitys

Käyttöveden lämmittämiseen kuluvan ostoenergian määrän on havaittu liikkuvan tyypillisessä myymäläkiinteistössä 7–13 %:n välissä, kiinteistön lämmitysenergian kulutuksesta [48, 49, 51 ja 56–58]. Voidaankin siis sanoa, että marketeissa käyttöveden lämmittämiseen ei käytetä paljoakaan energiaa. Tämä on ollut yhtenä syynä siihen, että lauhdelämpöä on harvemmin käytetty käyttöveden lämmitykseen myymäläkiinteistöissä.

## 7 Tulistuselämmön poistosiirtimen mitoitus

Kylmäjärjestelmän mitoituspiste ja huipputehon tarve kohdistuvat tyypillisesti heinä-elokuulle. Lämmitysjärjestelmän mitoituspiste ja huipputehon tarve taas kohdistuvat tammi-helmikuulle. Tämä on tietysti itsestään selvää, mutta kun puhutaan kylmäjärjestelmän tulislämmön poistovaihtimen tehomitoituksesta kannattaa olla tarkkana, minkä kylmäjärjestelmän toimintapisteen mukaan vaihtimen teho on ilmoitettu. Jos lauhdelämmön talteenottojärjestelmän muut kom-

ponentit mitoitetaan kylmäjärjestelmän kesätilanteen mukaan, tulee niistä turhan suuria, jos taas käytetään kylmäjärjestelmän talvitilanteen tehomitoitusta, jää osa lauhdelämmöstä hyödyntämättä.

Kun otetaan vielä huomioon, että lämmityskauden tunneista 69 prosenttia asetuu ulkolämpötilojen +5 ja –5 väliin [26, s. 94], on selvää, että kylmäjärjestelmän tulistuslämmön poistovaihtimen ja alijäähdyttimen optimaalinen mitoitus ei tapahdu kummankaan järjestelmä huipputehojen mukaan. Kokemusperäisten havaintojen perusteella vanhemmissa lauhdelämmön talteenottojärjestelmissä tulistuslämmön poistosiirtimet ovatkin olleet toisinaan liian pieniä, ja niiden mitoitustehoa on pikku hiljaa kasvatettu suuremmaksi. Tällä hetkellä lauhdelämmön talteenottosiirtimien yhteenlaskettuna mitoitustehona on käytetty 70 % kylmäjärjestelmän kesäaikaisesta huipputehon tarpeesta.

Alle on poimittu kirjallisuudesta muutamia ongelmakohtia, joihin kannattaa kiinnittää erityistä huomiota lauhdelämmön talteenottojärjestelmää suunniteltaessa. Samat ongelmakohdat on tunnistettu myös käytännön toteutuksissa yleisellä tasolla.

- ✓ Kylmä- ja LVIA-suunnittelijan vuoropuhelu on puutteellista [11, s. 15]. Molempien suunnittelijoiden oli hyvä tutustua myös toisen järjestelmän toimintaan ymmärtäen miten se toimii kesällä, syksyllä, talvella ja keväällä.
- ✓ Lauhdelämmön talteenottojärjestelmän huono jäähtymä. [20, s. 47; 54 ja 27, s. 33]. Tämä voi johtua paluu veden liian korkeasta lämpötilasta ja/tai energiavaraajan huonosta lämpötilakerrostumasta. Lisäksi oviverhokojeet voivat huonontaa lauhdelämpöverkoston palaavan veden jäähtymää.
- ✓ Sähkö- ja lämpöenergian kulutuksen erillismittaroinnin puutteellisuus hankaloittaa järjestelmän toiminnan seuraamista [11, s. 29]. Mittareiden kautta järjestelmän toiminnan seuraaminen on luotettavaa. Erillisten energimittareiden avulla saadaan varmistettua, että laitos toimii vuoden ympäri hyvällä hyötysuhteella.

## 8 Kohteiden esittely ja energiankulutustiedot

### 8.1 Hypermarket, liuoslauhdutteinen kylmäjärjestelmä ja lämpöpumppu

Ensimmäinen tarkasteltava kohde on hypermarket, jossa on perinteinen liuoslauhdutteinen kylmälaitos. Kylmälaitos on saneerattu vuonna 2018. Samassa yhteydessä myymälän valaisimet uusittiin led-valaisimiksi. Kohteen lämmitysmuoto on kaukolämpö ja kohde on ilmalämmitteinen.

Vanhan lauhdelämmön talteenottojärjestelmän kuvaus:

Kylmäjärjestelmän liuoslauhdutusverkostosta on otettu sivuhaara, johon ilmanvaihdon esilämmityspatterit on liitetty. Kohteessa on yhdeksän ilmanvaihtokoneetta, joista kaksi on hyödyntää lauhdelämpöä. Lauhdetehon osuus ilmanvaihtokoneiden kokonaislämmitystehosta on vain 17 %.

Kohteen vanhassa lauhdelämmön talteenottojärjestelmässä ei ole energiamittaria. Tämän takia vanhan järjestelmän hyödyntämä lauhde-energian määrän arvioidaan olevan 430 MWh vuositasolla. Tämä tarkoittaa noin 18 %:n osuutta ilmastovaihtoon ostoenenergian kokonaisenergian kulutuksesta. Arvio perustuu ilmanvaihdon lämmitystehojen suhteeseen sekä vuoden 2019 kaukolämmönkulutukseen. Tarkemmin kohteen perustiedot on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Kohteen 1 perustiedot.

<b>Kohde 1</b>	
Tyyppi:	Hypermarket
Rakennusvuosi:	2003
Bruttoala:	23 466 m <sup>2</sup>
Lämmitysmuoto:	Kaukolämpö
Lämmitysteho:	<b>3090</b> kW
Käyttövesi:	250 kW
Lämmitys:	60 kW
Ilmastointi	2745 kW

Katulämmitys	35 kW
Lauhdelämpöteho:	<b>589</b> kW
Lämpöpumput:	200 kW
Esilämmitys:	360 kW
Kiertoilma	29 kW

Kohteeseen lisättiin vanhan lauhdelämmön talteenottojärjestelmän jälkeen kaksi lämpöpumppua, joiden nimellisteho on 100 kilowattia kappale. Näillä lämpöpumpuilla matalan lämpötilatason lauhde-energia, joka ajettaisiin muuten liuosjäähdyttimen avulla ulos, saadaan nostettua korkeampaan lämpötilatasoon. Näin lauhdelämpöä voidaan hyödyntää ilmanvaihdon esilämmityksen lisäksi, kaikissa rakennuksen lämmitysverkostoissa. Uuteen järjestelmään asennettiin verkosto kohtaiset energiamittarit. Budjettihinnaksi lämpöpumppujen lisäämiselle arvioitiin 150 000 €.

### 8.1.1 Esimerkkikohteen energiakulutus

Kun uusi järjestelmä oli toiminut vuoden päivät, verrattiin energiahallintajärjestelmästä saatuja kiinteistön kulutustietoja ennen ja jälkeen lämpöpumppujen asentamisen. Kuten kuvasta 11 voidaan havaita, ensimmäisenä vuotena kohteen kaukolämmönkulutus putosi 1 712 MWh:a eli 63,6 prosenttia. Jos otetaan huomioon vuotuinen ulkolämpötilan vaihtelu ja verrataan normeerattuja kaukolämmönkulutuksia, kulutus putosi 58,6 %.



Kuva 11. Kiinteistön energiankulutustiedot ja ulkolämpötilat ennen ja jälkeen lämpöpumpputen lisäämistä.

Myös kylmälaitteiden kuluttaman sähköenergian kulutus putosi 3,6 % eli 32 MWh. Tämän uskotaan johtuvan lisääntyneestä lauhteen hyödyntämisestä. Kun lämpöpumput käyttävät lähes kaiken lauhteen hyödyksi ei liuosjäähdyttimiä tarvita kuin kesäkuukausina ja kylmäjärjestelmän sähkönkulutus pieneni hie- man. Täyttä varmuutta liuosjäähdyttimien sähkönkulutuksen pienemisen osuu- desta kylmäjärjestelmän kokonaisenergian kulutukseen ei ole, koska liuosjäh- dyttimien sähkönkulutusta ei mitata erikseen. Kun kohteen kylmäjärjestelmän kulutustietoja tutkittiin useamman vuoden ajalta, havaittiin sähkön kulutuksen

vaihtelevan vuositasolla  $\pm 2,1$  %. Päätelmä on kuitenkin oikeansuuntainen. Liuosjäähdyttimien vähäisempi käyttö tasaa lämpöpumppujen takia lisääntyntä sähkönkulutusta.

Kiinteistön kokonaissähkönkulutus kasvoi 135 MWh:a eli 3,6 %. Kun kaikki huomioidaan yhteen, kokonaisuudessaan ostoenergiankulutus pieneni energian hallintajärjestelmän mukaan 1 577 MWh eli noin 24,6 %.

Kun tarkastellaan kohteeseen lisättyjen energiamittareiden lukemia, havaitaan että lämpöpumput ovat tuottaneet vuoden aikana 873 MWh lämpöenergiaa ja kuluttaneet sen tekemiseen 144 MWh sähköenergiaa. Lämpöpumppujen vuosihyötysuhde (SCOP) on 6,07. Vuosihyötysuhdetta voidaan pitää erinomaisena ja se on huomattavasti korkeampi kuin, jos lämpöpumppuja olisi käytetty perinteisessä maalämpökäytössä. Vuosihyötysuhteeseen on laskettu mukaan lämpöpumppujen sisäisten kiertovesipumppujen sähkönkulutus, mutta ei lauhdelämpöverkoston kiertovesipumppujen sähkönkulutusta, joten koko järjestelmän hyötysuhde olisi hieman alhaisempi.

Kun verrataan kaukolämmön kokonaiskulutuksen alenemaa, 1 712 MWh ja lämpöpumppujen tuottaman lämpöenergian määrää 873 MWh, päädyimme johtopäätökseen, jossa kaikki kaukolämpöenergian säästö ei voi johtua lämpöpumppuista.

Kun asiaa tutkittiin tarkemmin, vertailemalla kohteen vuosien 2016–2018 kaukolämmön energiankulutuksia saatiin selville, että kaukolämpöenergian kulutus vaihtelee vuosittain jopa  $\pm 17$  %. Lisäksi havaittiin, että tarkastelujaksojen kylmimpien kuukausien, loka-maaliskuun, ulkolämpötilojen keskiarvoissa oli 2,6 asteen ero, vaikka vuositasolla ulkoilman keskilämpötilat olivat lähes samat. Toisin sanoen vuosi 2019 oli erityisen kylmä ja vuosi 2020 lämmin.

Kun uuden lauhdelämmön talteenottojärjestelmän ensimmäisen toimintavuoden aikana kulunutta kaukolämpöenergian määrää verrattiin kolmen vuoden keski-

määräiseen kaukolämmönkulutukseen saatiin, vuosisäästöksi 1 188 MWh. Vertaamalla vastaavia normeerattuja kulutuksia kaukolämpöenergian säästö oli 1 124 MWh.

Tästä huolimatta energianhallintajärjestelmän raportoiman kaukolämmönkulutuksen ja lämpöpumpun tuottaman lämpöenergian välinen erotus on niin suuri, ettei kaukolämpöenergian säästö ole pelkästään lämpöpumppujen aikaan saannosta. Tämän takia lauhdelämmön talteenottojärjestelmään kannattaa asentaa energiamittarit, jotta todellinen energiansäästö voidaan erottaa vuosivaihteluista.

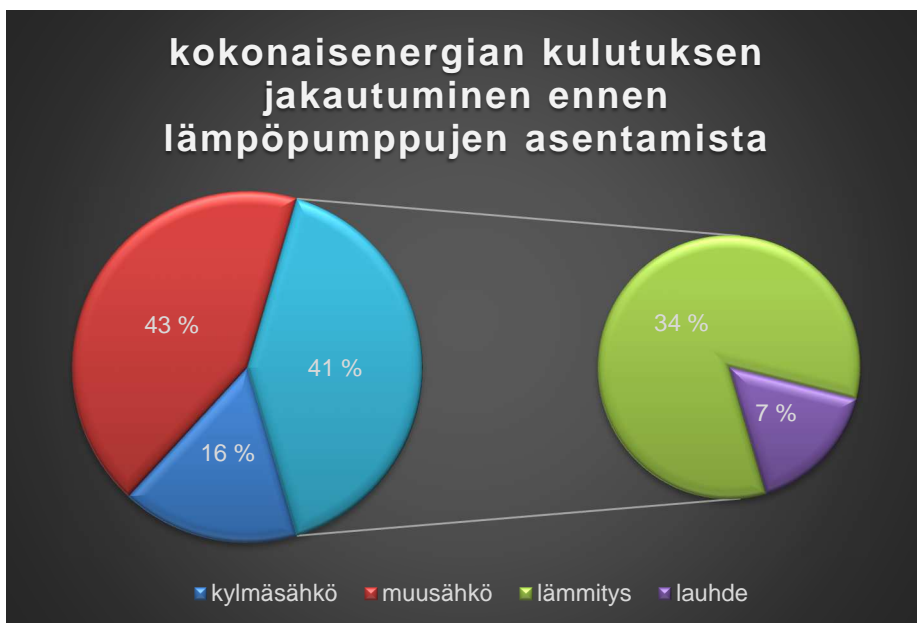
Toisin sanoen toteutuneen kaukolämmön energiankulutuksen vertailu pelkästään edellisen vuoden energiankulutukseen voi johtaa varsin karkeisiin virhepäätelmiin ja vaikka käytettäisiin pidemmän ajan energian kulutuksen keskiarvoa, joka tasaa vuotuista energiankulutuksen vaihteluita. Siltikään ei päästä kovin tarkkoihin tuloksiin.

Jos käytetään sähkö- ja kaukolämpöenergian hintana 80 €/MWh. Saadaan vuonna 2020 lämpöpumpuilla tuotetun lämpöenergian nettoarvoksi 58 000 euroa. Tämä tarkoittaa 2,6 vuoden takaisinmaksuaikaa, budjettihinnalle lasketuna.

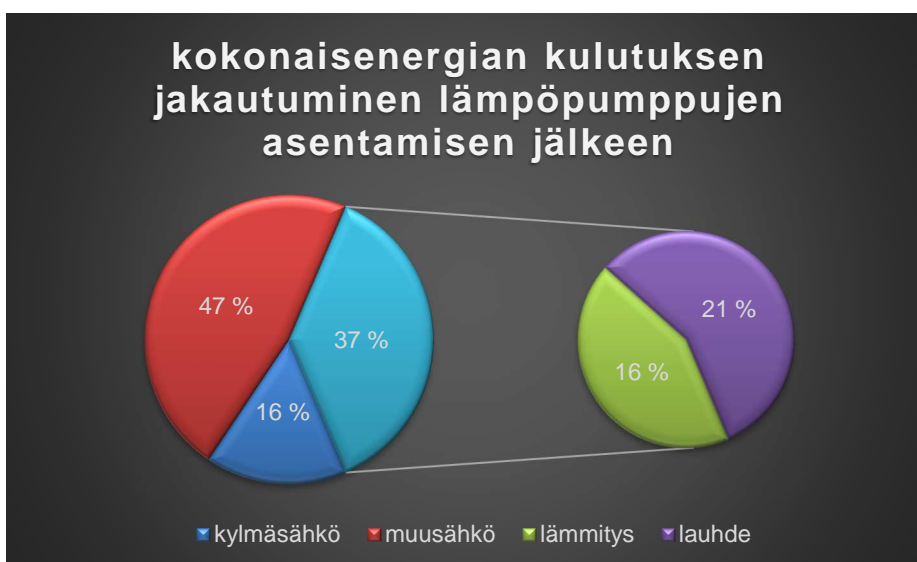
### 8.1.2 Energian jakautuminen

Kirjallisuudessa on esitetty arvioita siitä, miten myymälän energiankulutus jakautuu sähkö- ja lämmitysenergian välillä. Tähän vaikuttaa suuresti myymälän tyyppi, eli onko kyseessä supermarket vai hypermarket. Lisäksi kylmäkoneikon kylmäaineella ja sillä, onko myymälässä led- vai loisteputkivalaisimet, on merkitystä sähkönkulutuksen kannalta.

Kuvassa 12a ja 12b on esitetty kohteen yksi kokonaisenergiakulutuksen jakautuminen ennen ja jälkeen lämpöpumppujen asentamisen. Kuvissa esitettyjä energian kulutuksia vertailemalla huomataan hyödynnetyn lauhde-energian osuuden kasvaneen kolminkertaiseksi.



Kuva 12a. Kokonaisenergian kulutusjakauma ennen lämpöpumppujen asentamista.

