

Jukka Kalliojärvi

PÄIVITTÄISTAVARALIIKKEIDEN KYLMÄLAITOSTEN RAKENTAMINEN LAIN-SÄÄDÄNNÖN MURROKSESSA

Opinnäytetyö
Talotekniikka YAMK

2020



Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu

Tekijä/Tekijät	Tutkinto	Aika
Jukka Kalliojärvi	Insinööri YAMK	Huhtikuu 2020
Opinnäytetyön nimi		50 sivua V liitesivua
Päivittäistavaraliikkeiden kylmälaitosten rakentaminen lainsäädännön murroksessa		
Toimeksiantaja Suomen Talotekniikka Energia Mikkeli Oy		
Ohjaaja Johanna Arola		
Tiivistelmä		
<p>Muuttuva ilmasto, lainsäädännön muutokset, ympäristöarvojen merkityksen esiintuominen, sekä teknologian kehittyminen ohjaavat päivittäistavaraliikkeiden kylmälaitteistojen kehitystä kiihtyvällä vauhdilla. Kylmäala elää muutoksessa, jossa tavoitteena on entistä ympäristöystävällisempi ja energiataloudellisempi tapa toteuttaa tarpeenmukainen jäähdytys kiinteistön kokonaisenergiakulutus huomioiden. Tutkimuksen keskeisenä tavoitteena on aikaansaada keskustelua, ja edistää ratkaisuvaihtoehtoja kokonaisvaikutukseltaan taloudellisimman ja ympäristölle suotuisimman järjestelmäratkaisun toteuttamiseksi kylmäalan murroksessa.</p> <p>Keskeisenä osa-alueena on kaupan kylmäalaa koskeva lainsäädännön muutos, joka johtaa perinteisillä kylmäaineilla toimivien kylmälaitosten uusimistarpeeseen ja näin avaa mahdollisuuden kokonaisvaltaiseen jäähdytyksen ja lämmityksen energiakäytön tarkasteluun. Kylmälaitostyyppin valinnalla voidaan vaikuttaa olennaisesti koko kiinteistön elinkaaren aikaiseen energiakäyttöön, siitä aiheutuviin kustannuksiin, sekä ympäristö- ja ilmastovaikutuksiin. Tutkimus osoittaa, kuinka kylmälaitoksen lauhdelämpöä kokonaisvaltaisesti hyödyntämällä, voidaan aikaansaada kiinteistön kokonaisenergian käytön kanalta taloudellisesti toimiva kokonaisratkaisu.</p> <p>Tässä työssä syvennyttään kylmäalaa koskevaan lainsäädäntöön ja laitosten toimintaan keskeisesti liittyviin energiatehokkuustavoitteisiin. Työ vertailee kylmälaitteistojen kylmäntuoton energiatehokkuutta, sekä kylmälaitoksen toiminnan merkitystä kiinteistön lämmitysenergian tuotannossa. Tutkimus sisältää tutkimuskohteissa käytettävien kylmäaineiden ympäristöystävällisyyden ja siihen liittyvän lainsäädännön vaikutusten arvioinnin. Työssä verrataan suoran- ja välillisen lauhdutuksen välisiä eroavaisuuksia, sekä arvioidaan lämpöpumpun ja energiakaivojen avulla saavutettavan energiasäästön merkitystä osana kylmälaitoksen toimintaa.</p> <p>Tutkimus suoritettiin vertailemalla kolmen eri tutkimuskohteen kylmälaitteistoa. Tutkimuksessa määriteltiin tutkimuskohteiden kylmälaitteiston ominaisenergiatarve sekä tarkasteltiin kylmälaitteistosta hyödynnettävissä olevan lauhdelämmön vaikutusta kiinteistön kokonaisenergiakulutukseen.</p> <p>Tutkimus osoittaa, että kiinteistön kokoneisenergiatehokkuus rakentuu kylmälaitoksen ja talotekniikan yhdistelmän toteutuksesta. Työn tuloksia voidaan hyödyntää uusien, sekä uudistettavien kaupan kylmälaitteistojen suunnittelussa ja toteutuksessa.</p>		
Asiasanat		
kylmälaitos, energiatehokkuus, lämmöntalteenotto, kylmäainelainsäädäntö, market myymälä		

Author (authors)	Degree	Time
Jukka Kalliojärvi	Master of Engineering	Aipril 2020
Thesis title		50 pages V pages of appendices
Convenience stores' refregiration systems and the HFC phase-down		
Commissioned by		
Suomen Talotekniikka Energia Mikkeli Oy		
Supervisor		
Johanna Arola		
Abstract		
<p>The introduction of European F-gas Regulation in 2015, including a phase-out of high GWP hydrofluorocarbon (HFC) refrigerants, is driving a rapid change in food retail sector. The aim of the regulation is to mainstream the adaptation of sustainable refrigeration solutions by reducing the supply of HFCs by almost 80 % by 2030. While this gives food retailers a keen incentive to replace F-gases with more environmentally friendly natural refrigerants, it also creates an opportunity for the retailers to review their cooling and energy architecture strategically.</p> <p>The refrigeration system often has not only dominant role in determining the store's GHG emissions, but store electricity consumption too. In developing new refrigeration strategies, it is highly beneficial to focus on the opportunities that simultaneously advance total system energy efficiency. This study compares the energy efficiency of refrigeration technologies in three different grocery stores, and explores few possibilities of how to reduce the total energy consumption by marrying thermal demands with cooling. The study claims that legislative push toward more sustainable cooling also offers an opportunity to explore energy-efficiency and emission-reducing investment options.</p> <p>It has been estimated that in Finland there are over 2000 grocery stores that still need to update their refrigeration systems to meet the new EU standards. The aim of this study is to provide meaningful information to back up the upcoming renovation and redevelopment of this stores. The study concludes that it is not meaningful to compare only the energy efficiency of cooling systems. While redeveloping a refrigeration system the particular characteristics and total system energy consumption needs to be taken into account.</p>		
Keywords		
refrigeration system, cooling, energy efficiency, f-gas regulation		

Sisällys

1	JOHDANTO.....	1
2	PÄIVITTÄISTAVARALIIKKEIDEN KYLMÄLAITOKSET MURROKSESSA.....	2
2.1	Euroopan unionin F-Kaasuasetus.....	4
2.2	Kylmäaineet.....	5
2.2.1	Kylmäaineiden turvallisuusluokitus	7
2.3	Energiatehokkuusvaatimukset.....	8
2.3.1	Energiatehokkuus ja Suur-Savon Osuuskauppa	9
3	JÄÄHDYTYSPROSESSI	10
3.1	Log p-h tilapiirros	11
3.2	Höyrystyminen	12
3.3	Lauhtuminen.....	13
4	LAUHDELÄMMÖN HYÖDYNTÄMINEN KIINTEISTÖN LÄMMÖNLÄHTENÄ	14
4.1	Lauhdelämmön hyödyntäminen lämpöpumpulla.....	16
4.2	Energiakaivon hyödyntäminen lauhdelämmön varastoinnissa ja lämpöpumpun toiminnassa	18
5	TUTKIMUSONGELMA	20
5.1	Tutkimuksen toteutus.....	21
5.2	Tutkimuskohteet	23
5.2.1	Tutkimuskohde A: Sale Otava	23
5.2.2	Tutkimuskohde B: Sale Savisilta.....	24
5.2.3	Tutkimuskohde C: S-Market Rantakylä.....	25
6	ENERGIANKULUTUS TUTKIMUSKOHTEISSA	26
6.1	Kiinteistöjen kylmälaitteistojen energiakulutusvertailu	27
6.2	Kiinteistöjen kokonaisenergiankulutus vertailu	29
6.3	Lauhdelämmön energiatehokkuuden vertailu	33

6.3.1	Tutkimuskohde A: Sale Otava	33
6.3.2	Tutkimuskohde B: Sale Savisilta.....	36
6.3.3	Tutkimuskohde C: S-Market Rantakylä.....	39
7	LÄMPÖPUMPPU OSANA LÄMMITYSJÄRJESTELMÄÄ	40
8	JOHTOPÄÄTÖKSET	45
	LÄHTEET.....	47
	ASETUKSET JA LAINSÄÄDÄNTÖ.....	49

LIITE 1: Kylmäkalusteiden vertailutiedot

LYHENTEET JA MERKINNÄT

Lyhenteet

CFC	Kloorifluorihilivety
CO ₂	Hiilidioksidi
EER	Kylmäkoneen kylmäkerroin
COP	Lämpöpumpun lämmönkerroin
GWP	Kylmäaineen ilmaston lämmitysvaikutus (Global warming potential)
HCFC	Halogenoitu kloorifluorihilivety
HFC	Fluorihilivety
PFC	Täysin halogenoituja hilivetyjä
HFO	Vety-fluori-olefiini
LTO	Lämmöntalteenotto
ODP	Kylmäaineen haitallinen vaikutus otsonille (Otsone depleting potential)
TEWI	Kylmäaineen lämmitysvaikutus sisältäen välilliset vaikutukset (Total equivalent warming impact)

Termit

Alikriittinen	Kriittisen pisteen alapuolella tapahtuva prosessi
Booster-koneisto	Kaksiportainen hiilidioksidilla toimiva kylmälaitos
CO ₂ -ekvivalenttitonni	Hiilidioksidin verrattu ja kylmäaineen kasvihuonevaikutuksen huomioonottava kylmäainemäärä
F-kaasuasetus	Euroopan Unionin F-kaasuja (N:o 517/2014) koskeva asetus
Hybrid	Lauhtuminen liuospiirin ja puhaltimien avulla
Kriittinen piste	Kriittinen piste on aineen tilapiste, jonka yläpuolella erilliset neste- ja kaasufaasit häviävät
Log(p),h-tilapiirros	Kuvaaja, jossa on vaakaa-akselilla entalpia ja pystyakselilla logaritminen paine
Omakoneellinen	Omalla kylmäpiirillä varustettu laite
Regenerointi	Kylmäaineen suorituskyvyn palauttaminen
Tulistuminen	Höyryn lämpötilan nousu yli kylläisen höyryn paineen edellyttämän lämpötilan
Transkriittinen	Kriittisen pisteen molemmin puolin tapahtuva prosessi

1 JOHDANTO

Kylmäalaa koskevat lainsäädännön muutokset ovat keskeisessä roolissa päivittäistavaraliikkeiden rakentamisessa sekä uudistamistarpeen kasvussa. Tiukentuva ilmastopolitiikka ohjaa kylmäalaa kohti energiatehokkaampia ja ilmastoystävällisempiä ratkaisuja, muodostaen näin kasvavaa painetta päivittäistavaraliikkeiden uudistamistarpeelle. Kasvanut myymälöiden kylmäsäilytystilojen määrä on nostanut jäähdytyksestä aiheutuneet ympäristövaikutukset sekä kustannukset muutospaineen keskiöön. Taustalla on kylmäsäilytystä edellyttävien ja pakasteena varastoitavien puolivalmisteiden kohonnut osuus myytävien elintarvikkeiden määrässä, joka on johtanut kasvaneeseen kylmäsäilytystilan tarpeeseen nykyaikaisessa lähikauppapalvelussa. Erityisesti kauppojen runsas määrä, sekä niiden sijoittuminen asuintaajamien välittömään läheisyyteen ovat mahdollistaneet asiakaskunnan ostokäyttämisen muutoksen, jossa myymälöiden kylmäsäilytystilat korvaavat osin perinteisesti käytössä olleita kotikylmiöitä ja kylmäsäilytystiloja.

Kylmäjärjestelmällä on keskeinen vaikutus päivittäistavarakauppojen sähkönkulutukseen, ja kylmäjärjestelmien energiakustannukset ovatkin päivittäistavarakaupoille merkittävä vuotuisen kustannuserä. Kylmäjärjestelmien kokonaiskasvihuonekuormituksesta puolestaan 80–90 % muodostuu niiden energiankulutuksesta. F-kaasut, eli fluoratut kasvihuonekaasut, joita käytetään kylmäaineena useissa kylmälaitteissa, muodostavat toisen merkittävän kasvihuonekaasulähteen. F-kaasujen korkean ilmastoa lämmittävän vaikutuksen vuoksi niiden käyttöä on Euroopan unionissa ryhdytty rajoittamaan. Euroopan Unionin F-kaasuasetus pyrkii aikaansaamaan noin 60 prosentin F-kaasupäästövähennys vuoden 2005 tasosta vuoteen 2030 mennessä, ja ohjaa näin omalta osaltaan kaupan kylmälaitteistojen rakentamista ja ylläpitoa. F-kaasuasetuksen lisäksi kylmälaitteistojen uusintatarvetta lisäävät sekä kansalliset että Euroopan unionin energiasäästötavoitteet, joita tullaan käsittelemään tarkemmin myöhemmissä luvuissa.

Tässä tutkimuksessa verrataan kolmea tutkimuskohteena olevaa päivittäistavaraliikkeen kylmälaitostyyppiä energiatehokkuuden ja käyttökustannusten osalta. Tutkimuksella haetaan vastausta siihen, millaisia ovat ympäristö- ja kustannusvaikutusten kannalta suotuisimmat ratkaisut tuleviin kylmälaitosinvestointeihin. Vastauksia haetaan analysoimalla järjestel-

mävalinnan vaikutuksia kiinteistön energiakulutukseen, lämpöpumpun hyödyntämisen vaikutuksia kiinteistön lämmitykseen osana kylmälaitoksen lauhdejärjestelmää, sekä energia-kaivon hyödyntämistä lauhdelämmön varastoinnissa ja lämpöpumpun toiminnassa. Tutkimus pyrkii havainnollistamaan, kuinka lainsäädännön muutosten ajama uudistamistarve luo myös mahdollisuuden aikaansaada energiatehokkaampia ja ympäristöystävällisempiä kylmä- ja talotekniikan ratkaisumalleja. Tutkimus osoittaa kiinteistön kylmälaitosten ja talotekniikan yhteensovittamisella saavutettavissa olevan taloudellisen hyödyn päivittäistavara-liikkeille lauhdelämpöä hyödyntävän esimerkkitapauksien avulla.

Tämän tutkimustyön toimeksiantajana toimii Suomen Talotekniikka Energia Oy, joka on energiatehokkuusratkaisuihin ja kylmätekniikkaan erikoistunut yritys.

2 PÄIVITTÄISTAVARALIIKKEIDEN KYLMÄLAITOKSET MURROKSESSA

Tarve päivittäistarvikeliikkeiden kylmälaitosten kokonaisenergiatehokkuuden vertailututkimukseen on hyvin ajankohtainen, johtuen kylmäalaa koskevista lainsäädännön muutoksista. Euroopan Unionin vuonna 2015 voimaan tullut F-kaasuasetus iskee voimakkaasti erityisesti päivittäistavarakauppaan, sillä elintarvikkeita myyvien myymälöiden kylmälaitoksissa käytetään edelleen runsaasti korkean GWP-arvon (Global Warming Potential) kylmäaineita, joiden käytöstä on luovuttava vuoteen 2030 mennessä. Asetuksen taustalla on lisääntynyt tietoisuus kylmäaineiden ilmakehälle haitallisten fluorattujen kaasujen ominaisuuksien vaikutuksesta sekä kansainvälinen paine kasvihuonekaasujen päästövähennyksiin. Globaalien F-kaasusäädösten ilmastovaikutuspotentiaalin onkin laskettu olevan jopa 0,5 astetta vuosisadan loppuun mennessä (Y. Xu et. al. 2013).

Kylmäaineena käytettävät F-kaasut ovat voimakkaita kasvihuonekaasuja, joiden ilmastoa lämmittävä vaikutus on hiilidioksidiin verrattuna moninkertainen. Vaikka F-kaasujen on arvioitu aiheuttaneen ainoastaan 1 %:n tähänastisista kokonaiskasvihuonekaasupäästöistä, muodostavat ne tänä päivänä globaalilla tasolla kaikkein nopeimmin kasvavan kasvihuonekaasujen kategorian (Y. Xu et. al. 2013). Euroopassa päivittäistavarakauppojen kylmäjärjestelmät- ja laitteet muodostavat jo suurimman F-kaasuja käyttävän sektorin, ja se on vastuussa noin kolmasosasta EU:n HFC-yhdisteiden kulutuksesta (Karampour et. al. 2016, 12–13).

HFC-yhdisteet ovat osittain halogenoituja hiilivetyjä (eng. Hydro-Fluoro- Carbon), jotka ovat otsonihaitattomia, mutta omaavat merkittävän kasvihuonehaitallisuuden. HFC-yhdisteet nousivat merkittäviksi kylmäaineiksi vuonna 1987 hyväksytyn Montrealin sopimuksen kiellettyä edeltäneiden otsonikerrosta tuhoavien CFC-kaasujen käytön. Montrealin sopimusta päivitettiin vuonna 2016 Ruandan Kigalissa, missä pöytäkirjan osapuolet sopivat HFC-aineiden ottamisesta mukaan sopimuksen piiriin. Suomen kohdalla Kigalissa tehdyn sopimuksen rajoitteiden merkitys on vähäinen, sillä EU:n F-kaasuasetus asettaa kylmäaineiden tuotannolle, tuonnille ja kulutukselle Montrealin sopimusta tiukemmat rajoitteet. EU:n F-kaasuasetuksen tavoitteena on vähentää EU:n päästövähennystavoitteiden mukaisesti kasvihuonekaasupäästöjä, sekä varmistaa että EU saavuttaa Kigalin sopimuksessa sille määritellyt velvoitteet, mikä edellyttää sitä, että HFC-kaasuista luovutaan EU:ssa paljolti jo kymmenen vuoden kuluessa (European Commission 2017, 2).