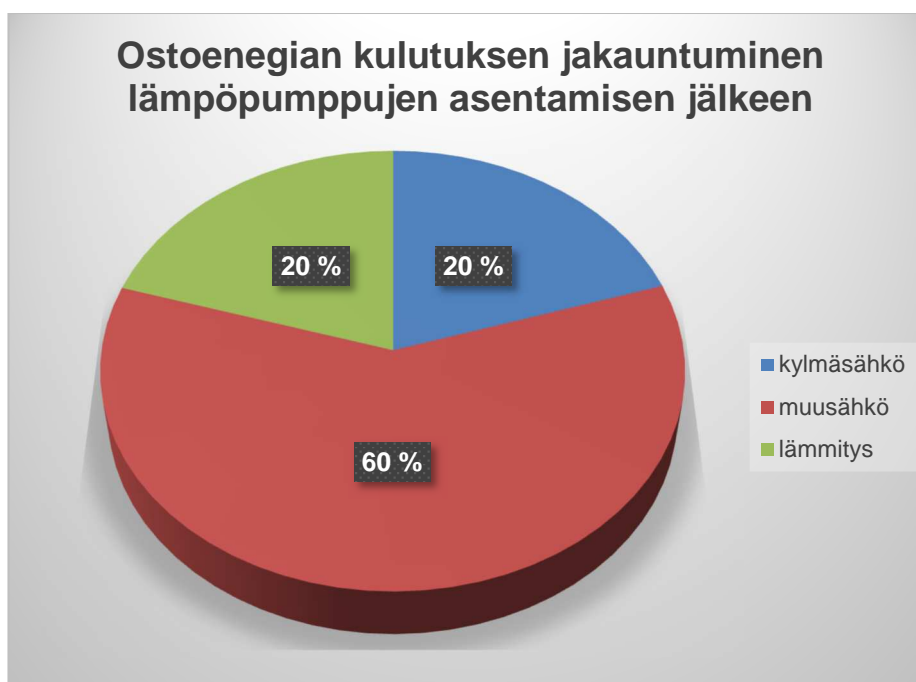


Kuva 12b. Kokonaisenergian kulutusjakauma lämpöpumppuja asentamisen jälkeen.

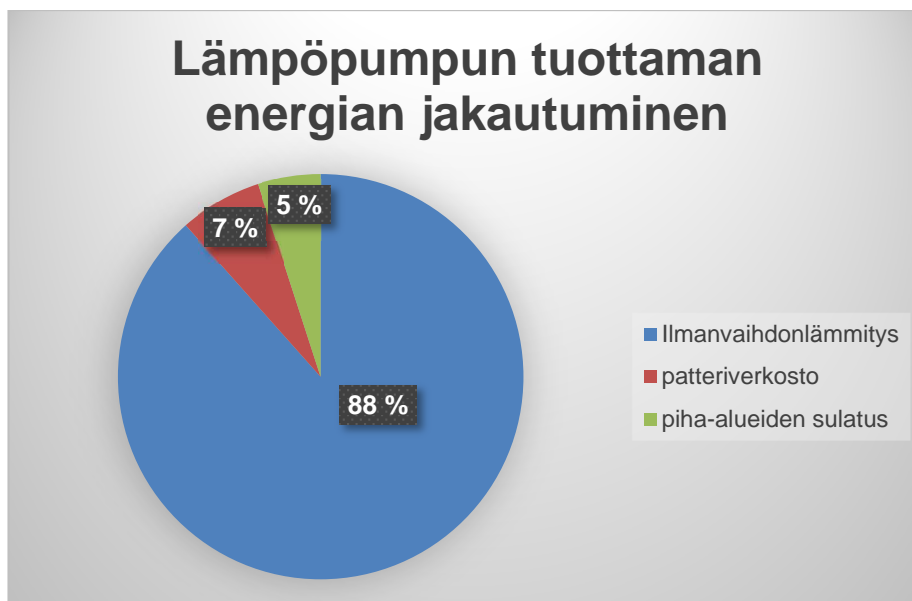
Kohteen ostoenergian jakautuminen ennen ja jälkeen lämpöpumppujen asentamista on esitetty kuvissa 13a ja 13b. Kuvassa 14 on puolestaan esitetty lauhdelämmön talteenottojärjestelmällä hyödynnetyn energian jakautumien eri lämmitysverkostojen kesken.



Kuva 13a. Ostoenergian kulutusjakauma ennen lämpöpumppujen asentamista



Kuva 13b. Ostoenergian kulutusjakauma lämpöpumppujen asentamisen jälkeen



Kuva 14. Lämpöpumpuilla tuotetun energian jakautuminen eri lämmitysverkostojen kesken.

### 8.1.3 Yhteenveto

Vaikuttaa siltä, että vanha lauhdelämmön talteenottojärjestelmä ei tässä kohteessa pystynyt käyttämään lauhdelämpöä kovin tehokkaasti hyödykseen. Lisäämällä lämpöpumpputjärjestelmä vanhan lauhdelämmön talteenottojärjestelmän liuospiiriin paluuputkeen pystyttiin hyödyntämään lauhdelämpöä kolme kertaa tehokkaammin ja kattamaan *57 prosenttia* kiinteistön vuoden 2020 lämmitysenergiatarpeesta.

Arvio ei ole täysin tarkka, koska vanhojen esilämmityspattereiden hyödyntämää lauhde-energiaa ei ole mitattu. Lisäksi tulee ottaa huomioon, että vuosi 2020 oli poikkeuksellisen lämmin. Tuloksesta voidaan kuitenkin päätellä, että lauhdelämmöllä voidaan kattaa erittäin suuri osa hypermarketin lämmitysenergian tarpeesta myös vanhassa kiinteistössä varsinkin silloin, kun lämmitysverkostojen menoveden lämpötilat ovat alhaiset.

Tarkastellaan vielä rakennuksen lämmityksestä syntyneitä CO<sub>2</sub> päästöjä. Forum ilmoittaa, että sen kaukolämpötuotannon keskimääräinen CO<sub>2</sub>-päästö on 221 gCO<sub>2</sub>/kWh. Lämpöpumpuilla hyödynnettiin lauhdelämpöä 729 000 kWh:a vuonna 2020, joten energiankulutuksen hiilidioksidipäästöt olivat 161 000 kiloa

alemmat. Koska voi olla vaikea hahmottaa, paljonko 161 tonnia CO<sub>2</sub>- päästöjä on, todettakoon että se vastaa hieman yli miljoonan ajokilometrin hiilidioksidipäästöjä keskimääräisellä suomalaisella autolla.

## 8.2 Supermarket, CO<sub>2</sub>-kylmäjärjestelmä ja lämpöpumppu

Toinen tarkasteltava kohde on vuonna 2011 rakennettu supermarket. Kohteen lämmitysmuoto on kaukolämpö ja kohde on ilmalämmitteinen. Kohteessa on ensimmäisen sukupolven CO<sub>2</sub>-kylmälaitos. Kylmälaitoksessa on kaksi tulistuselämmön poistovaihdinta. Ensimmäisellä lämmitetään kiertoilmakonetta, jonka jälkeen jäljelle jäävä lauhdelämpö ajetaan toisen lämmönvaihtimen kautta muiden ilmanvaihtokoneiden tuloilman esilämmitykseen.

Kohteessa on neljä ilmanvaihtokonetta ja ne kaikki hyödyntävät lauhdelämpöä. Lauhdelämpöpattereiden tehon osuus ilmanvaihtokoneiden lämmityspattereiden kokonaistehosta on 52 %.

Kohteen vanhassa lauhdelämmön talteenottojärjestelmässä ei ole energiamittareita, joten vanhan järjestelmän hyödyntämän lauhde-energian määrän arvioidaan olevan 196 MWh:a vuodessa. Tämä tarkoittaa noin 50 %:n osuutta ilmanvaihdon ostoenergian kokonaisenergian kulutuksesta ja 27 %:a kokonaislämmitysenergian kulutuksesta. Arvio perustuu ilmanvaihdon lämmitystehojen suhteeseen sekä vuoden 2019 kaukolämmönkulutukseen. Tarkemmin kohteen perustiedot on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Kohteen 2 perustiedot

<b>Kohde 2</b>	
Tyyppi:	Supermarket
Rakennusvuosi:	2011
Bruttoala:	6 810 m <sup>2</sup>
Lämmitysmuoto:	Kaukolämpö
Lämmitysteho:	<b>997</b> kW
Käyttövesi:	120 kW
Lämmitys:	60 kW
Ilmastointi	746 kW
Katulämmitys	71 kW
Lauhdelämpöteho:	<b>713</b> kW
Kiertoilma	60 kW
Esilämmitys:	553 kW
Lämpöpumput:	100 kW

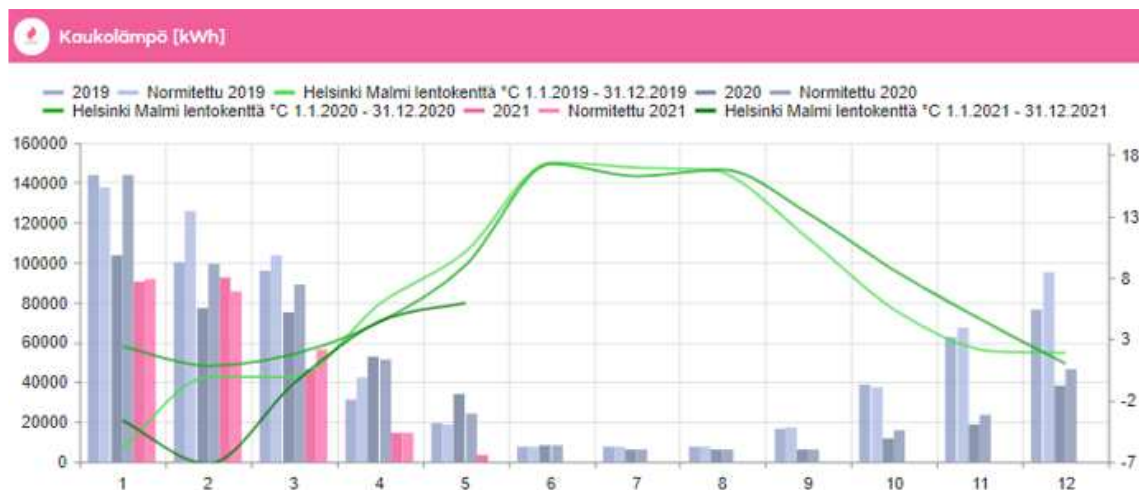
Kohteeseen lisättiin vanhan lauhdelämmön talteenottojärjestelmän jälkeen yksi lämpöpumppu, nimellisteholtaan 100 kilowattia. Lämpöpumpun avulla lauhdelämpöä voidaan hyödyntää kaikissa rakennuksen lämmitysverkostoissa. Uuteen järjestelmään asennettiin verkostokohtaiset energiamittarit. Budjettihinnaksi lämpöpumpun lisäämiselle arvioitiin 100 000 €.

### 8.2.1 Energiankulutus

Lämpöpumppujärjestelmä saatiin valmiiksi elokuussa 2020. Kuvasta 15 näkyy, uuden järjestelmän vaikutus kohteen energiankulutukseen. Jos verrataan syyskuun 2019 ja 2020 kaukolämmön kulutuksia huomataan, että kulutus on pudonnut 61,8 prosenttia eli 10 200 kWh. Tämän jälkeen kaukolämmönkulutus on asettunut uudelle matalammalle tasolle.

Kun tarkastellaan esimerkiksi helmikuun 2020 ja 2021 kulutustietoja (kuva 15) huomataan, että helmikuussa 2021 on kulunut enemmän kaukolämpöä kuin

helmikuussa 2020, vaikka lämpöpumppu onkin ollut käytössä. Tämä johtuu siitä, että helmikuussa vuonna 2020 ulkoilman keskilämpötila oli poikkeuksellisen lämmin ja vuonna 2021 helmikuun ulkoilman keskilämpötila oli taas pitkän ajan keskiarvoa huomattavasti kylmempi.



Kuva 15. Kaukolämpöenergian kulutus ja ulkoilman lämpötilat kuukausittain kohteessa 2.

Kiinteistön normaalisti kaukolämmön energiankulutukseksi määriteltiin vuosien 2017–2019 keskiarvo, joka oli 673 000 kWh. Vuonna 2020 kaukolämpöä kului vain 437 000 kWh eli 35,1 % vähemmän kuin vuotta aikaisemmin, vaikka lämpöpumppu oli käytössä vain 4 kuukautta.

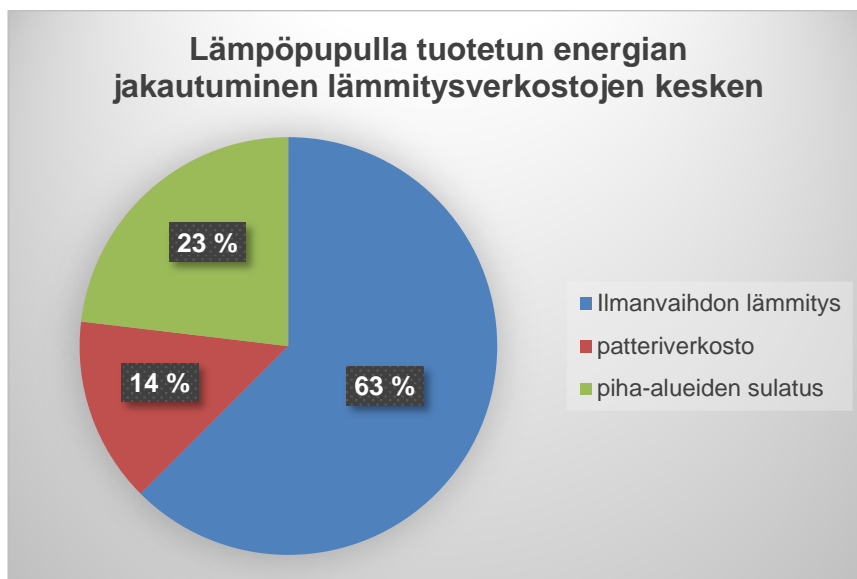
Kaiken kaikkiaan lämpöpumppu on ollut käynnissä 8 kuukautta eli yhden kokonaisen talven. Sinä aikana se tuotti lämpöenergiaa 366 MWh ja kulutti sähköenergiaa 79 MWh. Näin ollen järjestelmän hyötysuhde (COP) on 4,63. Koska kiinteistöä ei lämmitetä kesällä, arvioidaan lämpöpumpun hyödyntämän lauhdeenergian sekä sen kuluttaman sähköenergian määrien olevan vuositasona samat kuin 8 kuukauden vertailujaksolla.

Kun kaukolämpö- ja sähköenergian hintana käytetään arvoa 80 €/MWh, lämpöpumpun nettovuosisäästökseksi saadaan 23 000 €. Lauhdelämmön talteenottojärjestelmän suoraksi takaisinmaksuajaksi muodostuu 4,4 vuotta, laskettuna budjettihinnalla.

## 8.2.2 Energian kulutuksen jakautuminen

Koska kohteesta ei ole saatavissa energian kulutustietoja kokonaiselta vuodelta lämpöpumppujen asentamisen jälkeen, ei koko kiinteistön energian käytön tarkastelua voida suorittaa. Se voidaan kuitenkin todeta, että lauhdelämmön talteenotto järjestelmän kautta hyödynnetyn lauhde-energian määrän arvioitiin kasvaneen 287 prosenttia.

Kuvassa 16 esitetään lauhdelämmön talteenottojärjestelmän hyödyntämän lauhde-energian jakautuminen eri lämmitysverkoston kesken. Ilmanvaihdon lämmitykseen käytettävän lauhde-energian vähäisemmän osuuden arvioidaan johtuvan siitä, että tässä kohteessa lauhdelämpöä käytettiin laajemmin hyödyksi jo ennen lämpöpumppujen asentamista kuin luvussa 8.1 esitellyssä kohteessa.



Kuva 16. Energian jakautuminen eri lämmitysverkoston kesken.

## 8.2.3 Yhteenveto

Vaikka kohteen vanhan lauhdelämmön talteenottojärjestelmä on teknisesti kehittyneempi kuin luvussa 8.1 esitellyn kohteen lauhdelämmön talteenottojärjestelmä ja lauhdelämpöä hyödynnettiin tässä kohteessa kattavammin tuloilman esilämmitykseen, saatiin lämpöpumpulla silti kasvatettua hyödynnetyn lauhdelämmön osuus lähes kolminkertaiseksi.

Kolmen vuoden keskimääräisellä kaukolämmön energiankulutuksella sekä lämpöpumpun vuotuisen tuottoarvion perusteella arvioidaan, että lämpöpumppu laskee kohteen vuotuista kaukolämmön kulutusta 54 %. Lisäksi arvioidaan, että jatkossa lauhdelämmön talteenottojärjestelmällä voidaan *kattaa* 65 % kiinteistön kokonaislämmitysenergian tarpeesta.

Tämän kohteen osalta voidaankin todeta, että olemassa oleva lauhdelämmön talteenottojärjestelmä, jossa lauhdelämpöä käytettiin kattavasti kaikissa ilmanvaihtokoneissa, ei pystynyt hyödyntämään lauhdelämpöä kovin tehokkaasti ja lämpöpumpun lisääminen vanhan järjestelmän perään oli hyvin kannattavaa.