Kylmä-aineiden rajoituksien ja lainsäädännön uusimisen yhteydessä on pyritty myös kiinnittämään huomiota laitteiden energiatehokkuuden parantamiseen (Reinikainen 2019). Tämä tarkoittaa sitä, että kylmäaineiden käytön suorien päästöjen lisäksi, laitteiden energiankulutuksesta johtuvat välilliset päästöt pyritään sisällyttämään kriteeristöön. Onkin arvioitu, että Kigalin pöytäkirjamuutoksen ansiosta syntyvä puolen asteen ilmaston lämpenemisen ehkäisy voitaisiin jopa tuplata, mikäli tarpeeksi kattavat energiatehokkuusvaatimukset saataisiin sisällytettyä Montrealin sopimuksen piiriin (Reinikainen & Johansson 2019, 29). Hyvällä hyötysuhteella toimivien kylmälaitosten rakentaminen on ilmastovaikutuksen kannalta merkittävää, sillä tyypillisesti noin 80% niiden kokonaiskasvihuonevaikutuksesta syntyy energiankulutuksesta, kun puolestaan kylmälaitokset usein muodostavat päivittäistavaraliikkeiden suurimman energiankulutuslähteen (SKLL 2018).

Suomessa on arvioitu tällä hetkellä olevan noin 2 300 uudistamistarpeen alla olevaa päivittäistavaraliikkeen kylmälaitosta, joiden kylmälaitteiden kylmäaine ylittää EU:n F-kaasuasetuksessa sovitun GWP-raja-arvon (Remes 2018). Tämä tarkoittaa, että vasta noin 15 prosenttia Suomen myymälöistä on siirtynyt käyttämään matalan GWP:n kylmäaineita. GWP-arvo viittaa aineen ilmastoa lämmittävään vaikutukseen, joka lasketaan vertaamalla aineen yhden kilogramman päästön aiheuttamaa säteilypakotetta (W/m^2) hiilidioksidin vastaavaan säteilypakotteeseen. Vaikka F-kaasut muodostavat vain vähän yli 2 prosenttia Suomen kokonaiskasvihuonekaasupäästöistä, on niiden ilmastoa lämmittävä vaikutus suuri verrattuna

muihin kasvihuonekaasuihin. EU:n F-kaasuasetuksen ajaman kylmälaitteistojen uusimistarpeen yhteydessä on keskeistä huomioida sen luoma mahdollisuus entistä energiatehokkaampien, ja näin ollen ympäristöystävällisempien ja kustannustehokkaampien, kylmälaitosten ja kokonaisratkaisujen toteuttamiseen.

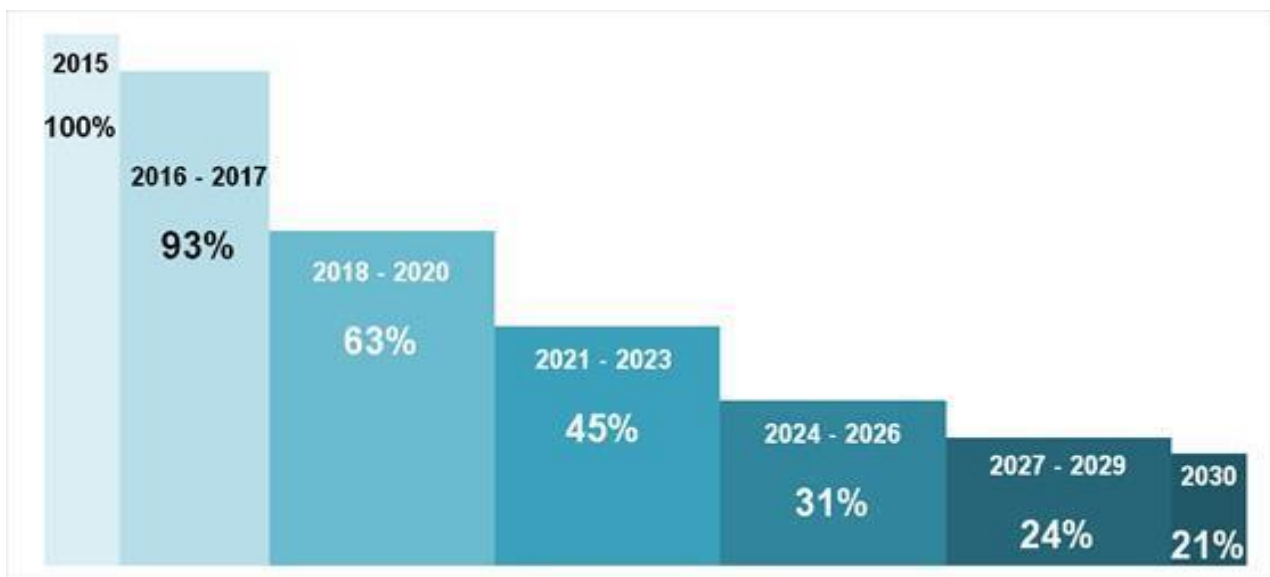
2.1 Euroopan unionin F-Kaasuasetus

Edellä mainittu Euroopan unionin F-kaasuasetus (N:o 517/2014), joka korvasi edeltävän vuonna 2006 hyväksytyn asetuksen, pyrkii saavuttamaan 1.5 gigatonnin CO₂ päästövähennyksen vuoteen 2030 ja 5 gigatonnin CO₂ vähennyksen vuoteen 2050 mennessä. Tavoite on merkittävä, sillä tavoiteltu päästövähennys on kokonaisuudessaan suurempi kuin Euroopan unionin vuotuinen n. 5Gt kokonaishiilidioksidipäästö. F-kaasupäästöleikkausten nähdäänkin olevan merkittävä ja kustannustehokas tapa pyrkiä saavuttamaan Euroopan unionin yleinen 80—95 prosentin päästöleikkaustavoite vuoteen 2050 mennessä (EU 2019, Reinikainen & Johansson 2019, 12). Asetus pyrkii ohjaamaan kylmäalan toimintaa asteittain ympäristölle haitallisten F-kaasujen käytöstä kohti ympäristöystävällisempiä vaihtoehtoja. Asetus asettaa rajoituksia tiettyjen kylmäaineiden käytölle, sekä laajemmin HFC-yhdisteiden markkinoille saattamiselle, sekä kiristää velvoitteita vuotojen tutkimiseen ja estämiseen. Vuotojen vaadittu tarkastustiheys riippuu kylmälaitteessa olevan kylmäaineen määrästä sekä aineen GWP-luvusta (EU 517/2014 artikla 4 kohta 1), ja vaikuttaa näin osaltaan laitteiston ylläpitokustannuksiin. Vaadittujen vuototarkastuksien tarkoituksena on minimoida ja ennaltaehkäistä kylmäainevuodot, jolloin kylmäaineesta ei koidu kasvihuonekaasupäästöjä.

HFC-yhdisteiden markkinoille saattamisen asteittainen vähentäminen toteutetaan kiintiöjärjestelmällä, joka perustuu laskettuun yhdisteen lämmitysvaikutukseen. Lämmitysvaikutusta kuvataan hiilidioksidiin suhteutetulla GWP-kertoimella, jossa yhden kilogramman F-kaasumäärän lämmitysvaikutus lasketaan suhteessa yhden kilogramman hiilidioksidimäärän lämmitysvaikutukseen 100 vuoden ajanjaksolla (European Commission 2019, 10). F-kaasujen määrää kuvaava hiilidioksidiekvivalentti saavutetaan kertomalla sen massa GWP-arvolla. Näin ollen HFC-yhdisteiden käytettävissä oleva määrä on riippuvainen yhdisteiden lämmitysvaikutuksesta, sillä mitä suuremman lämmitysvaikutuksen omaavia HFC-yhdisteitä käytetään, sitä vähemmän niitä voidaan kilogrammoina maahantuoda ja valmistaa. Asetuksella

pyritään myös parantamaan uusien teknologioiden ja ilmastovaikutuksiltaan vähäisten kaasujen markkinamahdollisuuksia, rajoittamalla ja kieltämällä hyvin korkean GWP:n (yli 2500) F-kaasujen käyttö, ja näin ohjaamaan niiden hintakehitystä.

Asetuksen tavoitteena on vähentää EU:n markkinoilla olevien fluorihilivetyjen määrää 79 prosentilla vuosina 2015–2030, vähentäen jaettavien kiintiöiden määrää vähitellen. Asetus kieltää 1.1.2020 alkaen yli 2500 GWP-arvon F-kaasujen käytön yli 40 hiilidioksidiekvivalenttitonnin kylmlaitteiden huollossa, poikkeuksena regeneroitujen tai kierrätettyjen aineiden käyttö, joka on sallittu vuoteen 2030 saakka, sekä laitteet joita käytetään tuotteiden jäähdyttämiseen alle -50 celsiusasteeseen tai puolustustarvikkeina. Yleisimmistä käytössä olevista kylmäaineista huoltokielto koskee R404a:ta, joka toimii kylmäaineena myös yhdessä tässä tutkimuksessa tarkasteltavista kohteista. Alla olevassa kuvassa (kuva 1) on esitetty F-kaasusetuksen mukainen asteittainen vähentäminen.



Kuva 1. Fluorattujen kasvihuonekaasujen vähentäminen asteittain Euroopan unionissa vuoteen 2030 mennessä (Ympäristöministeriö 2019).

2.2 Kylmäaineet

Kylmäaineiden kehitys on kulkenut pitkän tien synnystään 1800-luvulta. Suuria kylmäaineiden kehitykseen vaikuttavia tekijöitä ovat olleet aineiden hintaan ja saatavuuteen vaikuttavat tekijät, niiden terveys- ja turvallisuusvaikutukset, sekä erityisesti viime vuosikymmeninä kylmäaineiden ilmasto- ja ympäristövaikutukset. Kylmäaineet ovat nesteytettyjä kaasuja, joiden käyttö perustuu niiden kykyyn muuttaa olomuotoa nestemäisestä kaasumaiseksi ottaessaan

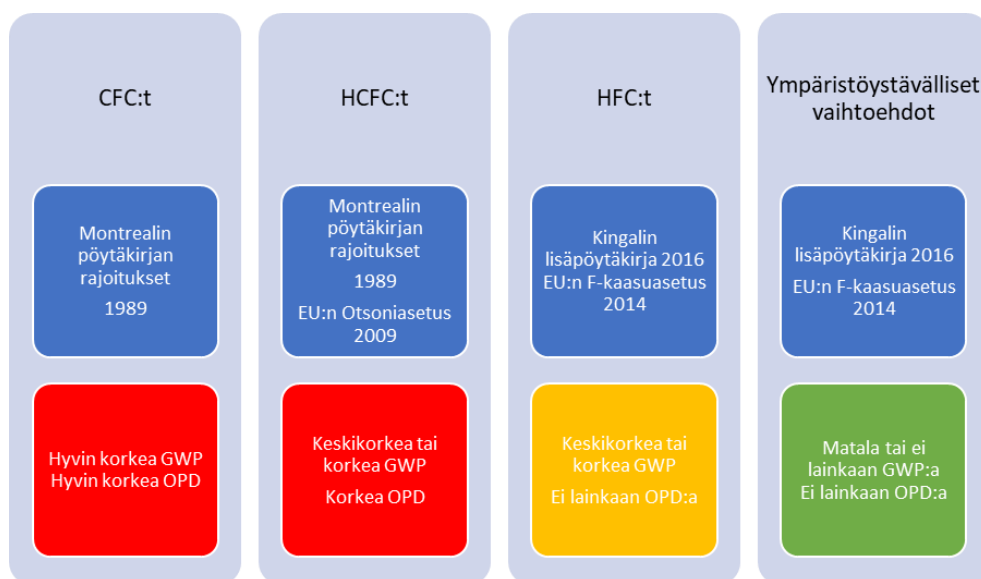
vastaan lämpöä ympäristöstään, tai kaasumaisesta nestemäiseksi luovuttaessaan lämpöä ympäristöönsä. Olomuodon muutos mahdollistaa suurtenkin lämpökuormien siirtelyn suhteellisen pienellä kylmäaineen massavirralla, ja mahdollistaa niiden käytön väliaineina lämmön siirtämiseen kylmäkoneistoissa. Tässä tutkimuksessa keskitytään tutkittavissa kylmlaitostyypeissä käytettäviin kylmäaineisiin, niihin sisältyviin ominaisuuksiin ja rajoitteisiin. Yleisesti on huomioitavaa, että kylmäaineen ominaisuudet ovat sidoksissa siihen kulloinkin vaikuttavasta paineesta ja lämpötilasta.

Kylmäaineet koostuvat pääsääntöisesti hiilivedyistä, joiden vetyatomeja on eri tavoin prosessoimalla korvattu halogeenimolekyyleillä. Halogeenihiilivedyt voidaan jakaa halogeenimolekyylien perusteella ympäristölle haitallisiin ja vähemmän haitallisiin kylmäaineisiin. Suuren otsoni- ja merkittävän kasvihuonehaitallisuuden omaavia kylmäaineita ovat CFC-kylmäaineet. Ne ovat täysin halogenoituja hiilivetyjä, jotka sisältävät klooria, fluoria ja hiiltä, (CFC). Myös HCFC-kylmäaineet, jotka ovat osittain halogenoituja hiilivetyjä, sisältäen vetyä, klooria, fluoria ja hiiltä (HCFC), lukeutuvat ympäristölle erittäin haitalliseen ryhmään.

Otsonihaitattomia ja alhaisen kasvihuonehaitallisuuden omaavia kylmäaineita ovat HFC- ja PFC- kylmäaineet. Ne ovat fluorihiilivetyjä, joita kutsutaan yleisesti F-kaasuiksi. Myös HFO-kylmäaineet ovat F-kaasuiksi luokiteltavia aineita, mutta eroavat HFC-aineista molekyylirakenteen suhteen. HFO-aineissa hiiliatomien välillä on kaksoissidos kun taas HFC-aineissa hiiliatomien välillä on vain yksöissidoksia. Puhtaat HFO-aineet eivät kuulu Euroopan unionin F-kaasuasetuksen rajoitusten piiriin.

Lisäksi kylmäaineina käytetään niin kutsuttuja luonnonmukaisia kylmäaineita kuten ammoniakkia ja hiilidioksidia. Ne eivät sisällä lainkaan halogeenimolekyylejä ja niitä esiintyy luonnossa sellaisenaan. Näiden kylmäaineiden otsoni- ja kasvihuonehaitallisuus on hyvin pieni tai olematon. (Kapanen 2017.) Näiden kylmäaineiden käyttö ja käsittely vaatii usein erityistä tarkkuutta, sillä suuri osa on syttyviä, myrkyllisiä tai vaativat erityisen korkean paineen. Kylmäaineiden yleisiä turvallisuusluokituksia on käyty tarkemmin läpi seuraavassa luvussa.

Kuvassa 2. on havainnollistettu kylmäaineita koskevan kansainvälisen sääntelyn kehitystä.



Kuva 2. Kylmäainerajoitusten kehitys. (Muokattu; Ympäristö.fi. Kasvihuonekaasujen seurata ja raportointi)

2.2.1 Kylmäaineiden turvallisuusluokitus

Kylmäaineet ryhmitellään turvaluokkiin niiden myrkyllisyyden ja syttymisherkyyden perusteella. Turvallisuusluokitus perustuu Euroopan unionin lainsäädännössä puhtaita kylmäaineita ja seoskylmäaineita koskevaan niin kutsuttuun CLP-asetukseen (EY-asetus N:o 1272/2008), joka koskee erityisesti kylmäaineiden varastointia, teollista käsittelyä sekä kuljetusta. Alla olevassa taulukossa (taulukko 1) on esitetty kylmäaineiden turvallisuusluokitukset. Myrkyllisyysluokkia on kaksi, jossa A myrkyllisyysluokan kylmäaineet eivät ole terveydelle haitallisia ja B luokan aineet sitä vastoin ovat. Syttyvyysluokkia on neljä, 1, 2, 2L ja 3. Luokka 1 tarkoittaa ei syttyvää, 2 lievää syttyvyyttä, 2L syttyvää ja 3 korkeaa syttyvyyttä. (Kapanen 2017.)

Taulukko 1. Kylmäaineiden turvaluokituksen periaatteet (Kapanen 2017).

Turvaryhmä	Pienempi myrkyllisyys (terveydelle haitaton)	Suurempi myrkyllisyys (terveydelle haitallinen)
Korkeampi syttyvyys	A3	B3
Alhaisempi syttyvyys	A2L	B2L
Syttyvä	A2	B2
Ei syttyviä	A1	B1

2.3 Energiatehokkuusvaatimukset

F-kaasuasetuksen ohella kaupanalan toimijoita sekä kylmäaineiden käyttöä ohjaavat Euroopan unionin energiatehokkuusdirektiivi (EU/27/2012)¹, rakennusten energiatehokkuusdirektiivi (2010/31/EU), sekä kansallisesti eteenpäin viedyt Euroopan unionin energia- ja ilmastopaketin tavoitteet. Suomessa EU:n energiatehokkuusdirektiiviä noudatetaan kansallisesti asetetulla energiatehokkuuslailla (1429/2014). Suomen kansallinen sitova energiatehokkuusdirektiivin mukainen kumulatiivinen energiansäästötavoite jaksolla 2014-2020 oli 48,99TWh_{kum}, jonka Suomi onnistui saavuttamaan jo vuosina 2014–2016 toteutetuilla toiminnoilla. Vuoden 2019 lopulla koko velvoitekauden kumulatiivisen säästön arvioitiin olevan yli 90 TWh_{kum}. Velvoitekaudelle 2021-2030 vuotuinen energiansäästövelvoite on Suomen osalta noin 1,9–2,36 TWh/a. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2019.)