### 8.3 Supermarket, CO<sub>2</sub>-kylmäjärjestelmä lämpöpumppu ja alijäähdytys

Kolmannessa tarkasteltavassa supermarketissa tehtiin samaan aikaan suu-rempi talotekninen uudistus. Kohteen kaukolämpöpaketti, myymälän ilmanvaihtokone sekä rakennusautomaatiojärjestelmä uusittiin kokonaan. Lisäksi kohteen vanha liuoslauhdutteinen kylmäjärjestelmä korvattiin uudella CO<sub>2</sub>-kylmälaitoksella. Uuteen kylmäjärjestelmään tuli myös ovelliset kalusteet.

Myymälän vanhana tuloilmakoneena toimi Kryötherm. Se oli varustettu kiertoilmatoiminnolla, mutta siinä ei ollut poistoilman lämmöntalteenottoa. Tuloilma lämmitettiin suoralauhdutteisella lämmityspatterilla sekä ilmanvaihdon lämmitysverkostoon kytketyllä lämmityspatterilla. Myymälän uuden tuloilmakoneen ilmamäärä on 69 % vanhan koneen ilmamäärää pienempi. Lisäksi myymälässä on erillinen kiertoilmakone.

Aikaisemmin kohteessa oli viisi ilmanvaihtokonetta, joista kaksi hyödynsi lauhdelämpöä. Lauhdelämpöpattereiden tehon osuus ilmanvaihtokoneiden lämmityspattereiden kokonaistehosta oli 52 %. Vanhalla järjestelmällä hyödynnetyn lauhde-energian osuuden on arvioitu olevan 120 MWh vuodessa, joka vastaa 34 % vanhan ilmanvaihtojärjestelmän lämmitysenergian kulutuksesta. Tarkemmin kohteen perustiedot on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Kohteen 3 perustiedot

<b>Kohde 3</b>			
Tyyppi:	Supermarket		
Rakennusvuosi:	2002		
Bruttoala:	3 364 m <sup>2</sup>		
Lämmitysmuoto:	Kaukolämpö		
	vanha	uusi	
Lämmitysteho:	<b>595</b>	<b>650</b>	kW
Käyttövesi:	155	155	kW
Lämmitys:	40	40	kW
Ilmastointi	400	455	kW
	vanha	uusi	
Lauhdelämpöteho:	<b>215</b>	<b>230</b>	kW
Kiertoilma	35	0	kW
Esilämmitys:	180	30	kW
Lämpöpumput:		200	kW

Uuteen lauhdelämmön talteenottojärjestelmään asennettiin kaksi lämpöpumpua, joiden yhteenlaskettu lämmitysteho on 200 kilowattia. Uudella järjestelmällä lauhdelämpöä voidaan hyödyntää rakennuksen kaikissa lämmitysverkostoissa. Lämpöpumppujen tehtävä on, rakennuksen lämmityksen lisäksi, hoitaa kesäaikainen ilmanvaihdon jäädytys, joten kyseessä on yhdistetty lämmitys- ja jäädytysjärjestelmä eli CHC-järjestelmän (combined heating and cooling). Lisäksi lämpöpumpuilla alijäädytetään kaupan kylmäjärjestelmän kylmäprosessia. Näin varmistetaan kylmäjärjestelmän hyvä hyötysuhde myös kesällä.

Lämpöpumppujen lisäksi lauhdelämmön talteenottojärjestelmässä on tulistuslämmön poistovaihdin, jolla saadaan hyödynnettyä kylmäjärjestelmän tulistuslämpö suoraan, ilman lämpöpumpua. Uuteen järjestelmään asennettiin myös verkostokohtaiset energiamittarit, joilla kiinteistön hyödyntämä lauhde-energia voidaan mitata tarkasti.

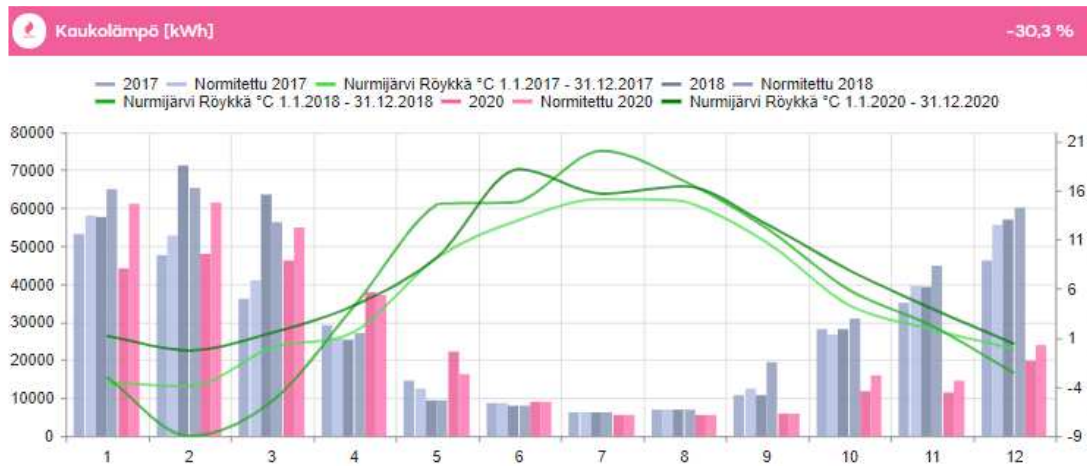
Ensimmäisenä kesänä havaittiin, että yksi lämpöpumppu riitti kohteeseen myös jäähdytystilanteessa. Lämpöpumput kävivät ensimmäisenä vuotena vuorotellen, joten kohteessa ensimmäisen vuoden toteutuneeseen lämmitysenergian säästöön olisi päästy myös yhdellä lämpöpumpulla. Tämän takia toisen lämpöpumpun hankintakustannusta ei huomioida kohteen budjettihinnassa.

Lisäksi kohteen automaatiojärjestelmän, ilmanvaihtokoneen sekä kaukolämpöpaketin peruskorjaukset jätetään huomioimatta budjettihinnassa, koska ne olisi tehty joka tapauksessa. Näin ollen kohteen lauhdelämpöjärjestelmän budjettihintana käytetään 100 000 euroa.

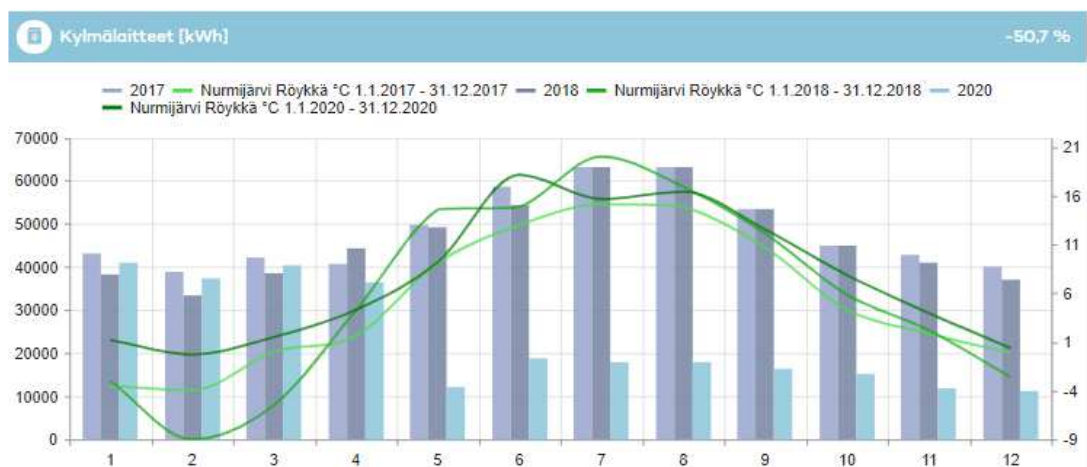
### 8.3.1 Kohteen energiankulutus

Kohteen ostoenergian kulutus ennen saneerausta oli vuositasolla 1 385 MWh. Tämä oli vuosien 2017–2019 keskiarvo. Vuoden 2020 energian kulutus oli 1147 MWh, vaikka lämpöpumppujärjestelmä oli käytössä vain osan vuodesta. Jos vuoden 2020 kaukolämmön kulutusta verrataan vuoden 2018 kulutukseen kului kaukolämpöä 30,4 prosenttia vähemmän. Jos taas verrataan samojen vuosien normeerattuja kaukolämmön kulutuslukemia, oli vuoden 2020 kulutus 21 prosenttia pienempi kuin vuonna 2018 kulutus.

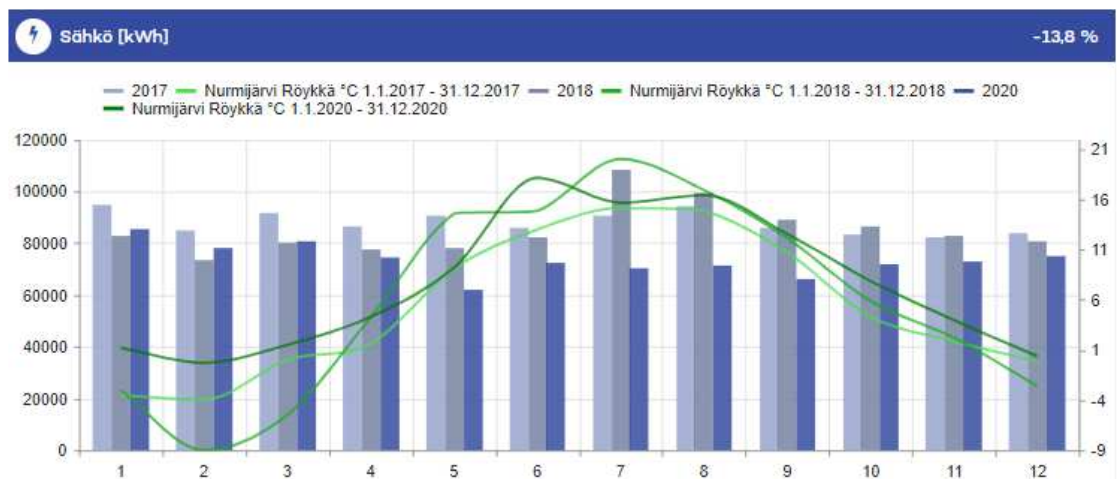
Lämpöpumppujärjestelmä käynnistettiin kesäkuussa 2020. Kuvassa 17a näkyy hyvin, miten kaukolämmön kulutus putoaa syyskuussa lämmityskauden alkaessa, paljon alemmas vuoden 2018 tasosta. Vielä merkittävämpi pudotus tapahtui kylmäjärjestelmän sähkönkulutuksessa. Kuvassa 17b näkyy hyvin, miten kylmäjärjestelmän sähkönkulutus romahtaa, kun uusi CO<sub>2</sub>-kylmälaitos otettiin käyttöön toukokuussa 2019.



Kuva 17a. Kohteen 3 kaukolämmön kulutus ja ulkolämpötilat kuukausitasolla.



Kuva 17b. Kohteen 3 kylmäjärjestelmän sähkökulutus ja ulkolämpötilat kuukausitasolla.



Kuva 17c. Kohteen 3 kokonaissähkökulutuksen muutos ja ulkolämpötilat kuukausitasolla.

Lämpöpumput ovat kirjoitushetkellä olleet käytössä 11 kuukautta ja ne ovat tuottaneet lämpöenergiaa 394 MWh. Tämä pitää sisällään myös rakennuksen

jäähdytyksen sekä kylmälaitoksen kesäaikaisen alijäähdytyksen. Sähköä järjestelmä on kuluttanut yhteensä 108 MWh. Joten järjestelmän hyötysuhde (COP) on 3,65. Tähän hyötysuhteeseen on laskettu lämpöpumppujen kompressorien sekä lämpöpumppujen sisäisten kiertovesipumppujen lisäksi lauhdelämmön talteenottojärjestelmän pääpumppujen sähkökulutus. Liuosjäähdyttimen puhaltimien ja kiertovesipumpun sähkökulutus oli 1,4 MWh, mutta sitä ei hyötysuhdetta laskettaessa otettu huomioon.

Tuosta 394 MWh:sta rakennuksen lämmitykseen hyödynnettiin 273 MWh. Loput, 121 MWh ovat menneet liuosjäähdyttimen kautta ulos ilmanvaihdon jäähdytyksen sekä kylmälaitoksen alijäähdytyksen takia. Lämmitykseen ja jäähdytykseen käytettyjen energiamäärien suhteiden avulla voidaan laskea, että lämpöpumppujen kuluttamasta sähköenergiasta jäähdytykseen ja kylmälaitoksen alijäähdytykseen on kulunut 31 %, kun tähän lisätään liuosjäähdyttimen sähkökulutus, saadaan jäähdytyksen ja alijäähdytyksen kesäaikaiseksi kokonaissähkökulutukseksi 35 MWh.

Lämpöpumpuilla hyödynnetyn 273 MWh:n lisäksi tulistuslämmön poistovaihdin on tuottanut lämpöenergiaa 51 MWh:a, joka on käytetty ilmanvaihdon esilämmitykseen sekä kesäaikaiseen ilmankuivaamiseen. Yhteensä lauhdelämmön talteenottojärjestelmän kautta saatiin hyödyksi lämpöenergiaa 324 MWh.

Kun tarkastellaan lauhdelämmön talteenottojärjestelmällä yhdentoista kuukauden aikana hyödyksi saatua lämmitysenergiaa ja verrataan sitä vuoden 2019 normeerattuun kokonaislämmitysenergian kulutukseen, päädytään arvioon, jossa kaukolämmön kulutus putoaisi vuositasolla 58 prosenttia.

Kun huomioidaan sekä käyttöveden että rakennuksen lämmittämiseen kuluva energia, lauhdelämmön osuus lämmitysenergian kokonaiskulutuksesta on 67 %. Jos tarkastellaan pelkkää rakennuksen lämmitystä, ilman käyttöveden lämmitystä, lauhdelämmön talteenottojärjestelmällä arvioidaan pystyttävän kattamaan jopa 84 % rakennuksen lämmitysenergian tarpeesta. Parhaimmillaan

myös vanhassa rakennuksessa voidaan lauhdelämmöllä kattaa erittäin suuri osuus rakennuksen lämmitysenergian tarpeesta.

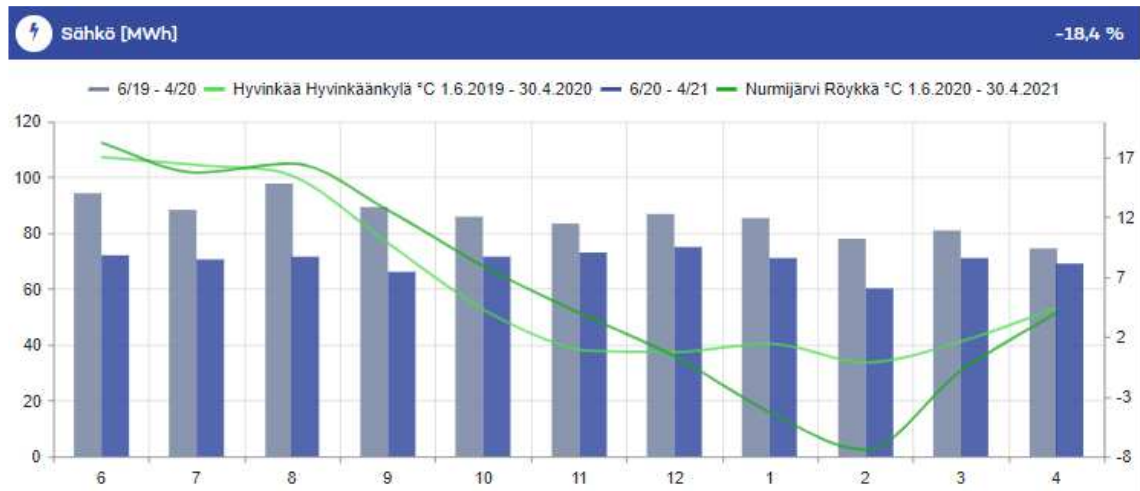
On kuitenkin hyvä pitää mielessä, että vuoden 2020 talvi oli erittäin leuto. Jos vertaillaan talvien 2019 ja 2020 ulkolämpötilojen keskiarvoja huomataan, että vuoden 2020 talvikuukausina ulkoilman keskilämpötila oli +2,5 astetta ja vuonna 2019 vastaavasti –0,6 astetta. Toisin sanoen hyödyksi saatavan lauhdelämmön osuus kokonaislämmitysenergiasta vaihtelee vanhoissa rakennuksissa paljon sen mukaan, miten kylmä talvi on. Tämä johtuu ostoenergian määrän nopeasta kasvamisesta kovemmilla pakkasilla. Lauhdelämmön osuuden vaihtelun rakennuksen kokonaisenergian kulutuksesta arvioidaan olevan vuositasolla  $\pm 15$  prosenttia.

Kun katsotaan kuvaa 18a, jossa on esitetty uuden lauhdelämmön talteenottojärjestelmän asentamisen jälkeisen yhdentoista kuukauden normeerattu kaukolämpöenergiakulutus, huomataan lämmitysenergian kulutuksen pudonneen 40,2 %.

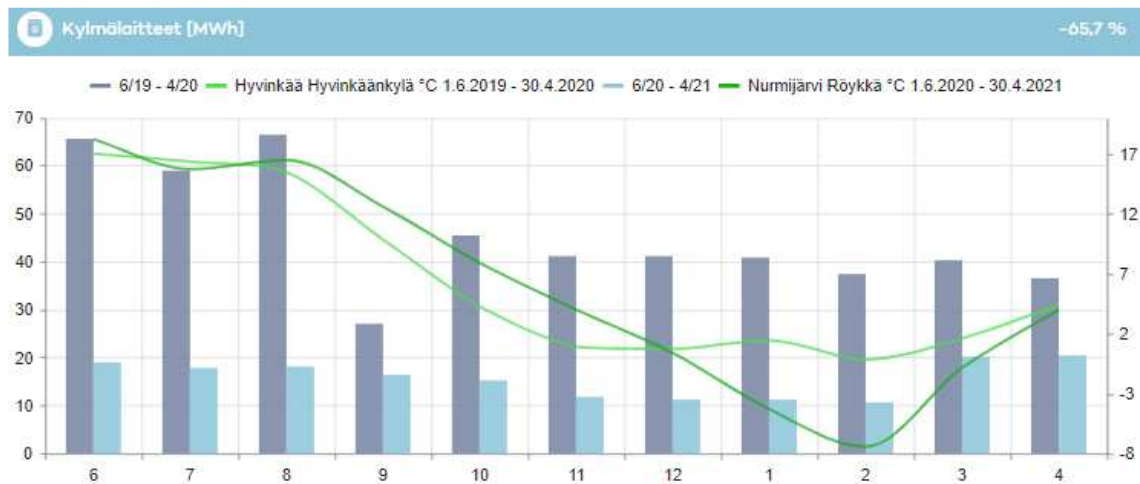


Kuva 18a. Kohteeseen 3 kaukolämmön kulutus ulkolämpötilat kuukausitasolla.

Samanaikaisesti kiinteistön sähköenergian kulutus on pudonnut 18,4 % (kuva 18b) ja kylmäsähkönkulutus jopa 65,7 % (kuva 18c).



Kuva 18b. Kohteen 3 kokonaissähköenergian kulutus ja ulkolämpötilat kuukausitasolla.



Kuva 18c. Kohteen 3 kylmäjärjestelmän sähkönkulutus ja ulkolämpötilat kuukausitasolla.

Kun käytetään sähkö- ja kaukolämpöenergian hintana 80 €/MWh niin hyödynnetyn lauhdelämpöenergian nettoarvoksi saadaan 19 900 euroa. Järjestelmän yksinkertaisesti takaisinmaksuajaksi 100 000 euron budjettihinnalla saadaan viisi vuotta.

Tarkastellaan vielä erikseen alijäähdytyksen rakentamisen takaisinmaksuaikaa.

Kohteessa olevan alijäähdyttimen teho 60 kilowattia ja se on 37,5 % kiinteistön kokonaisjäähdytystehosta. Aikaisemmin laskettiin rakennuksen jäähdytyksen sekä kylmäjärjestelmän alijäähdytyksen kuluttavan sähköenergiaa 35 MWh. Näin ollen alijäähdytyksen osuus jäähdytykseen kuluneesta sähköenergiasta on

13 MWh eli noin 1 040 euroa, koska kyseessä on 11 kuukauden kulutus arvioidaan koko vuoden sähkön kulutuksen olevan 1 200 euroa.

Kylmäjärjestelmän sähköenergian kulutus putosi uuden järjestelmän ensimmäisenä toimintavuonna 368 MWh, kun tästä vähennetään 13 MWh, joka on alijäähdytystä vastaava osuus lämpöpumppujen sähkönkulutuksesta, saadaan kylmäjärjestelmän todelliseksi vuosikulutuksen alenemaksi 355 MWh. Tämä tarkoittaa sähköenergian hinnalla 80 €/MWh, 28 400 euron säästöä.

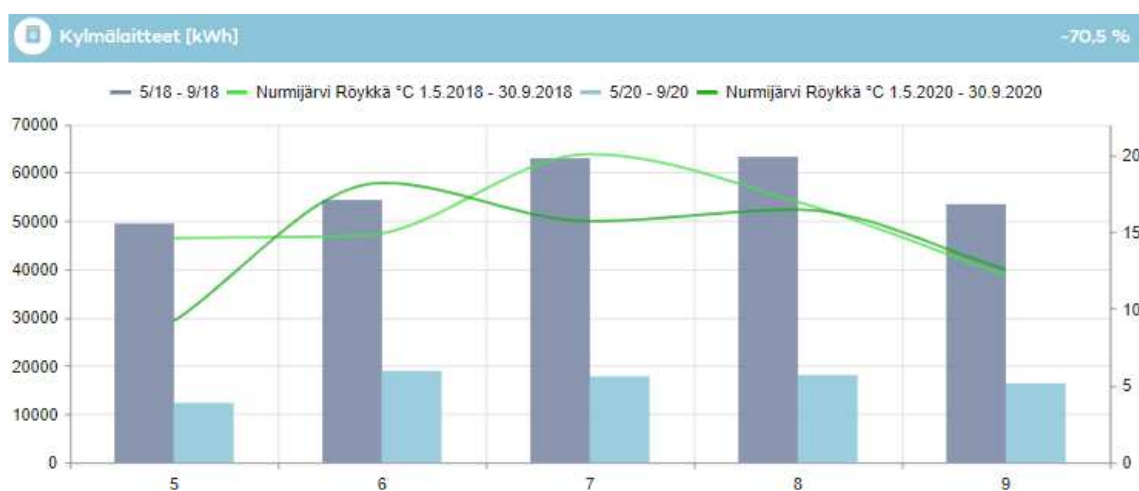
Alijäähdytyksen investointikustannuksen arvioidaan olevan 30 000 euroa. Täähän sisältyy liuoslauhdutin, 15 000 euroa, sekä putki- ja rakennusautomaatioita yhteensä 15 000 euron edestä. Hyväksyttävänä takaisinmaksuaikana voidaan pitää alle kymmentä vuotta. Jotta investointi maksaisi itsensä takaisin kymmenessä vuodessa pitäisi alijäähdytyksestä johtuvan osuuden kylmäjärjestelmän sähkönkulutuksen säästöstä olla vähintään 37,5 MWh vuodessa. Toisin sanoen alijäähdytyksen osuuden kylmä-sähkön vuotuisesta sähköenergian säästöstä tulisi olla vähintään 10,6 prosenttia.

Edellisessä investointikustannuksessa ei otettu huomioon vaihtoehtoiskustannusta. Ajatellaan kiinteistön jäähdytyksen toteuttamista neljällä erillisellä ilmalämpöpumpulla, arvioidaan näiden kokonaishinnaksi vaikka 12 000 euroa. Kun tämä vaihtoehtoiskustannus vähennetään alijäähdytyksen investointikustannuksesta, saadaan alijäähdytyksen tarvittavaksi osuudeksi kylmäjärjestelmän sähkönenergian kulutuksen säästöstä 6,3 prosenttia, jotta päästään alle 10 vuoden takaisinmaksu-aikaan.

Jos vertaillaan kohteen kylmäjärjestelmän kesäajan sähköenergian kulutusta ennen ja jälkeen kylmälaitossaneerauksen, voidaan kuvasta 19 huomata kulutuksen pudonneen jopa yli 70 %. Kun kylmäjärjestelmän sähkön kulutukseen lisätään lämpöpumppujärjestelmän alijäähdytykseen käyttämä sähköenergia, päästään 66 %:n säästöön kylmäjärjestelmän sähkönkulutuksessa.

Yleisesti supermarket-kohteiden kylmäjärjestelmän energiankulutus on pudonnut luokkaa 45–50 prosenttia, kun vanha kylmäjärjestelmä on uusittu CO<sub>2</sub>-kylmäjärjestelmäksi ovellisilla kalusteilla.

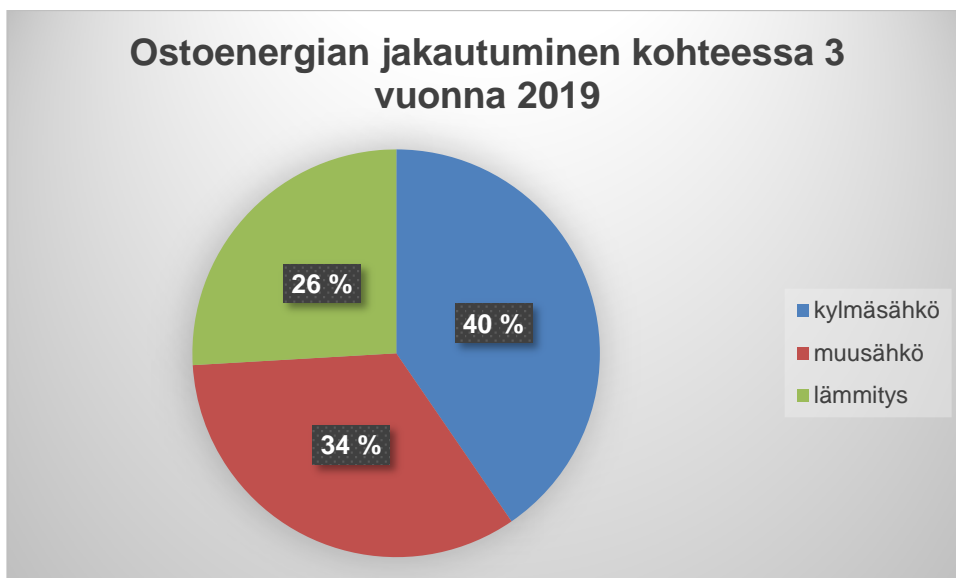
Näin ollen on mahdollista, että kohteen uuden kylmäjärjestelmän erityisen korkealla energiatehokkuudella sekä kylmäprosessin alijäähdytyksellä olisi syy-seuraussuhde ja korkeampi energiansäästö johtuisi alijäähdytyksestä. Täyttää varmuutta asiasta ei saada, koska ei voida osoittaa, mikä osuus sähköenergian säästöstä johtuu kylmälaitoksen uusimisesta ja mikä alijäähdytyksestä.



Kuva 19. Kohteen kylmäjärjestelmän kesäaikainen sähköenergian kulutus sekä ulkoilman lämpötilat ennen ja jälkeen kylmäjärjestelmän uusimisen

### 8.3.2 Energian kulutuksen jakautuminen

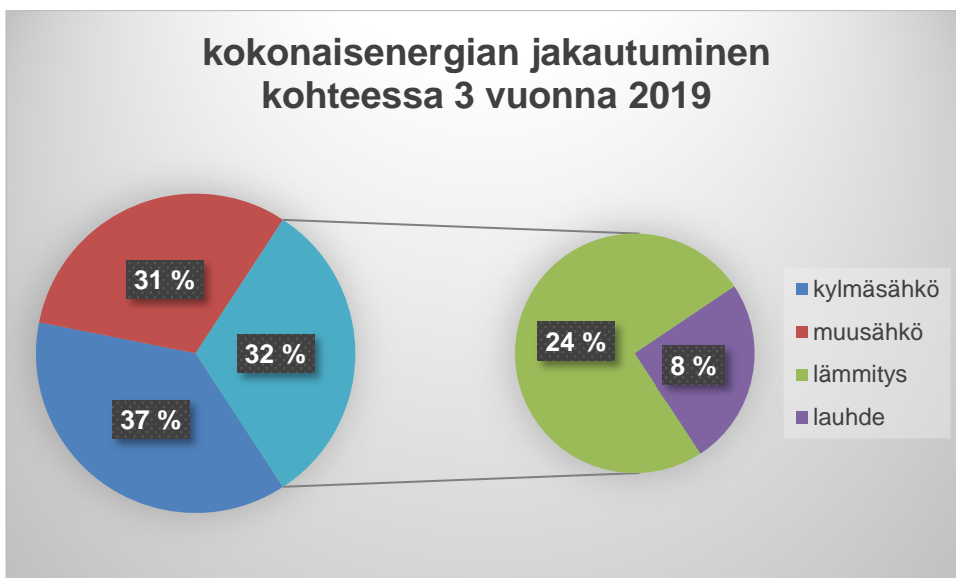
Sen lisäksi, että kohteen kokonaisenergian kulutus laski 2020 vuonna 238 000 kWh (–17 %), vaikka uusi kylmä- ja lauhdelämmön talteenottojärjestelmä olivat käytössä vain puolet vuodesta, muuttui kohteen energiaprofiili myös varsin paljon. Kuvista 20a–20b havaitaan, että uudenaikaisen kylmäjärjestelmän kuluttaman sähköenergian osuus ostoenergian kokonaiskulutuksesta on pudonnut merkittävästi. Lisäksi kuvista 21a–21b havaitaan, että uuden lauhdelämpöjärjestelmän kautta saatiin hyödynnettyä 2,8-kertainen määrä energiaa verrattuna vanhaan järjestelmään.



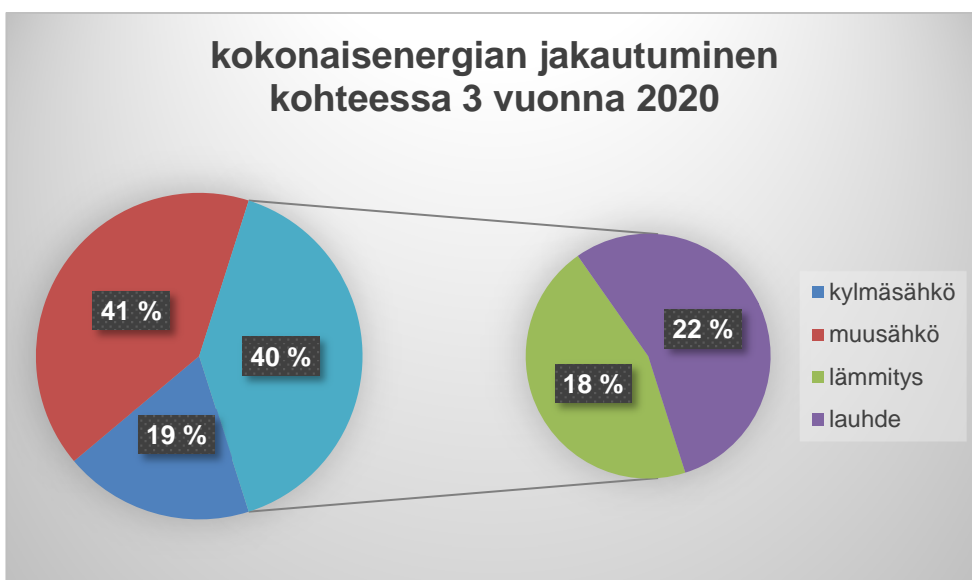
Kuva 20a. Ostoenergian jakautuminen käyttökohteittain vuonna 2019.



Kuva 20b. Ostoenergian jakautuminen käyttökohteittain vuonna 2020.



Kuva 21a. Kokonaisenergian jakautuminen käyttökohteittain vuonna 2019.



Kuva 21b. Kokonaisenergian jakautuminen käyttökohteittain vuonna 2020.

### 8.3.3 Yhteenveto

Vanha liuoslauhdutteisen kylmälaitoksen lauhdelämmön talteenottojärjestelmä, johon Kryötherm ilmanvaihtokone oli liitetty, ei ollut kovin energiatehokas. Tämä selittyy vanhan ilmanvaihtokoneen suurella ilmamäärällä sekä poistoilman lämmöntalteenoton puuttumisella.

Vaikka kyseessä onkin vanha rakennus, jossa osa ilmanvaihtokoneista, oviverhokoneet mukaan lukien, jäivät toimimaan vanhoilla, korkeilla menoveden lämpötiloilla, saavutettiin uudella lauhdelämmön talteenottojärjestelmällä varsin suuri parannus rakennuksen energiatehokkuuteen.

Energian kulutustietojen perusteella arvioidaan, että jos uusi lauhdelämmön talteenottojärjestelmä olisi ollut käytössä koko vuoden 2020 oltaisiin lauhdelämmöllä saatu katettua kokonaislämmitys energiasta 67 prosenttia. Tosin uudiskohteiden osalta on esitetty arvioita, joissa jopa 85 prosenttia kokonaislämmitysenergian kulutuksesta oli mahdollista kattaa lauhdelämmön talteenottojärjestelmällä.

#### 8.4 Supermarket CO<sub>2</sub>-kylmäjärjestelmä ja paineenkorotus

Neljännessä kohteessa oli vanha liuoslauhdutteinen kylmäjärjestelmä sekä Kryötherm-ilmanvaihtokone. Kohteen lämmitysmuoto on kaukolämpö. Kohteessa on kaksi lämmitysverkostoa. Ilmanvaihdon lämmitysverkosto sekä toinen yhdistetty patteri- ja kattosäteilijäverkosto.