Euroopan unionin rakennusten energiatehokkuusdirektiivi (Energy performance of buildings directive (EPBD)), ja kesällä 2018 voimaantullut energiatehokkuusdirektiivin muutos (2018/844), pyrkii puolestaan nopeuttamaan olemassa olevien rakennusten kustannustehokkaita peruskorjauksia, sekä ajamaan älykkään teknologian ja automatiikan käyttöä rakennuksissa. Direktiivin tavoitteena on erittäin energiatehokkaan ja lähes hiilivapaan rakennuskannan aikaansaanti vuoteen 2050 mennessä, mahdollistaen näin 90 prosentin hiilidioksidipäästöjen vähennyksen vuoden 2020 alusta vuoteen 2050 mennessä. (Ympäristöministeriö 2020.) Lisäksi uusiutuvan energian direktiivillä (REDII) pyritään lisäämään uusiutuvan energian käyttöä niin, että sen osuus nousee 2020-luvulla yli 50 prosenttiin energian loppukulutuksesta. Lämmitys- ja jäähdytysalalle uusiutuvan energian direktiivi asettaa 1,3 prosenttiyksikön vuotuisen kasvutavoitteen. Direktiivi myös mahdollistaa uusiutuvan energian sekä hukkalämmön ja -kylmän tuottajien pääsyn kolmantena osapuolena kaukolämmitys- ja -jäähdytysverkostoihin. (EUVL L 328, 21.12.2018, s. 82–209.) Vaikka direktiivi ei aseta varsinaisia jäsenvaltiokohtaisia velvoitteita, ohjaa se yhdessä kansallisen energia- ja ilmastostrategian kanssa Suomen tavoitetta kohti vähähiilistä yhteiskuntaa.

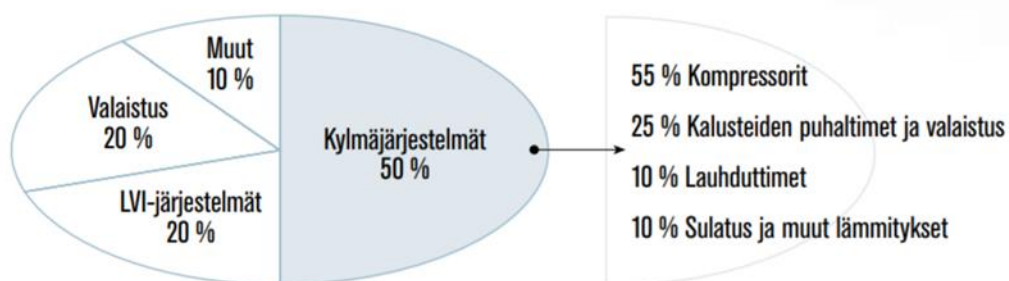
Suomessa sekä kaupanalan liitto että S- ja K-ryhmä ovat sitoutuneet myös vapaaehtoihin energiatehokkuussopimuksiin, jotka ovat olennainen osa Suomen energia- ja ilmastostrategia-

¹ Tarkistettu energiatehokkuusdirektiivi (EU)2018/2002 tuli voimaan 24.12.2018 ja sen myötä EU:n energiatehokkuustavoitteet vuodelle 2030.

giaa. Energiatehokkuussopimukset ovat valtion ja toimialojen välisiä vapaaehtoisia sopimuksia, joiden tarkoitus on edistää energiansäästöä ja -tehokkuutta (Motiva 2017). Kylmäjärjestelmien uusiminen ympäristöystävällisemmillä kylmäaineilla toimiviksi, toimii osana sopimuksissa asetettujen energiansäästötavoitteiden aikaansaamista. Päivittäistavarieliikkeen energiakustannuksesta 40—60% on arvioitu aiheutuvan kylmälaitosten energiakulutuksesta (Schönberger, Galvez-Martos & Styles 2013, 14-15; Tassou et. al. 2011, 147, 150), jonka vuoksi tehokkaamman energiakäytön hyödyntäminen tulevien kylmäjärjestelmien uudistamisen yhteydessä on ympäristöystävällisyyden lisäksi myös taloudellisesti merkittävää.

Energiatehokkuuden kannalta merkittävää on myös se, että kylmälaitteiston uusinta avaa mahdollisuuden kiinteistön kokonaisenergiakäytön tarkasteluun, sekä mahdollisuuden lauhdelämmön hyödyntämiseen osana kiinteistön lämmitysenergiaa. Alla olevassa kuvassa (kuva 3) on havainnollistettu sähkönkulutuksen tyypillinen jakauma päivittäistavaraliikkeissä. Tässä tutkimuksessa tutkimuskohteina olevien päivittäistavaraliikkeiden sähkönkulutuksen jakauma on esitetty kappaleessa 6.

Sähkön kulutuksen tyypillinen jakauma päivittäistavarakaupassa



Kuva 3. Sähkön kulutuksen jakauma päivittäistavarakaupassa (Motiva 2009).

2.3.1 Energiatehokkuus ja Suur-Savon Osuuskauppa

Tässä tutkimuksessa olevat tutkimuskohteet kuuluvat kaikki Osuuskauppa Suur-Savoon ja ovat näin ollen sidoksissa S-ryhmän yhteisiin energiatehokkuussopimuksiin. S-ryhmä on Suomen suurin ei-teollinen sähkönkuluttaja, ja on sitoutunut tehostamaan energiankäyttöään 7,5 prosentilla sopimuskauden 2017-2025 aikana. Lisäksi S-ryhmä on julkistanut tavoitteeksi 30 prosentin energiankulutuksen tehostamisen vuoden 2015 tasosta vuoteen 2030

mennessä. S-ryhmän tavoitteena on, että käytetystä sähköstä yli 80 prosenttia on tuotettu omalla uusiutuvalla energialla vuoteen 2025 mennessä. Tällä hetkellä oman uusiutuvan energian osuus käytetystä sähköstä on 56 prosenttia. Uusiutuvan energian osuuden kasvattaminen yhdessä energiankäytön tehostamisen, sekä vanhojen kylmälaitteiden uusimisen ja kylmäainevuotojen minimoinnin kanssa, muodostavat S-ryhmän keskeisimmän kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisstrategian. (S-kanava.)

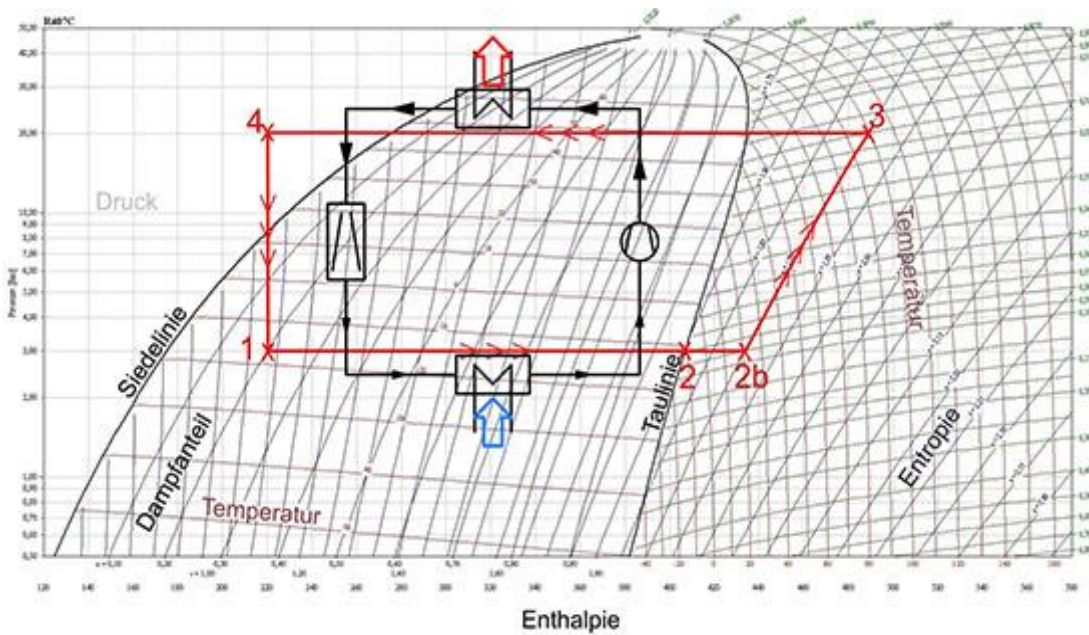
3 JÄÄHDYTYSPROSESSI

Termodynamiikan 2. pääsäännön mukaisesti lämpö pyrkii aina luonnollisesti siirtymään korkeammasta lämpötilasta matalampaan päin. Siirrettäessä lämpöä matalammasta lämpötilasta korkeampaan, tulee järjestelmään tuoda työtä. Kylmätekninen kiertoprosessi kuvaa tätä ilmiötä, jossa yleensä työtä tuodaan järjestelmään kompressorin sähkötehon avulla (kaava 1). Kompressorin ottama sähköteho muuttuu lämpöenergiaksi, josta osa siirtyy kylmäaineeseen ja osa ympäröivään, jäähdyttävään väliaineeseen, esimerkiksi ilmaan tai veteen. Termodynamiikan 1. pääsääntö, energiaa ei voi hävitä, mutta se voi muuttua muiksi energiamuodoiksi, kuuluu ilmiöön vahvasti mukaan. (Kaappola et. al. 2015, 18.)

$$\Delta U = Q + W \quad \text{Kaava (1)}$$

, jossa	U	on systeemin sisäenergia
	Q	on systeemiin tuotu lämpömäärä
	W	on systeemiin tehty työ

Kylmäteknisessä kiertoprosessissa (kuva 4), jossa lämmönvälittäjänä toimii kylmäaine, siirretään prosessiin tuodun työn avulla lämpöä matalammasta lämpötilasta korkeampaan. Kylmäaineen olomuodon muutokset höyrystymisen ja lauhtumisen suhteen eri painetasojen välillä, mahdollistavat lämpöenergian sitoutumisen ympäristöstä sekä luovuttamisen ympäristöön prosessin eri vaiheissa. (Kaappola et. al. 2015, 18.)