Kohteen vanhat suunnitelmat eivät olleet käytettävissä, eikä vanhan lauhdelämmön talteenottojärjestelmän tehotietoja saatu kartoitettua. Kohteen perustiedot on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Kohteen 4 perustiedot

<b>Kohde 4</b>			
<b>Tyyppi:</b>	Supermarket		
Rakennusvuosi:	1975		
<b>Bruttoala:</b>	2000	m <sup>2</sup>	
Lämmitysmuoto:	Kaukolämpö		
	vanha	uusi	
Lämmitysteho:		221	kW
Käyttövesi:	100	100	kW
Lämmitys:	60	60	kW
Ilmanvaihto	61	61	kW

	vanha	uusi	
Lauhdelämpöteho:		122	kW
ilmavaihdon lämmitys		80	kW
ilmanvaihdon esilämmitys:		42	kW

Kohteessa tehtiin laajempi saneeraus, jossa lähes kaikki talotekniikka uusittiin. Kryötherm uusittiin tavalliseksi ilmanvaihtokoneeksi, jossa on poistoilman lämmön talteenotto, myös kaukolämpöpaketti ja rakennusautomaatiojärjestelmä uusittiin. Kohteen kylmäjärjestelmä saneerattiin CO<sub>2</sub>-laitokseksi ovellisilla kylmäkasteilla.

Uudessa lauhdelämmön talteenottojärjestelmässä lauhdelämpöä hyödynnetään paineenkorotuksen avulla. Järjestelmässä on kaksi rinnakkaista tulistuslämmön poistovaihdinta, joiden yhteen laskettu teho on 80 kilowattia. Lisäksi lauhdelämpöjärjestelmän paluuvesi kierrätetään vielä ilmanvaihdon esilämmityspatterin läpi, jonka teho on 42 kilowattia. Näin jäähtymä tulistuslämmön poistovaihtimien yli saadaan mahdollisimman suureksi. Uuteen lauhdelämmön talteenottojärjestelmään asennettiin myös energiamittari.

IV-koneen saneerauskustannukseksi arvioidaan 100 000 euroa. Rakennusautomaatiojärjestelmän sekä kaukolämpöpaketin uusimiskustannukseksi yhteensä 50 000 euroa eli 25 000 euroa kumpainenkin.

Edellä mainittuja uusimiskustannuksia ei huomioida budjettihinnassa, koska ne olisi tehty muutenkin. Varsinaisen lauhdelämmön talteenottojärjestelmän budjetti hinnaksi arvioidaan 50 000 euroa.

#### 8.4.1 Kohteen energiankulutus

Kohteen vanhan lauhdelämmön talteenottojärjestelmän arvioitiin hyödyntävän lauhdelämpöä 185 MWh vuodessa. Tämä vastaa 49 %:a kokonaislämmitystarpeesta. Tämä on hieman korkeampi osuus kuin aiemmin esitetyissä kohteissa,

mutta toisaalta kohteen vanhaa kylmäjärjestelmää on myös ajettu korkeammalla lauhtumispaineella, kuin aikaisemmissa luvuissa käsiteltyjen kohteiden kylmäjärjestelmiä. Näin myös lauhde-energiaa saadaan enemmän hyödyksi.

Energianhallintajärjestelmästä saatuja kohteen kaukolämmön kulutustietoja sekä uuden lauhdelämmön talteenottojärjestelmän tuottaman lauhde-energian määrää tarkastelemalla määriteltiin kohteen kokonaislämmitysenergiantarve. Tämän perusteella arvioitiin vanhan lauhdelämmön talteenottojärjestelmän osuus rakennuksen lämmitysenergiasta. Aluksi vaikutti siltä, että vanha lauhdelämmön talteenottojärjestelmä olisi tuottanut jopa 87 prosenttia kokonaislämmitysenergiasta. Näin suuri lauhdelämmön osuus vaikutti epäuskottavalta, vanhassa kohteessa, jossa korkeat lämmitysverkostojen toimintalämpötilat. Suuri lauhdelämmön osuus ei täsmännyt kirjallisuudessa esitettyihin arvioihin eikä muissa kohteissa havaittuihin lukuihin. Jotta kaukolämmön kulutuslukemien paikkansa pitävyys voitiin tarkistaa, pyydettiin paikalliselta energialaitokselta todelliset kulutuslukemat. Lopulta selvisikin, että energianhallintajärjestelmän raportoimat kaukolämmön kulutuslukemat olivat vain 30 % todellisesta kulutuksesta.

Saneeraus valmistui lokakuussa 2018. Vuonna 2020 uusi lauhdelämmön talteenottojärjestelmä hyödynsi lauhdelämpöä 295 MWh. Vuonna 2020 kaukolämpöenergian kulutus oli 56,6 % (108 MWh) alempi kuin vuosien 2015–2017 keskiarvo. Vastaavasti kiinteistöä kokonaissähkönkulutus putosi 43 % (413 MWh).

Kylmäjärjestelmän sähkönkulutusta ei ole mitattu erikseen ennen remonttia, joten uuden kylmäjärjestelmän sähkönkulutuksen arvioidaan olevan 50 prosenttia alemma tasolla kuin vanhan kylmäjärjestelmän sähkönkulutuksen.

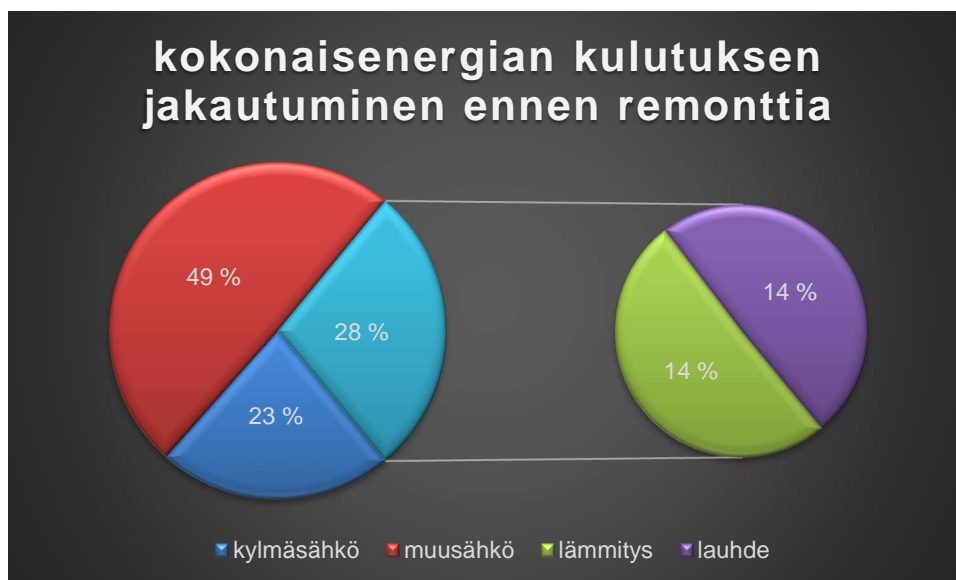
Jos käytetään kaukolämpöenergian hintana 80 €/MWh, säästettiin vuonna 2020 kaukolämpölaskussa 8 600 euroa. Näin ollen suoraksi takaisinmaksuajaksi saadaan 50 000 euron budjettihinnalla 5,8 vuotta.

Vanhan kylmäjärjestelmän lauhtumispaineen korotuksen arvioidaan kuluttavan enemmän sähköä kuin uuden kylmäjärjestelmän vastaava paineenkorotus kuluttaa. Joten uuden kylmäjärjestelmän arvioidaan kuluttavan 10 % vähemmän sähköä saman laudemäärän tuottamiseen kuin vanha kylmäjärjestelmä. Kun tämä kymmenen prosentin osuus huomioidaan lämmitysenergian säästönä, saadaan suoraksi takaisinmaksuajaksi 5,1 vuotta.

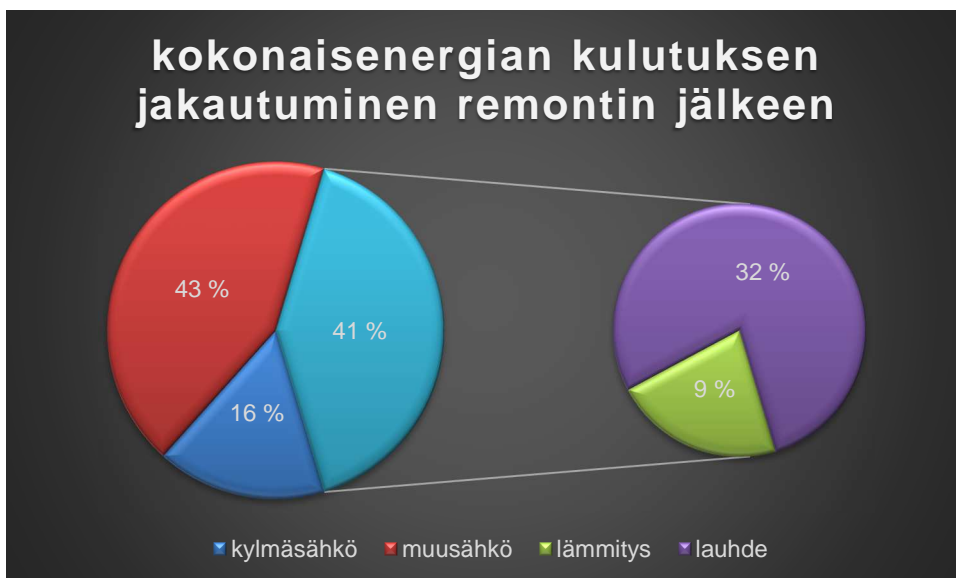
Takaisinmaksuaika jäi muita kohteita pidemmäksi, koska vanha lauhdelämmön talteenottojärjestelmä toimi hyvin ja sen tuottaman lauhdelämmön osuus rakennuksen kokonaisenergiatarpeesta oli suurempi kuin muissa luvuissa esitetyissä kohteissa.

#### 8.4.2 Energian jakautuminen

Vanhalla lauhdelämmön talteenottojärjestelmällä saatiin tuotettua 49 % rakennuksen lämmitysenergian tarpeesta ja saneerauksen jälkeen lauhdelämmön osuus saatiin kasvatettua 78 prosenttiin. Kuvissa 22a–22d näkyy vielä tarkemmin kohteen kokonaisenergian sekä ostoenergian kulutusjakaumat.



Kuva 22a. Kokonaisenergian jakautuminen ennen remonttia.



Kuva 22b. Kokonaisenergian jakautuminen remontin jälkeen.



Kuva 22c. Ostoenergian jakautuminen käyttökohteittain vuonna 2019



Kuva 22d. Ostoenergian jakautuminen käyttökohteittain vuonna 2020

### 8.4.3 Yhteenveto

Myös tässä kohteessa voidaan todeta lauhdelämmön talteenottojärjestelmän saneerauksen parantaneen kiinteistön energiatehokkuutta merkittävästi. Vaikka vanha lauhdelämmön talteenottojärjestelmä olikin saatu viritettyä toimimaan erittäin hyvin, saatiin järjestelmän uusimisella kasvatettua lauhdelämmön osuus kiinteistön lämmitysenergiasta 78 prosenttiin. On hyvä kiinnittää huomiota myös siihen, että ilmanvaihtokoneiden uusimisen yhteydessä niiden lämmityspattereiden toimintalämpötilat muuttuivat mataliksi (45–30 °C). Lisäksi oviverhokojeet on muutettu ilmasulkupuhaltimiksi. Tämän takia ilmanvaihtoverkoston menoveden lämpötila laski 70 asteesta 45 asteeseen. Tällä on suuri merkitys lauhdelämmön hyödyntämisen kannalta. Vastaavaa ilmanvaihdon lämmitysverkoston muutosta ei tehty esimerkkikohteessa kolme, jossa oviverhokojeet oli mitoitettu lämpötilatasolle 70/40.

## 8.5 Supermarket, CO<sub>2</sub>-kylmäjärjestelmä ja paineenkorotus

Viimeinen tarkasteltava kohde on vuonna 2004 rakennettu supermarket. Kohteeseen on uusittu hiilidioksidikylmälaitos vuonna 2016.

Lauhdelämpöä ajettiin aikaisemmin paineenkorotuksen avulla vain lattialämmitysverkostoon. Lauhdetehon osuus kohteen kokonaislämmitystehosta oli vanhassa järjestelmässä vain 15 prosenttia. Vanhan lauhdelämmön talteenottojärjestelmän arvioidaan hyödyntäneen vuodessa 52 MWh lauhdelämpöä. Kohteen muut perustiedot on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. Kohteen perustiedot.

<b>Kohde 5</b>			
<b>Tyyppi:</b>	Supermarket		
Rakennusvuosi:	2004		
<b>Bruttoala:</b>	1988	m <sup>2</sup>	
Lämmitysmuoto:	Kaukolämpö		
<b>Lämmitysteho yhteensä:</b>	<b>348</b>	kW	
Käyttövesi:	140	kW	
IV-/ patterilämmitys	155	kW	
lattialämmitys	53	kW	
	vanha	uusi	
<b>Lauhdelämpöteho yhteensä:</b>	<b>53</b>	<b>172</b>	kW
lattialämmitys	53	53	kW
IV-/ patterilämmitys		119	kW

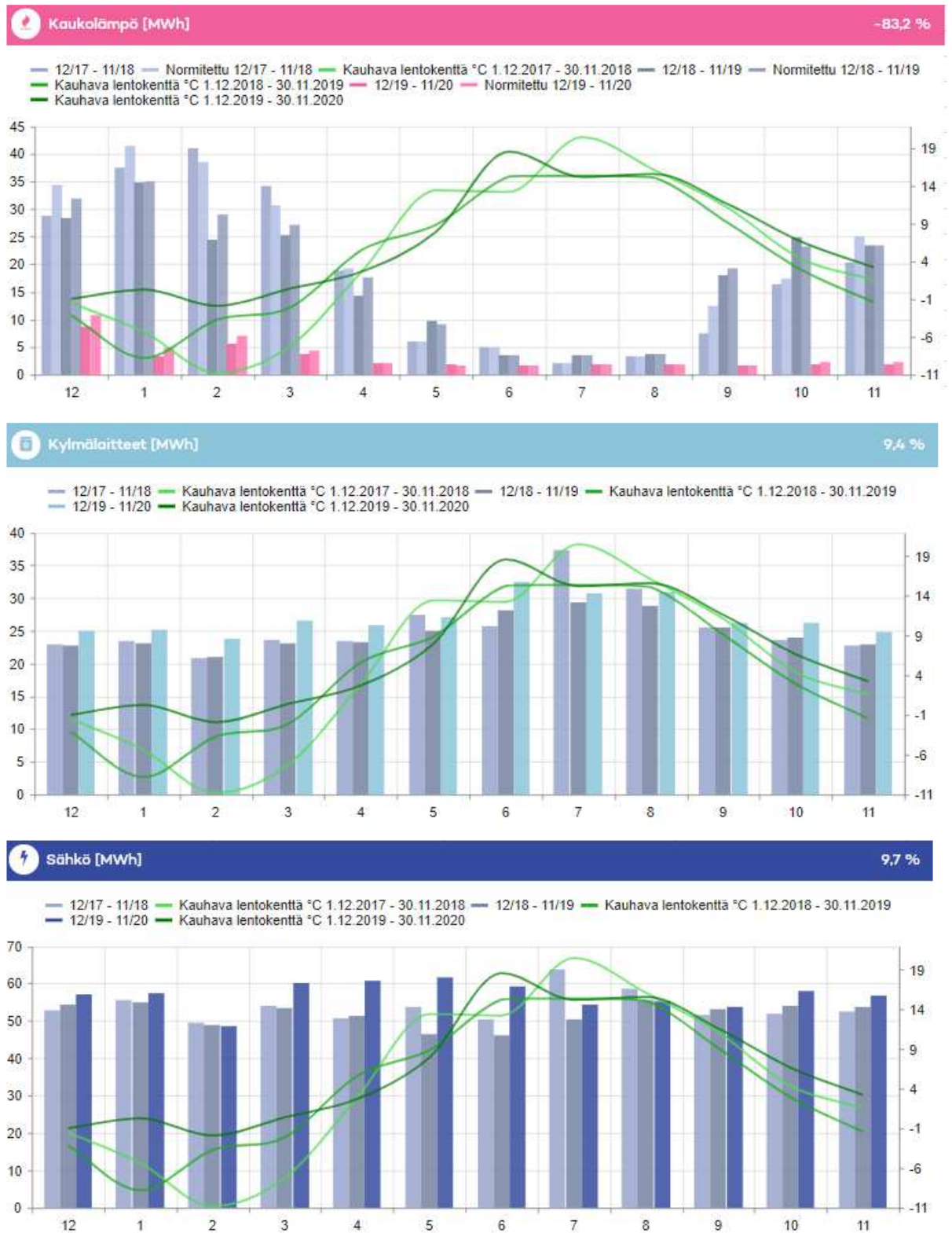
Vuonna 2019 kohteeseen toteutettiin lauhdelämmön talteenottojärjestelmän parannus, jossa kytkentää muutettiin niin, että lauhdelämpöä voidaan hyödyntää lattialämmityksen lisäksi myös kohteen päälämmitysverkostossa, joka palvelee ilmanvaihtolämmitys- ja patteriverkostoa. Näin lauhdelämpöpotentiaali yli kolminkertaistui ja kattaa jo 49 prosenttia kiinteistön kokonaislämmitystehosta.