Kuva 4. Kiertoprosessi.

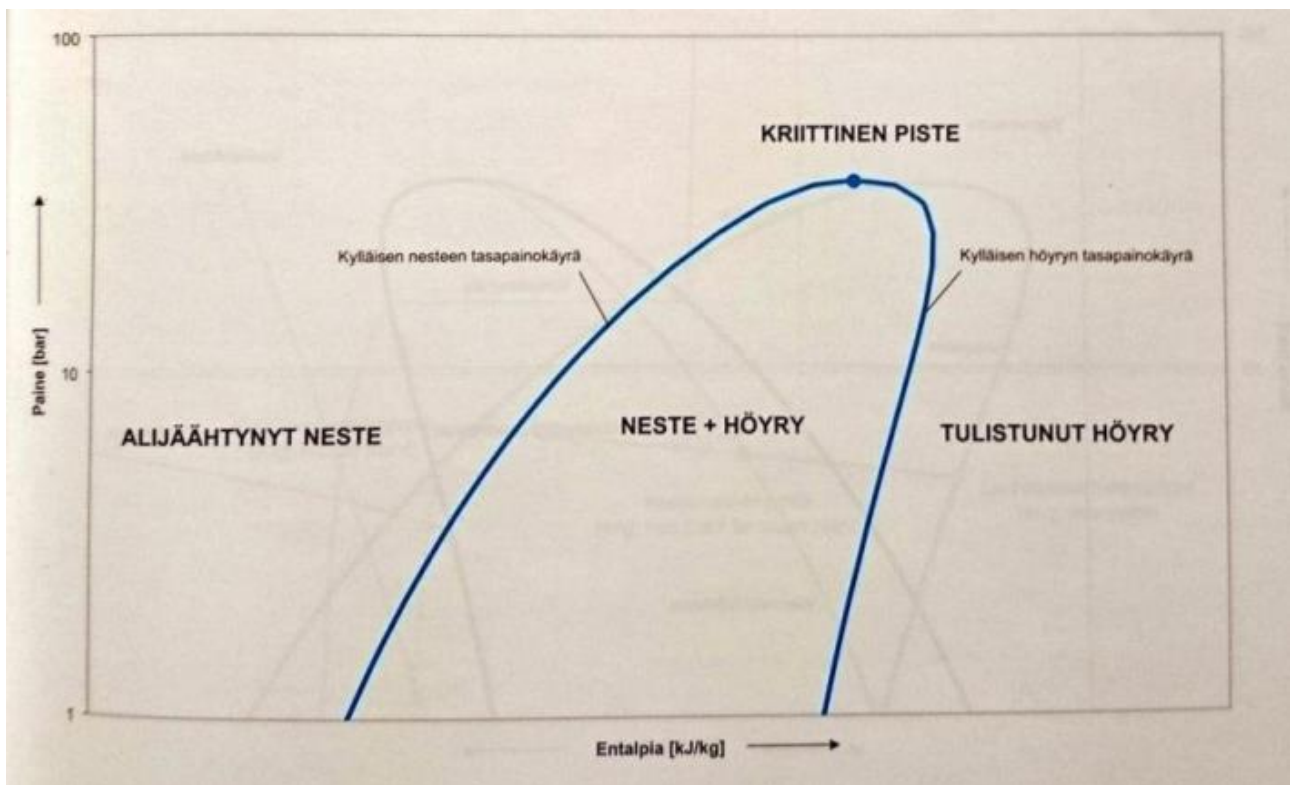
Kiertoprosessin kuvaus edellisessä kuvassa

- 1-2 kylmäaineen höyrystyminen kylläiseksi höyryksi
- 2-2b kylmäainehöyryn tulistuminen höyrystimessä ja imuputkistossa
- 2b-3 isentrooppinen puristus, kompressorin tekemä työ
- 3-4 lauhtuminen vakioaineessa
- 4-1 paineen alennus paisuntaventtiilissä, osa kylmäaineesta höyrystyy

3.1 Log p-h tilapiirros

Kylmäteknisessä kiertoprosessissa kylmäaineen olomuodon muutoksia kuvataan jokaiselle aineelle ominaisessa paine-entalpia-tilapiirroksessa (kuva 5). Piirroksessa x-akselille on sijoitettu entalpian (h) arvot ja y- akselille absoluuttisen paineen (p) arvot. Piirroksen tarkkuuden säilyttämiseksi koko alueen kattavasti paineen arvot esitetään logaritmisin asteikon avulla. Siitä on myös johdettu piirrosta yleisesti kuvaava log p, h-tilapiirros-nimitys. (Kaappola et. al.. 2015, 19.) Log p, h-tilapiirroksessa aineen olomuodot on eritelty rajakäyrän avulla. Rajakäyrä jakautuu kahteen osaan, kylläisen nesteen ja kylläisen höyryn käyriin kyl-

määineen kriittisen pisteen kohdalla, joka sijaitsee käyrän huipulla (kuva 5). Kylläisen nesteen tasapainokäyrän vasemmalla puolen kylmäaine on alijäähtyneen nesteen muodossa, kun taas kylläisen höyryn tasapainokäyrän oikealla puolen kylmäaine on tulistuneena höyrynä. Tasapainokäyrien välisellä alueella kylmäaine ilmenee nesteen ja höyryn seoksena. Kylmätekniikan prosessin esittämiseksi tarvitaan log p, h-tilapiirrokseen kylläisen nesteen ja höyryn tasapainokäyrien lisäksi vakio- λ -lämpötila-, vakio- p -paine-, vakio- ρ -tiheys-, vakio- s -entropia-, vakio- h -entalpia- ja vakio- ω -höyrypitoisuuksien käyrät. (Kaappola et. al. 2015,19—20.)

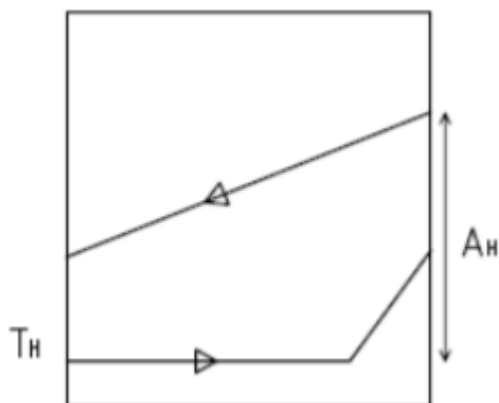


Kuva 5. Kylmäaineen olomuodot Log p, h-tilapiirroksessa (Kaappola et. al. 2015, 19).

3.2 Höyrystyminen

Kylmäaineen höyrystyminen nesteestä höyryksi tapahtuu kylmälaitoksen sisältämässä höyrystimessä. Höyrystimen kyky aikaansaada olomuodonmuutos kiertoprosessin sisältämässä kylmäaineessa on riippuvainen höyrystimelle tuodun lämmön ja prosessissa virtaavan aineen välisestä energiavirrasta. Höyrystimen tehtävä kylmäprosessissa on aikaansaada kylmälaitokselle määritettyä tehontarvetta vastaava kylmäaineen entalpiamuutos. Höyrystin sitoo ympäröivästä tilasta lämpöenergiaa kylmäaineen olomuodonmuutoksen si-

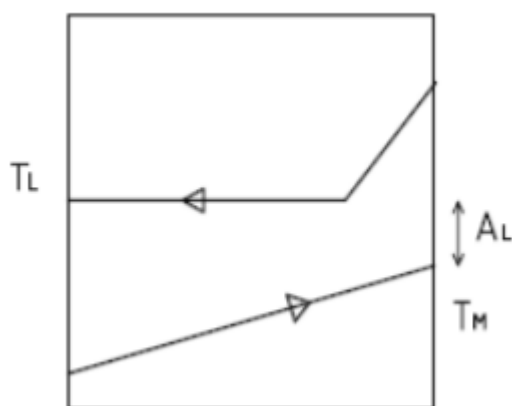
toman energianmäärän. Höyrystimelle säädetyn imupaineen välityksellä saavutetaan jäähdytettävälle tilalle asetettu lämpötila. Tutkimuskohteissa pakastetilojen (LT) imupainetta vastaava lämpötilan vaihteluväli oli $-28\text{--}32^{\circ}\text{C}$. Plussapuolen höyrystymislämpötila oli aseteltu välille $-1\text{--}+7^{\circ}\text{C}$. Vastavirtauksessa kylmäaine ensin höyrystyy ja sitten tulistuu (kuva 6). Höyryn lämpötila voi muuttua painehäviön, sekä kylmäaineen mahdollisen liukuman johdosta.