Myös uusi lauhdelämmön talteenottojärjestelmä toimii pelkällä paineenkorotuksella eikä järjestelmässä ole erillistä lämpöpumppua. Lauhdelämpökytkentä toteutettiin niin, että tulistuslämmön poistosiihtimeltä tuleva kuuma lauhdelämpö

ajetaan suoraan iv- ja patteriverkoston. Tässä lämmitysverkostosta palaava vesi ajetaan puskurivaraajaan, jolla lämmitetään lattialämmitysverkostoa. Näin ilmastoinnin lämmitysverkoston paluu vesi käy vielä viilentymässä lattialämmityspiirissä ja tulistuselämmön poistovaihtimelle palaa viileämpi neste kuin perinteissä kytkennässä. Tämän takia myös kylmäjärjestelmässä kiertävä kylmäaine jäähtyy tehokkaammin ja lauhdelämpöä saadaan enemmän hyödynnettäväksi. Muutoksen budjettihinnaksi arvioitiin 25 000 euroa.

### 8.5.1 Kohteen energiankulutus

Uusi lauhdelämmön talteenottojärjestelmä otettiin käyttöön joulukuussa 2019. Kun uusi järjestelmä oli ollut käytössä vuoden, kaukolämmönkulutus oli pudonnut 83,2 prosenttia. Normeerattuna kaukolämmönkulutus laski 81,3 %. Kylmäjärjestelmän sähkökulutus nousi 9,4 prosenttia, kokonaissähköenergian kulutus kasvoi 9,7 %, kuten kuvasta 23 voidaan todeta.



Kuva 23. Kohteen 5 vuotuiset energian kulutukset ja ulkoilman lämpötilat kuu-  
 kausitasolla.

Jos tarkastellaan kylmäjärjestelmän energian kulutusta lauhdelämmön talteenottojärjestelmän muutoksen ensimmäisen käyttövuoden aikana ja verrataan tämän vuoden energiankulusta kolmen edellisen vuoden energiankulutuksen keskiarvoon, huomataan kylmäsähkön kulutuksen kasvaneen 12,2 prosenttia ja kiinteistön kokonaissähkönkulutuksen kasvaneen 6,8 prosenttia. Kaukolämmönkulutus on pienentynyt 84,2 prosenttia ja kokonaisenergiankulutus on 147 MWh alhaisempi. Koska lauhdelämmön talteenottojärjestelmässä ei ole energiamittareita, muuttuneessa energian kulutuksessa on mukana myös vuosittaiset ulkolämpötilan vaihtelut eikä energiankulutuksen alenema ole kokonaisuudessaan uuden lauhdelämmön talteenottojärjestelmän aikaansaannosta.

Vuoden kylmimpien kuukausien ulkolämpötilan keskiarvojen erot vaikuttavat oleellisesti kaukolämmön kulutukseen ja kohteen 1 osalta havaittiin tämän takia merkittävä ero kaukolämmön kulutuksen vuosivaihteluissa. Vaikka hyödyksi saadun lauhdelämmön määrää verrattiin useamman vuoden keskimääräiseen kaukolämpöenergian kulutukseen, ei vuosien välistä vaihtelua saatu kokonaan tasattua. Tämä takia vain 80 prosenttia kaukolämpöenergian kulutuksen alenemasta huomioidaan lauhdelämmön talteenottojärjestelmän ansioksi. Tätä tarkoittaa, että uuden järjestelmän ansiosta kiinteistö kuluttaa 17 % vähemmän ostoenergiaa kuin aikaisemmin.

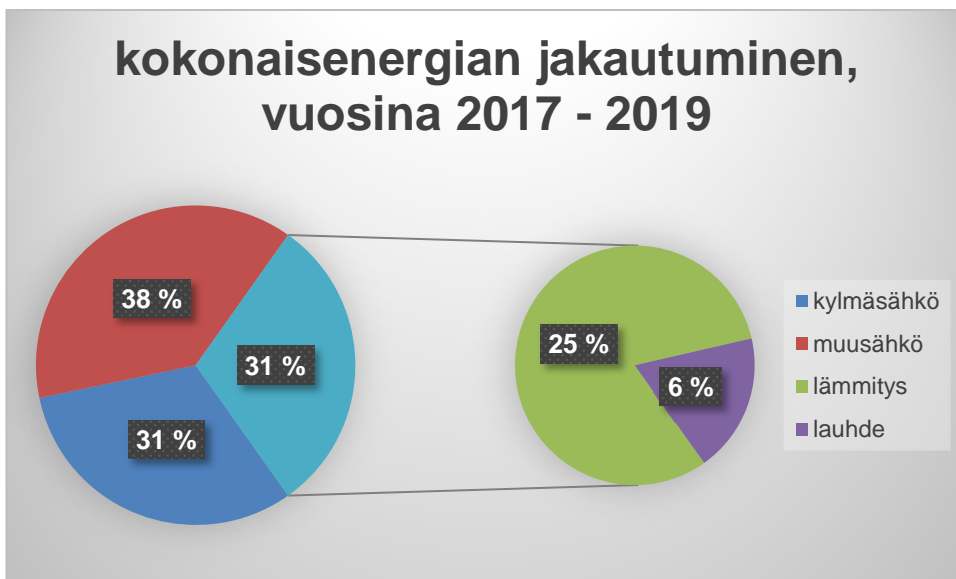
Näin ollen korjatuksi ostoenergian säästöksi saadaan 118 MWh.

Vuositasolla tämä tarkoittaa 9 400 euron säästöä, kun sähkö- ja kaukolämpöenergian hintana käytetään 80 euroa megawattitunnille. Budjettihinnalle laskettuna suoraksi takaisinmaksuajaksi muodostuu 2,65 vuotta.

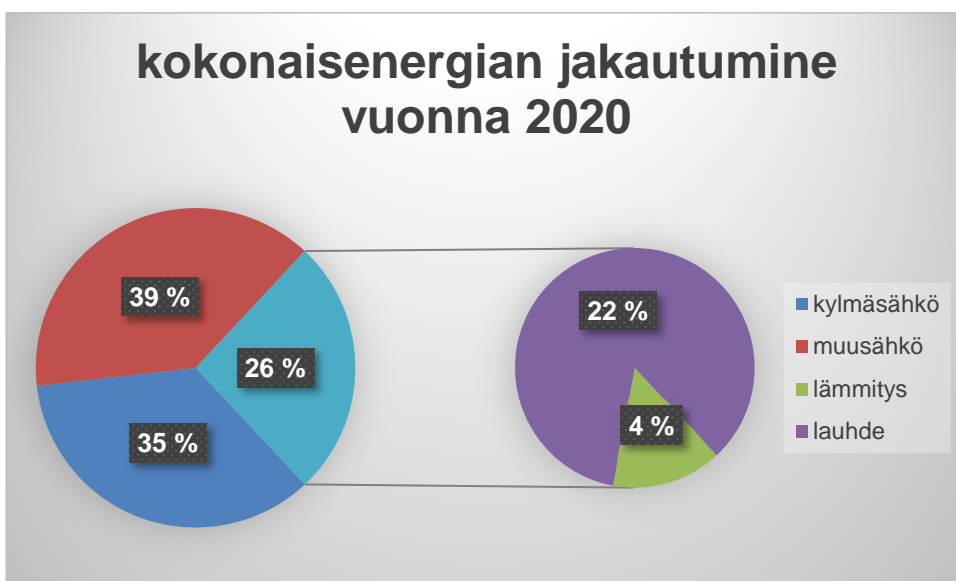
### 8.5.2 Energiankulutuksen jakautuminen

Kuvia 24a ja 24b tarkastelemalla voidaan huomata, että lauhde-energian osuus kohteen kokonaisenergian kulutuksesta oli uuden lauhdelämmön talteenottojärjestelmän ensimmäisenä toimintavuonna 22 %. Hyödynnetyn lauhde-energian

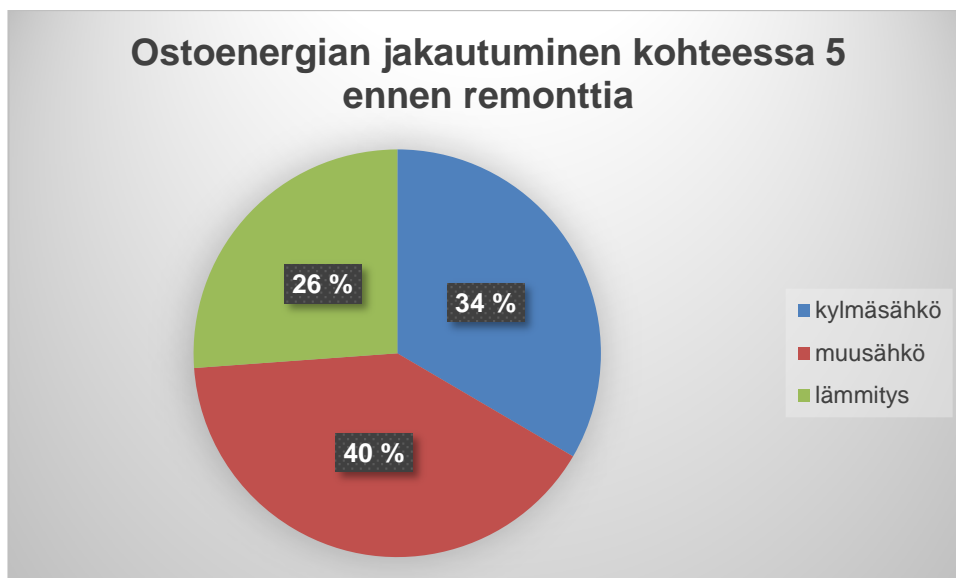
määrä kasvoi lähes nelinkertaiseksi kolmen edellisen vuoden keskiarvoon verrattuna. Kuvissa 24c ja 24d näkyvät kohteen ostoenergiaprofiilit ennen ja jälkeen lauhdelämmön talteenottojärjestelmän muutosta.



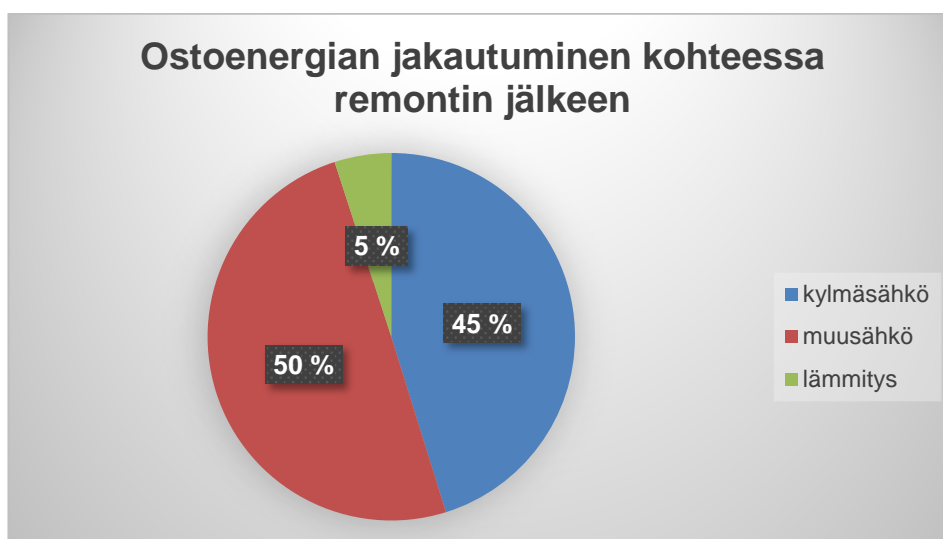
Kuva 24a. Vuotuisen kokonaisenergian keskimääräinen jakautuminen käyttökohteittain, 12/2016–11/2017; 12/2017 – 11/2018; 12/2018–11/2019.



Kuva 24b. Vuotuisen kokonaisenergian jakautuminen käyttökohteittain, 12/2019–11/2020.



Kuva 24c. Vuotuisen ostoenergian keskimääräinen jakautuminen käyttökohteittain, vuosina 12/2016–11/2017; 12/2017–11/2018; 12/2018–11/2019.



Kuva 24d. Vuotuisen ostoenergian jakautuminen käyttökohteittain, 12/2019–11/2020.

### 8.5.3 Yhteenveto

Tässäkään tapauksessa vanha lauhdelämmön talteenottojärjestelmä ei pystynyt käyttämään lauhdelämpöä tehokkaasti hyödyksi rakennuksen lämmityksessä. Toisaalta vanhan järjestelmän mitoituksessa on voitu käyttää liian pientä mitoitustehoa. Todellisuudessa kylmälaitokselta saatavan lauhdelämmön määrä on ollut paljon suurempi kuin alkuperäisessä mitoituksessa on ajateltu. Alkuperäinen ajatus lauhdelämmön hyödyntämisestä lattialämmityksen kautta on kuitenkin

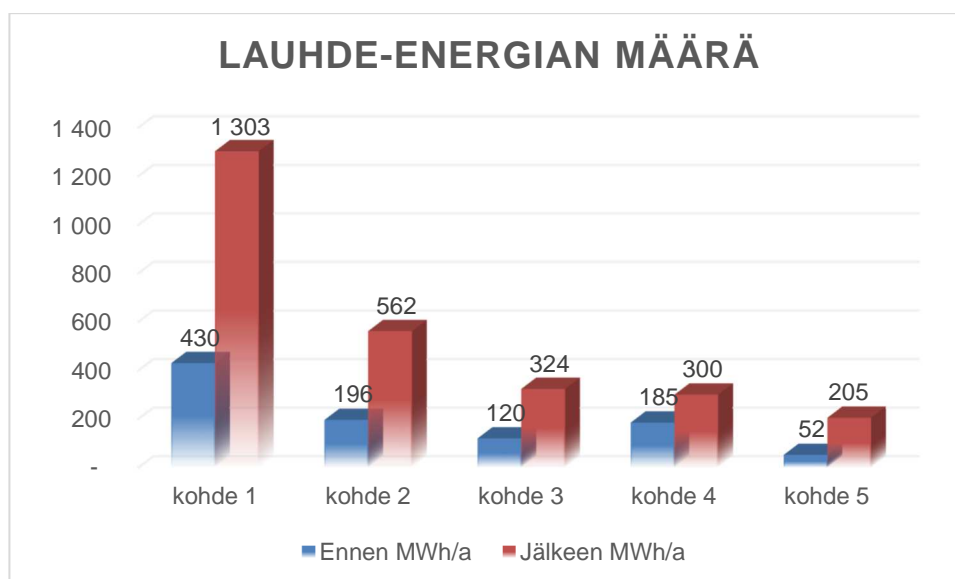
kin erinomainen ja pienillä muutoksilla jopa 79 % rakennuksen lämmitysenergiasta saatiin katettua lauhdelämmöllä. Jos myös käyttöveden osuus otetaan huomioon, putoaa lauhdelämmön osuus kokonaislämmitysenergiasta 72 prosenttiin.

Voidaankin todeta, että paineenkorotus on erittäin hyvä vaihtoehto, ainakin pienemmissä myymälöissä. Pienissä myymälöissä lauhdelämpöä on vähemmän saatavilla, eikä lämpöpumppujärjestelmä ole korkeamman investointikustannuksensa ja pidemmän takaisinmaksuaikansa takia aina järkevä ratkaisu.

Pienemmissä myymälöissä kylmäjärjestelmän tehon suhde kokonaislämmitystehtoon on korkea, joten lämpöpumpun kompressorin tuottamaa lisälämmitystehoa ei välttämättä tarvita. Paineenkorotusta käytettäessä, on tärkeää varmistaa, että jäähtymä tulistuselämmön poistovaihtimen yli on suuri ja lisäksi lämmitysverkostojen toimintalämpötilojen on hyvä olla matalat, jotta ostoenergiaa tarvitaan vasta kovemmilla pakkasilla.

## 9 Lopputulokset

Luvussa 8 tarkasteltiin viiden marketkohteen mitattuja energiankulutuksia ennen ja jälkeen lauhdelämmön talteenoton parannusprojektin. Kohteista yksi oli hypermarket ja loput neljä olivat supermarketkohteita. Kuvassa 25 on esitetty kohteiden lauhdelämmön talteenottojärjestelmän avulla hyödynnetty energiamäärä vuositasolla ennen ja jälkeen lauhdelämmön talteenottojärjestelmän parannuksen.

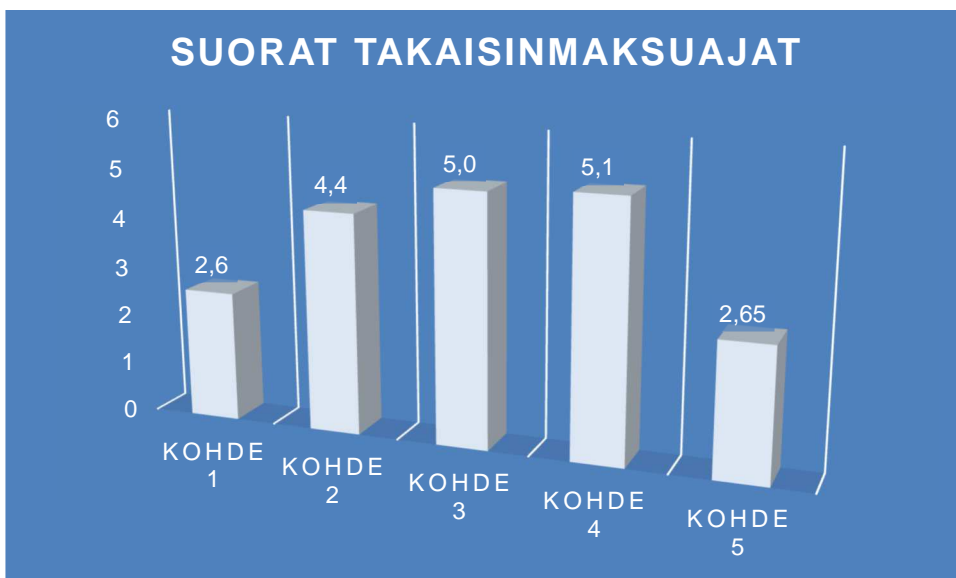


Kuva 25. Lauhdelämmön talteenottojärjestelmän kautta hyödynnetty energia ennen ja jälkeen järjestelmän parannusta (MWh/a).

Kaikissa kohteissa kaupan kylmäjärjestelmän lauhdelämmön osuutta rakennuksen kokonaislämmitysenergian tarpeesta saatiin kasvatettua merkittävästi. Kohteissa 1–3, hyödynnettiin kylmäjärjestelmän lauhtumispaineen korotuksen lisäksi lämpöpumppuja ja kohteissa 4 ja 5 pelkästään kylmäjärjestelmän lauhtumispaineen korotusta. Kohteiden välillä oli suuri eroja siinä, kuinka tehokkaasti lauhdelämpöä oli hyödynnetty ennen lauhdelämmön talteenottojärjestelmän uusimista.

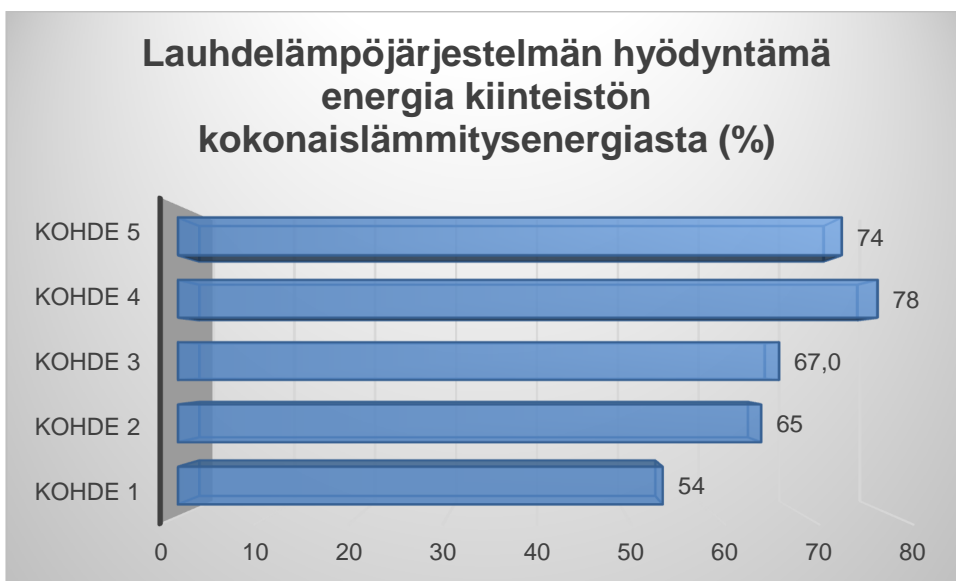
Parannuksen jälkeen hypermarketin lämmitysenergiakulutuksesta 54 prosenttia pystyttiin kattamaan kaupankylmäjärjestelmän hukkalämmöllä. Supermarket kokuokassa hukkalämmön osuus vaihteli parannuksen jälkeen 65–78 prosenttiin kokonaislämmitysenergiatarpeesta.

Lauhdelämmön talteenottojärjestelmien parantamisinvestointien suorat takaisinmaksuajat on esitetty kuvassa 26. Takaisinmaksuajat vaihtelevat välillä 2,6–5,1 vuotta. Suurimmissa kohteissa päästään tyypillisesti lyhyempiin takaisinmaksuajoihin.



Kuva 26. Kohteiden lauhdelämmön talteenottoprojektien investointien suorat takaisinmaksuajat vuosina.

Kuvassa 27 on esitetty, kuinka suuri osa kiinteistön kokonaislämmitysenergiasta voidaan kattaa lauhdelämmön talteenottojärjestelmän tuottamalla energialla.



Kuva 27. Lauhdelämmön talteenottojärjestelmien hyödyntämän lämpöenergian osuus kokonaislämmitysenergiasta (%).

## 10 Päätelmät

### 10.1 Paras tapa toteuttaa lauhdelämmön talteenotto

Lauhdelämmön talteenottojärjestelmän toteuttamisessa on kaksi koulukuntaa niin sanotut ”paineenkorottajat” ja ”lämpöpumppujaos”. Lisäksi lämpöpumppujaoksen sisällä on havaittu olevan näkemyseroja siitä, kannattaako kylmäprosessia alijäähdyttää kesällä vai ei.

Lopputyötä kirjoittaessa kävi varsin selväksi, että vain yhtä parasta tapaa ei ole olemassa eikä keskustelu tapojen paremmuudesta ei ole edes mielenkiintoinen. Kuten luvussa 9 esitetyistä lopputuloksista selviää, molemmille tavoille löytyy omat käyttökohteensa. Oikein rakennettuina lauhde-energialla voidaan saneerauskohteessa kattaa karkeasti 2/3 rakennuksen kokonaislämmitysenergian tarpeesta.

Lauhdelämmön talteenottotapaa tärkeämmäksi kysymykseksi nousee se, mihin verkostoihin ja miten laajasti lauhdelämpöä käytetään. Tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että mitä suppeammin lauhdelämpöä hyödynnettiin rakennuksen lämmitysverkostoissa, sitä alhaisemmaksi lauhde-energian osuus jäi kokonaislämmitysenergian kulutuksesta. Asia kuulostaa itsestään selvältä, mutta jostain syystä esimerkkikohteissa olevien vanhojen lauhdelämmön talteenottojärjestelmien joukossa oli liian pienillä lauhdelämpötehoilla toteutettuja järjestelmiä, jotka eivät käyttäneet lauhdelämpöä tehokkaasti hyväkseen. Kokemuspärisesti voidaan todeta, että lauhdelämpöä kannattaa hyödyntää koko rakennuksen lämmitykseen (space heating) eli siis kaikkiin lämmitysverkostoihin. Käyttöveden lämmittämiseen kuluvan energian määrä ei ole market-kohteissa merkittävä, joten käyttöveden lämmittämisestä lauhdelämmöllä saatava kokonaisyöty on arvioitu pieneksi.

Kun lauhdelämpöputkisto joka tapauksessa rakennetaan kylmäkoneikolta lämmönjakohuoneeseen, ei sillä, hyödynnetäänkö lauhdelämpöä yhdessä, kahdessa vai kaikissa lämmitysverkostoissa, ole investointikustannusten näkökulmasta suura merkitystä. Kun arvioidaan lauhdelämmön hyödyntämisen laajentamisen lisäkustannukseksi toisessa lämmitysverkostossa 3 000 euroa ja tarkastellaan työssä tutkittujen kohteiden verkostokohtaisia energiamääriä, saadaan lauhdelämmön laajentamisen suoraksi takaisinmaksuajaksi ylimääräisen lämmitysverkostoon keskimäärin 1,07 vuotta.

Lisäksi kylmäjärjestelmän tulislämmön poistovaihtimen liian pieni tehomitoitus voi muodostua pullonkaulaksi ja pienentää hyödyksi saatavan lauhdelämmön määrää. Tulislämmön poistosiirtimen vaihtamiskustannuksen on kokemukseräisesti arvioitu olevan noin 8 000 euroa, ja työ maksoi itsensä takaisin energian säästönä kahdessa vuodessa [59].

#### 10.1.1 Lämpöpumppu ja paineenkorotus

Mikäli kiinteistön lämmitysverkostojen lämpötilatasot ovat korkeat, esimerkiksi 70/40 °C, kahden erillisen tulislämmön poistovaihtimen sekä lämpöpumpun yhdistelmä on suositeltava ratkaisu. Näin lauhdelämmön talteenottojärjestelmällä saadaan katettua mahdollisimman suuri osa rakennuksen lämmityksestä. Tämä korostuu erityisesti suurissa kohteissa, joissa lauhdelämmön osuus kokonaislämmitysenergian kulutuksesta jää lähemmäs 50 % kokonaisenergian tarpeesta.

Tässä ratkaisussa ensimmäisen tulislämmön poistovaihtimen talteen ottama korkeamman lämpötilatason lauhde-energia hyödynnetään suoraan ja lämpöpumppu korottaa jäljelle jäävän lauhde-energian korkeampaan lämpötilatasoon niin, että myös se voidaan hyödyntää rakennuksen lämmityksessä.

### 10.1.2 Paineenkorotus

Jos kohteen lämmitysjärjestelmien lämpötilatasot ovat matalammat esimerkiksi 45/30 °C, on paineenkorotus hyvä ratkaisu eikä lämpöpumppua tarvita. Paineenkorotusta käytettäessä on erityisen tärkeää saada hyvä jäähtymä tulistuslämmön poistovaihtimen yli. Hyviä keinoja jäähtymän parantamiseen on ajaa lauhdelämpö kahden eri verkoston läpi niin, että jäähtymä saadaan mahdollisimman suureksi.

Kohteessa 5 lauhdelämpö ajettiin ensin patteri- ja sen jälkeen lattialämmitysverkostoon. Kohteessa 4 lauhdelämpö ajettiin ensin ilmanvaihtoverkostoon ja sen jälkeen ilmanvaihdon esilämmitykseen. Molemmissa kohteissa lauhdelämmön talteenottojärjestelmä oli saatu viritettyä toimimaan tehokkaasti. Toinen hyvä keino jäähtymän parantamiseen on varmistaa energiavaraajan mahdollisimman hyvä kerrostuma. Tässä voidaan käyttää erillisten lämmöntasauslevyjen lisäksi joko kahta erillistä energiavaraajaa ja/tai kolmeputkikytkentää, joka varmistaa hyvän lämpötilakerrostuman varaajassa.

### 10.1.3 Alijäähdytys

Kirjallisuudessa on tuotu selkeästi esille, että alijäähdyttämällä kylmäprosessia saadaan hiilidioksidikylmälaitoksen hyötysuhdetta parannettua Etelä-Euroopan lämpimässä ilmastossa [31, 39, 52 ja 53].

Siitä kuinka paljon kylmäprosessin alijäähdytys lopulta alentaa kiinteistön kokonais sähköenergian kulutusta, ei saatu täyttä varmuutta. Asiaa pitäisi tutkia lisää ajamalla kohteen 3 lauhdelämmön talteenottojärjestelmää ja kylmäjärjestelmää esimerkiksi kahden viikon vertailujakson ajan ensin ilman alijäähdytystä ja sitten alijäähdytyksen kanssa. Näiden ajanjaksojen energiankulutustietoja vertailemilla saataisiin tarkasti selville kylmäprosessin alijäähdyttämisen vaikutus kiinteistön sähköenergian kokonaiskulutukseen.

## 10.2 Kuinka suuri osa lauhdelämmöstä voidaan hyödyntää?

Miten paljon lauhdelämpöä voidaan hyödyntää, on mielenkiintoinen kysymys. Varsinkin, jos ajatellaan kesällä syntyvän hukkalämmön hyödyntämistä tulevaisuudessa. Tutkituissa kylmäjärjestelmissä ei ollut erillisiä energiamittareita, jotka mittaisivat kylmäjärjestelmän lauhde-energian määrää. Tällainen mittaus olisi kyllä mahdollinen toteuttaa, mutta mittareiden korkean hankintahinnan takia niitä ei ole otettu yleisesti käyttöön, joten asiaa lähestytään järjestelmän sähkönkulutuksen kautta.

Oletetaan, että rakennusta ei tarvitse lämmittää kesäkuun alusta syyskuun loppuun jatkuvalla aikajaksolla. Siten tuona aikana syntyvää lauhdelämpöä ei voida hyödyntää rakennuksen lämmityksessä. Kohteen 2 osalta saatiin selville, että näiden neljän kuukauden osuus kylmälaitoksen koko vuoden sähköenergian kulutuksesta on 40 %. Tämä osuus lauhteesta menee tällä hetkellä hukkaan, joten tällä hetkellä yhden vuoden aikana syntyvästä **lauhdelämmöstä hyödynnetään 60 %**.

### Kiinteistön hiilinegatiivien energiakulutusprofiili

S-ryhmän tavoite on olla hiilinegatiivinen jo vuonna 2025. Tällä hetkellä kaikki S-ryhmän käyttämä sähkö on päästötöntä. Lähes 90 % sähköstä on uusiutuvaa, ja loput sähköenergiasta on kompensoitu päästösertifikaateilla. Siten kun saamme vielä lämmitysenergian päästöttömäksi, alamme olla lähellä hiilinegatiivisuutta. Seuraavassa esitetään tähän yksi tapa.

Palataan hetkeksi luvussa 10.2 esitettyyn esimerkkikohteen kylmäjärjestelmän kesäajan sähkönkulutukseen. Tuona neljän kuukauden aikajaksona ulkoilman keskilämpötila oli 15,9 astetta. CO<sub>2</sub>-kylmälaitoksen arvioidaan toimivan tuossa ulkolämpötilassa hyötysuhteella 3,0 [31, s. 181]. Näin ollen sähköenergian kulutuksen kautta laskettava lauhde-energian määrä kesällä olisi keskikokoisessa supermarketissa 538 MWh. Jos käytetään Fortumin Espoon alueen avoimen

kaukolämmön ostohintaa, 16 €/MWh, saadaan kesäaikaisen hukkalämmön arvoksi 8 600 euroa [60].

Myymällä tämä hukkalämpö kaukolämpöyhtiölle voitaisiin vuodessa kompensoida 180 tonnia lämmitysenergian tuotannosta aiheutuvia CO<sub>2</sub>-päästöjä, kun käytetään Fortumin vuoden 2019 kaukolämmön tuotannon keskimääräistä CO<sub>2</sub>-päästöä kilowattituntia kohden [61].

Viime vuonna 180 000 kilon hiilidioksidipäästöjen kompensointi on maksanut keskimäärin 3 600 euroa (20 €/1 000 kg, CO<sub>2</sub>) [62]. Tosin kompensoinnin kustannus on nousussa. Jos päästöjä kompensoitaisiin myymällä hukkalämpöä kaukolämpöyhtiölle, muuttuisi negatiivinen kassavirta positiiviseksi.

Tarkastellaan vielä kohteen kaksi kaukolämmön kulutusta vuonna 2020. Tarkastelun perusteella kaukolämmön kulutus on ollut pienempi kuin kylmäjärjestelmän kesällä tuottaman hukkalämmön määrä. Toisin sanoen käyttämällä hyödyksi kylmäjärjestelmän kesällä tuottama hukkalämpö voisi olla mahdollista saada kohteen energiankäyttöprofiili hiilinegatiiviseksi.

Uusiutuvan energiankäytön direktiivi [6] velvoittaa Suomea ottamaan heinäkuussa 2021 käyttöön lämpöenergiaa koskevan alkuperätakuujärjestelmän, jonka piiriin myös hukkalämpö kuuluisi. Asian eduskuntakäsittely on viivästynyt, laki tulee voimaan vasta 1.11.2021 [66]. Tämän hetkisessä lakiluonnoksessa palvelualalla sivutuotteena syntyvä lämpö, joka johdetaan kaukolämpöjärjestelmään, kuuluisi alkuperätakuujärjestelmän piiriin [63, s. 32].

### 10.3 Paljonko ostoenergiankulutusta voidaan pienentää?

Ennen työn kirjoittamisen aloittamista oli esitetty laskennallisia arvioita siitä, kuinka suuri osa kiinteistön kokonaisenergiankulutuksesta lauhdelämmöllä voidaan kattaa. Perinteisissä lauhdelämmön talteenottojärjestelmässä, jossa lauhdelämpöä hyödynnetään kylmäjärjestelmän lauhtumispainetta korottamalla, lauhdelämmön osuuden *kokonaislämmitysenergiasta* on arvioitu olevan 33 %.