Kuva 6. Kylmäaineen höyrystyminen vastavirtauksessa.

3.3 Lauhtuminen

Kylmäaineen lauhtuminen höyrystä nesteeksi tapahtuu kylmälaitoksen sisältämässä lauhduttimessa. Lauhduttimessa höyrystimessä ja kompressorissa kylmäaineeseen sitoutunut energia vapautuu ympäröivään tilaan, jolloin höyry palautuu nesteeksi. Lauhtuminen tapahtuu kolmessa vaiheessa (kuva 7). Vaihe yksi on kylmäaineen tulistuksen poisto. Vaihe kaksi lauhtuminen nesteeksi ja vaihe kolmen nesteessä tapahtuva alijäähtyminen. Tutkimuskohteissa lauhdelämpöä on hyödynnetty lämmityskauden aikana kiinteistön lämmönlähteenä.



Kuva 7. Kylmäaineen lauhtuminen vastavirtauksessa

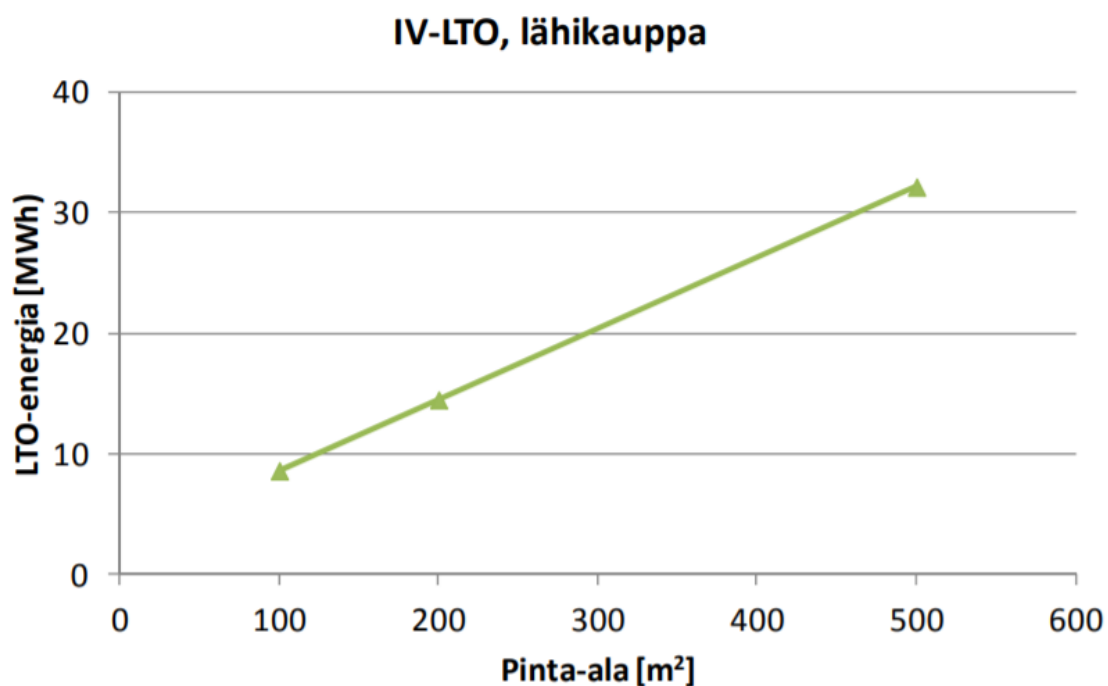
4 LAUHDELÄMMÖN HYÖDYNTÄMINEN KIINTEISTÖN LÄMMÖNLÄHTEENÄ

Lauhdelämmön hyödyntäminen kiinteistön lämmönlähteenä on hyvä ja kustannustehokas tapa vaikuttaa kylmälaitoksen ja kiinteistön energiatehokkuuteen. Tyypillisin tapa lauhdelämmön hyödyntämiseen on lauhteen ohjaus tuloilmakoneen esilämmitykseen. Kylmälaitteistosta riippuen lauhteen lämpötila vaihtelee tyypillisesti $+40\text{--}80^\circ\text{C}$. Kylmälaitoksen lauhdelämpö jakautuu tyypillisesti kolmeen osaan: tulistuslämpöön, lauhdutuslämpöön ja alijäähdetykseen. Tulistuslämmön osuus lauhdutuslämmöstä on tyypillisesti 10–20 %, lauhdutuslämmön 80–90 % ja alijäähdetyksen 0–5 %. (Hakala & Kaappola 2007, 211–212.)

Päivittäistavarakaupoissa lämmitystä tarvitaan tilojen ja käyttöveden lämmitykseen, tuloilman esilämmitykseen, sekä joissain tapauksissa lumen sulatukseen kauppojen edustoilta. (Gullo et. al. 2018, 290.) Erillisellä tulistuslämmönsiirtimellä varustetuissa laitoksissa tulistuslämpö siirretään tyypillisesti käyttöveden lämmitykseen. Hyödynnettävissä olevan lauhdelämmön määrä riippuu kylmäjärjestelmän tyypistä, valitusta lämmöntalteenottoratkaisusta sekä järjestelmien automatiikasta. Lisäksi talteen saatavan lämmön määrään vaikuttaa merkittävästi lämmitysjärjestelmältä palaavan liuoksen lämpötila, sillä mitä matalampi paluulämpötila on, sitä enemmän lämpöä on mahdollista saada talteen. Lattialämmityksellä varustetuissa kohteissa lauhdelämmön hyöty on merkittävästi suurempi, kun kohteissa, joissa tilojen lämmitys on toteutettu ilma- tai radiaattorilämmityksellä.

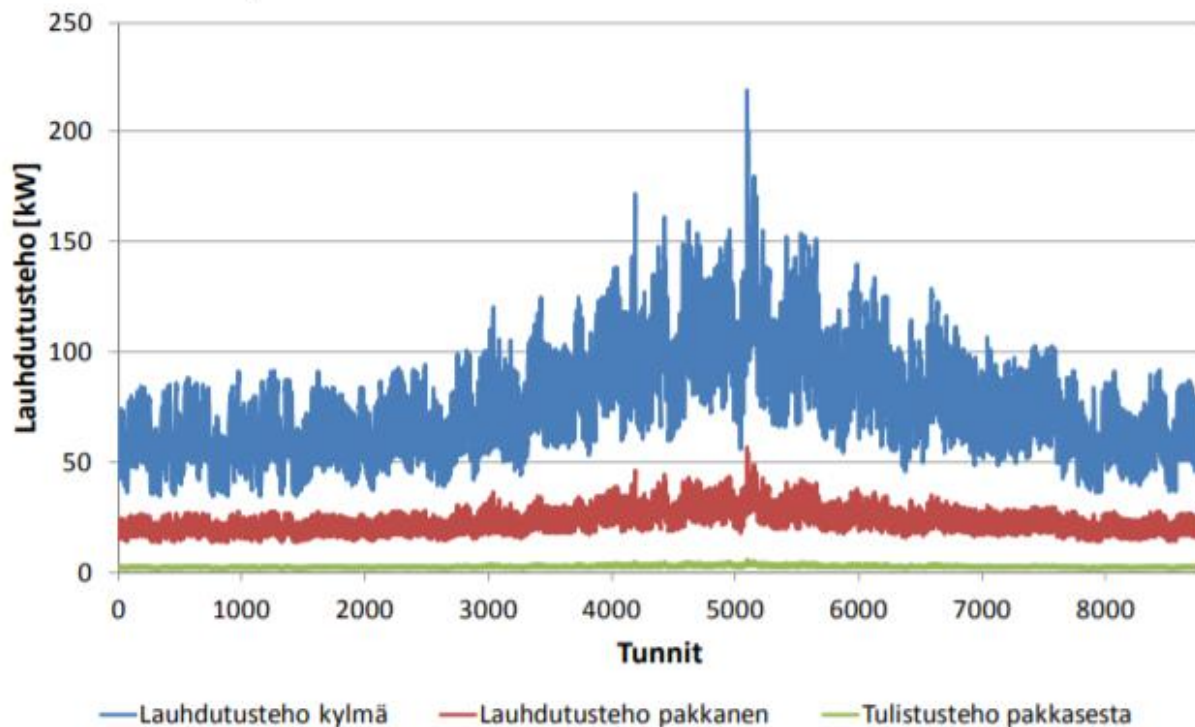
Kiinteistöautomaatiikka on ratkaisevassa osassa lauhteen hyödyntämisen mahdollistamisessa. Kylmäjärjestelmän integrointia osaksi kiinteistön talotekniikkaa rajoittaa usein keskeisesti riittävän vuoropuhelun määrän puute LVI- ja kylmälaitossuunnittelijoiden kesken. Kylmälaitoksen lämmöntalteenottoa suunniteltaessa tärkeää on ottaa huomioon järjestelmän häiriötön toiminta elintarviketurvallisuuden varmistamiseksi.