Mikäli lauhdelämmön talteenottojärjestelmässä käytetään lämpöpumppua, lauhde-energian osuuden arvioitiin olevan 73 % [64].

Kirjallisuudessa on esitetty sekä laskelmia että mittaustuloksia siitä, että CO<sub>2</sub>-booster-laitoksen lauhdeella voitaisiin kattaa 40 % rakennuksen lämmitysenergian kulutuksesta [37, s. 634; 65, s. 549].

Luvussa 10 esitettyjen lopputulosten perusteella voidaan todeta, että lauhdelämmöllä saatiin katettua, esitettyjä arvioita, suurempi osuus rakennuksen lämmitysenergian tarpeesta. Erityisesti kylmäjärjestelmän lauhtumispainetta korottamalla päästiin ennakko-olettamusta suurempaan lauhde-energian osuuteen. Se kuinka suuri osa rakennuksen kokonaislämmitysenergiasta saadaan katettua lauhdeella, riippuu paljon kohteen koosta sekä lämmitysverkostojen toimintalämpötiloista. Lisäksi vuosittaiset ulkolämpötilan vaihtelut vaikuttavat paljon siihen kuinka paljon ostoenergiaa tarvitaan. Alla on esitetty mittaustuloksien perusteella lasketut arviot siitä, kuinka suuri osuus erikokoisten markettien kokonaislämmitysenergian kulutuksesta lauhdelämmön talteenottojärjestelmällä voidaan kattaa.

**Hypermarket**-kokoluokassa hyvällä lauhdelämmön talteenottojärjestelmällä voidaan kattaa **yli 50 %** kokonaislämmitysenergian tarpeesta.

**Suuremmissa supermarketeissa**, yli 3 500 bruttoneliötä, lauhdelämmöllä saadaan katettua **yli 65 %** kokonaislämmitysenergian tarpeesta.

**Pienissä** alle 2 000 bruttoneliön **supermarketeissa** saadaan lauhdelämmöllä katettua jopa **yli 75 %** kokonaislämmitysenergian tarpeesta.

#### 10.4 Millä kylmälaitoksella on kokonaistaloudellisesti paras lauhdelämpöpotentiaali?

Tähän kysymykseen ei saatu vastausta kohteiden mitattujen energiankulutustietojen perusteella, koska sopivaa vertailukohdetta, joka olisi toteutettu waterloop-kylmäjärjestelmällä, ei löytynyt.

Kirjallisuuden ja sekä rakennettujen kohteiden käyttökokemusten perusteella vaikuttaa siltä, että CO<sub>2</sub>-booster-laitteisto on omakoneellista kylmäjärjestelmää energiatehokkaampi ratkaisu erityisesti lauhdelämmön talteenottoa ajatellen, kuten luvussa 3.4.1 todetaan [12, 41 ja 59].

## 10.5 Mitä tutkitaan seuraavaksi?

Sen lisäksi että kylmäprosessin alijäähdytystä lämpöpumpun avulla olisi mielenkiintoista tutkia mitatun energiankulutuksen kautta, olisi kesäaikaisen hukkalämmön hyödyntämisen edistäminen myös mielenkiintoinen aihe. Uskon, että kesäaikaisen hukkalämmön hyötykäyttö tulee lisääntymään vuosikymmenen loppuun mennessä. Lisäksi olisi mielenkiintoista tutkia, kuinka suuri osuus uudiskohteen kokonaislämmitysenergian tarpeesta voidaan kattaa lauhdelämmöllä. Jos saneerauskohteessa päästään parhaimmillaan lähes 80 %:n osuuteen, mitä pitäisi tehdä, jotta uudiskohteessa päästään 90 %:iin?

## Lähteet

- 1 Laine Arttu. 2020. Päivittäistavarakauppa 2020. Päivittäistavarakauppa ry (PTY).
- 2 Elorinne Ari. 2020. Lauhdelämmönhyödyntäminen kaupoissa ja kiinteistöissä. Seminaariesitys. Kylmäpäivät 2020, Knowtek.
- 3 Sutinen Arttu. 2020. Energiavuosi 2019 Kaukolämpö. Energiateollisuus ry
- 4 Laine Arttu. 2019. Päivittäistavarakauppa 2019. Päivittäistavarakauppa ry (PTY).
- 5 Rämä Miika & Krzysztof Klobut. 2020. Hukkalämpö kaukolämpöjärjestelmissä. Asiakasraportti. Teknologian tutkimuskeskus VTT. Energiateollisuus ry.
- 6 Tajani Antonio & Bogner-Strauss Juliane. 2018. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian käytön edistämisestä (EU) 2018/2001. Euroopan unionin virallinen lehti.
- 7 Pirttinen Valtteri. 2014. Selvitys ilmaisenergian hyödyntämisteknologioista. Raportit ja selvitykset. Lapin ammattikorkeakoulu.
- 8 Schulz Martin & Mavroyiannis Andreas D. 2012. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi energiatehokkuudesta 2012/27/EU. Euroopan unionin virallinen lehti.
- 9 Kortesoja Pauli. 2015. Kylmälaitosten lauhdutuslämmön talteenotto ja hyödyntäminen. Raportti. Thermopolis.
- 10 Marjakangas Jukka. 2019. Ylivieskan jäähallin jäähdytyslaitteiston lauhdelämmön hyötykäytön tehostaminen. Opinnäytetyö. Centria-ammattikorkeakoulu, Theseus-tietokanta.
- 11 Kalliojärvi Jukka. 2020. Päivittäistavaraliikkeiden kylmälaitosten rakentaminen lainsäädännön murroksessa. Opinnäytetyö (YAMK). Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Theseus-tietokanta.
- 12 Karppinen Eerik. 2016. Euroopan unionin kylmäainelainsäädännön vaikutukset pienen kokoluokan markettien kylmäntuoton teknisiin sovellutuksiin ja energiatehokkuuteen. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto, Trepo-tietokanta.
- 13 Isoaho Toni. 2016. Lämpöpumppukytkentöjen simulointi kaukolämpöverkossa. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto, Trepo-tietokanta.

- 14 Muuronen Mikko. 2016 Hiilidioksidin (CO<sub>2</sub>) käyttö kylmäaineena, kylmä-laitostyyppit ja kylmlaitoksen mitoitus. Insinööriyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu, Theseus-tietokanta.
- 15 Hassinen Aleks. 2018. Päivittäistavarakauppojen lämmöntalteenoton vertailu booster-kylmlaitoksissa. Kandidaatintyö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, LUTPub-tietokanta.
- 16 Niemelä Oona. 2019. Energiatohokkuuden parantaminen päivittäistavara-kauppojen kylmäjärjestelmien uusimisen yhteydessä. Diplomityö. Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT, LUTPub-tietokanta.
- 17 Manner Kaijaleena. 2013. Hiilidioksidikylmlaitoksen ja maalämpöjärjestelmän optimointi liikennemyymäläkiinteistössä. Diplomityö. Tampereen Teknillinen Yliopisto, Trepo-tietokanta.
- 18 Peltola Tuomo. 2013. Hiilidioksidia kylmäaineena käyttävien markettien lämmitys. Opinnäytetyö. Mikkelin ammattikorkeakoulu, Theseus-tietokanta.
- 19 Tapio Ville. 2020. Kaupan kylmäjärjestelmän sähköinen huipputeho (CO<sub>2</sub> -booster). Insinööriyö (YAMK). Metropolia Ammattikorkeakoulu, Theseus-tietokanta.
- 20 Mäkitalo Miikka. 2015. Hiilidioksidikylmäjärjestelmän energiaseuranta ja toiminnan kehittäminen lähikaupassa. Opinnäytetyö. Lapin ammattikorkeakoulu, Theseus-tietokanta.
- 21 Uljas Matti. 2017. Kylmlaitokseen liitettyjen energiakaivojen toiminta ja lauhdelämmön lataaminen kalliooperään. Opinnäytetyö. Lapin ammattikorkeakoulu, Theseus-tietokanta.
- 22 Helander Mikko. 2020. Kesko vuosiraportti kestäväkehitys 2019. Kesko Oyj.
- 23 Tapaustutkimus. Verkkoaineisto. Virtuaali yliopisto. <[http://www.uiah.fi/virtu/materiaalit/tuotetiede/html\\_files/14111\\_to-tea.html](http://www.uiah.fi/virtu/materiaalit/tuotetiede/html_files/14111_to-tea.html)>. Luettu 18.2.2021.
- 24 S-ryhmän hiilinegatiivisuustavoitteet. Verkkoaineisto. S-ryhmä. <<https://s-ryhma.fi/uutinen/suomen-kunnianhimoisimmat-ilmastotavoitteet-s-ryhm/KDDak73zIKtTYJIPgl5Dd>>. Luettu 10.2.2021.
- 25 Siekkinen Mika. 2019. R404A kylmäaineen korvaaminen huoltokylmäaineella. Opinnäytetyön. Savonia-ammattikorkeakoulu, Theseus-tietokanta.
- 26 Laine Toni. 2014. Hypermarkettien lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmien energiatohokkuus. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto, Trepo-tietokanta.

- 27 Siikanen Vilma. 2010. Lämpöpumppu kaupan kylmäjärjestelmän lauhdelämmön talteenotossa – kaksi esimerkkikohdetta. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto, Trepo-tietokanta.
- 28 Pieviläinen Heikki. 2020. Lauhdelämmön hyödyntäminen päivittäistavara-kaupassa. Opinnäytetyö. Karelia ammattikorkeakoulu, Theseus-tietokanta.
- 29 Vepsäläinen Joni. 2015. Elintarvikemyymälän sisäilman kuivatus. Insinööriö. Metropolia Ammattikorkeakoulu, Theseus-tietokanta.
- 30 Löfgrén Arttu. 2015. Kaupan energiaintensiivisten järjestelmien hankintavertailu elinkaarikustannuslaskennan avulla. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto, Trepo-tietokanta.
- 31 Sawalha Samer, Piscopiello Salvatore, Karampour Mazyar ym. 2016. Field measurements of supermarket refrigeration systems. Part II: Analysis of HFC refrigeration systems and comparison to CO<sub>2</sub> transcritical. Applied Thermal Engineering 111, s. 170–182.
- 32 S-market Espoon keskus ja Nurmijärvi. 2021. Energiankulutustiedot sähkönkulutus. EnerKey energianhallintajärjestelmä.
- 33 Transcritical CO<sub>2</sub> Systems Market. Verkkoaineisto. MarketsandMarkets Research Private Ltd. <<https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/transcritical-co2-market-201387678.html>>. Luettu 19.2.2021.
- 34 Global Transcritical CO<sub>2</sub> Market Size. Verkkoaineisto. <<https://www.verifiedmarketresearch.com/product/transcritical-co2-market/>>. Verified Market Research. Luettu 19.2.2021.
- 35 Zumbrunnen Fabrice. 2020. Migros Facts & Figures 2019. Federation of Migros Cooperatives (FCM).
- 36 Zumbrunnen Fabrice. 2020. Migros Annual Report 2019 – Energy and Climate. Federation of Migros Cooperatives (FCM).
- 37 Sawalha Samer, Karampour Mazyar & Rogstam Jörgen. 2015. Field measurements of supermarket refrigeration systems. Part I: Analysis of CO<sub>2</sub> trans-critical refrigeration systems. Applied Thermal Engineering 87, s. 633– 647.
- 38 Hafner Armin & Hemmingsen A.K. 2015. R744 refrigeration technologies for supermarkets in warm climates. Proceedings of the 24th IIR International Congress of Refrigeration.
- 39 Gullo Paride, Elmegaard Brian & Cortella Giovanni. 2016. Energy and environmental performance assessment of R744 booster supermarket refrigeration systems operating in warm climates. International Journal of Refrigeration 64, s. 61–79.

- 40 Alke Marco. 2017. Vermessung eines Prototypen einer Luft-WasserHochtemperaturwärmepumpe mit dem Kältemittel R744. Diplom. Compact Kältetechnik GmbH, Studienrichtung: Versorgungs- und Umwelttechnik.
- 41 Migros testing propane water-loop systems. Verkkojulkaisu. Hydrocarbons21.com. <[http://hydrocarbons21.com/articles/8564/migros\\_testing\\_propane-\\_water-\\_loop\\_systems](http://hydrocarbons21.com/articles/8564/migros_testing_propane-_water-_loop_systems)>. Luettu 23.2.2021.
- 42 Espo Pasi. 2014. Pienen myymälän hiilidioksidikylmän lämmöntalteenotto. Opinnäytetyö. Mikkelin ammattikorkeakoulu, Theseus-tietokanta.
- 43 Sawalha Samer. 2013. Investigation of heat recovery in CO2 trans-critical solution for supermarket refrigeration. International journal of refrigeration 36, s. 145–156.
- 44 Madsen Kenneth B. 2021. Paineenkorotuksen käyttö lauhdelämmön talteenotossa. Advansor. Sähköpostikirjeenvaihto. 19.4.2021.
- 45 Sawalha Samer & Chen Yang. 2010. Investigations of Heat Recovery in Different Refrigeration System Solutions in Supermarkets. Effsys2 project final report. Royal Institute of Technology (KTH).
- 46 Antikainen Pasi. 2011. Lämpöpumppujärjestelmät integroidussa kylmä- ja lämpötehon tuotossa. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, LUTPub-tietokanta.
- 47 Thermia AB. 2020. Technical description Mega 2020. Tekninen kuvaus.
- 48 Kohde 1. Energian kulutustiedot. Enerkey-energianhallintajärjestelmä. 2021.
- 49 Kohde 3. Energian kulutustiedot. Enerkey-energianhallintajärjestelmä. 2021.
- 50 Esimerkkikohteet As Oy Munkkiniemen puistotie ja Alepa Kivistö. 2021.
- 51 Kohde 2. Energian kulutustiedot. Enerkey-energianhallintajärjestelmä. 2021.
- 52 Bellos Evangelos & Tzivanidis Christos. 2019. A comparative study of CO2 refrigeration systems. Energy Conversion and Management: X 1 (2019).
- 53 Llopis Rodrigo, Cabello Ramon, Sánchez Daniel & Torrella Enrique. 2015. Energy improvements of CO<sub>2</sub> transcritical refrigeration cycles using dedicated mechanical subcooling. International journal of refrigeration 55, s. 129–141.
- 54 S-market Malmi 2020. Hiilidioksidikoneiston toteutunut sähkönkulutus. Enekey-energianhallintajärjestelmä.

- 55 Bitzer-kompressorin mitusohjelma, BITZER Software v6.17.2 rev2594. 2020
- 56 Kohde 2. Energian kulutustiedot päivä / yö. Enerkey-energianhallintajärjestelmä. 2021.
- 57 Kohde 4. Energian kulutustiedot. Enerkey-energianhallintajärjestelmä. 2021.
- 58 Kohde 5. Energian kulutustiedot. Enerkey-energianhallintajärjestelmä. 2021.
- 59 Tauriainen Hannu. 2021. Lauhdelämmönhyödyntäminen market-kiinteistöissä. Puhelinkeskustelu. SOK Kiinteistöässä. 18.5.2021.
- 60 Avoin kaukolämpö ostohinnat. Verkkoaineisto. Fortum Oyj. <<https://www.fortum.fi/yrityksille-ja-yhteisöille/lammitys-ja-jaahdytys/kaukolampo/avoin-kaukolampo/avoin-kaukolampo-ostohinnat>>. Luettu 15.5.2021.
- 61 Kaukolämmön tuotannon hiilidioksidin ominaispäästöt ja tuotantojakauma. Verkkoaineisto. Fortum Oyj. <<https://www.fortum.fi/yrityksille-ja-yhteisöille/lammitys-ja-jaahdytys/kaukolampo/kaukolampoa-yha-puhtaamin/kaukolammon-tuotannon-hiilidioksidin-ominaispaastot-ja-tuotantojakauma>>. Luettu 15.5.2021.
- 62 Elomaa Niina. 2021. Hiilidioksidipäästöjen kompensointi. Puhelinkeskustelu. SOK. 27.5.2021
- 63 Marin Sanna. 2020. Hallituksen esitys eduskunnalle laiksi energian alkuperätakuista. Diaarinumero VN/6434/2019. Työ- ja elinkeinoministeriö. 6.7.2020.
- 64 Laine Toni. 2020. Lauhdelämmöntalteenotto laskuri. Lauhdelämmöntalteenoton hyödyntäminen marketeissa. SOK Kiinteistöässä.
- 65 Tassou S.A. 2011. Performance evaluation and optimal design of supermarket refrigeration systems with supermarket model "SuperSim". Part II: Model applications. International journal of refrigeration 34, 540 – 549.
- 66 Leskinen Mervi. Lämmön alkuperätakuut. PowerPoint -esitys. Gasum Oy. 27.5.2021.