Alla olevassa kuvassa (Kuva 8) on kuvattu tuloilman lämmitykseen hyödynnettävän lauhde-energian määrää pinta-alan funktiona.



Kuva 8. Ilmanvaihtoon saatavissa oleva lauhdelämmön energia pinta-alan funktiona (Motiva 2012, 16).

Rajoittavana tekijänä lauhde-energian hyödyntämisessä vuositasolla on lauhteen vaihtelu ulkolämpötilojen mukaan (kuva 9). Tyypillisesti hyödynnettävää lauhde-energiaa on vähiten saatavissa lämmityskauden aikana. Lämpimänä aikana lauhde-energia on hyödynnettävissä varastoimalla energiaa varaajaan tai energiakaivoon, joita käsitellään tarkemmin seuraavissa kappaleissa.



Kuva 9. Market kaupan laskennallinen lauhdutuksen pysyvyyskäyrä (Motiva 2012, 13).

4.1 Lauhdelämmön hyödyntäminen lämpöpumpulla

Lämpöpumpun tehtävänä on tuottaa lämmitysverkostoon riittävän lämmintä vettä. Kylmälaitoksesta saatavissa olevan lauhdelämmön lämpötilataso ja pysyvyys ovat riippuvaisia kohteen kylmälaitoksen toiminnasta ja ominaisuuksista. Lämmitysverkosto ja menoveden lämpötila on mitoitettu kiinteistön laskennallisen huippulämmitystehon mukaan. Useimmissa rakennuksissa lämmöntarve riippuu pääasiassa ulkolämpötilasta, joten menoveden lämpötilaa säädetään lämmitystarvetta mukaillen. Rakennusten lämmityskäytössä menoveden maksimilämpötilataso riippuu käytettävästä lämmönluovutustavasta. Ilmalämmityksessä veden lämpötila patterimitoituksesta riippuen 20–60 °C, lattialämmityksessä 25–35 °C ja patterilämmityksessä 40–60 °C. Ilman lämpöpumpulla tapahtuvaa lämpötilan nostoa jää lauhte-energialla hyödynnettävä lämmityksen osuus pieneksi. Kohteissa, joissa on käytössä lattialämmitys kyetään kylmälaitoksen lauhdelämpöä hyödyntämään kattavammin. Toteutettujen referenssikohteiden tulosten perusteella voidaan todeta kylmälaitoksista saatavan lauhteen riittävän <800m² kaupoissa yleisesti lämpöpumpun primäärienergianlähteeksi kaupan auki-

oloajan. Lisäenergiantarve esiintyy referenssikohteissa lämmityskaudella -8°C asteesta alkaen yöaikana klo 02.00-05.00, jolloin kaupankylmän jäähdytystehontarve on vähäisin ja vastaavasti lauhde-energiaa on käytettävissä vähemmän.

Lämpöpumppu on kylmäkoneikon kaltainen sähkölaite, jonka hyötysuhteeseen (COP) vaikuttavat samat tekijät kun kylmäkoneikon kyläkertoimeen (EER). Lämpöpumpun tehokkuutta kuvataan lämpökertoimella COP, jossa lämpöpumpun tuotto on lauhduttimesta saatu teho jaettuna prosessiin tuodun tehon summalla (kaava 2). Tuotu teho koostuu kompressorin tarvitsemasta tehosta P_k ja apulaitteiden tekemästä työstä P_{apu} .

$$\varphi = \frac{Q_{LP}}{P_k + P_{apu}} \quad \text{Kaava (2)}$$

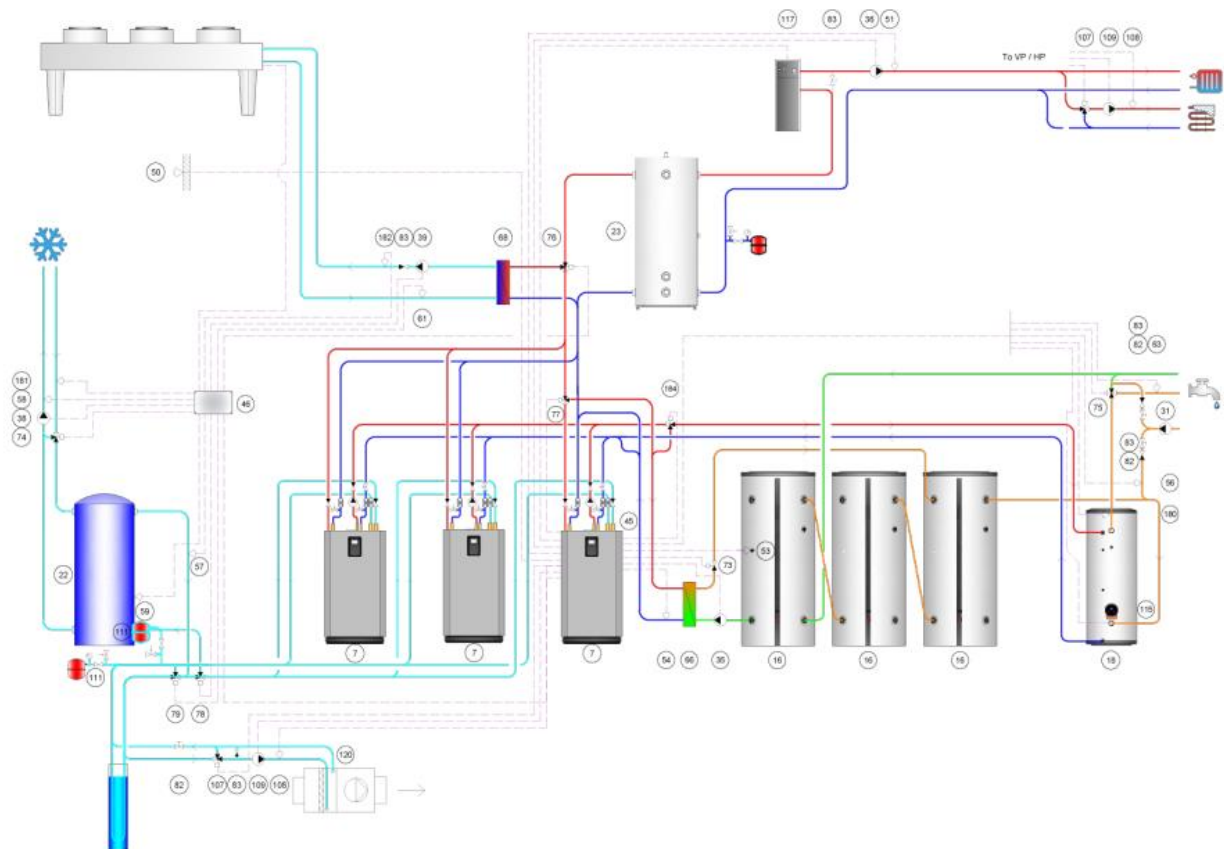
, jossa	φ	on lämpöpumpun hyötysuhde COP
	Q_{LP}	on lauhduttimelta saatu teho
	P_k	on kompressorin ottoteho
	P_{apu}	on apulaitteiden sähköteho

Lämpöpumpun hyötysuhteeseen ja lämpöpumpulla saavutettavaan kiinteistön kokonaisenergian tuottoon vaikuttavat merkittävästi kiinteistön lämmitykseen vaaditun veden lämpötilan ohella kylmälaitoksesta saatavavan lauhde-energian määrä sekä lauhteen lämpötila. Lämpöpumpulla tuotettavan lämmitysenergian osuutta voidaan kasvattaa merkittävästi varastoimalla lauhde-energiaa aikana, jolloin lämmityksen tarve on pienempi kun saatavissa olevan kylmälaitoksen lauhde-energia. Varastoinnissa voidaan hyödyntää lyhytaikaiseen tarpeeseen massavaraajaa tai vielä harvoin käytössä olevaa suuremman energiakapasiteetin omaavaa faasimuutosvaraajaa. Kohteissa, joissa tavoitellaan lämpöpumpulla katettavaksi kokovuoden lämmitysenergiantuotanto, käytetään lisäenergialähteenä energiakaivoja, jotka toimivat myös lauhdelämmön varastoina. Energiakaivojen merkitystä osana kiinteistöjen kylmälaitteistoja ja lämmitysjärjestelmää käydään läpi tarkemmin luvussa 4.2.

4.2 Energiakaivon hyödyntäminen lauhdelämmön varastoinnissa ja lämpöpumpun toiminnassa

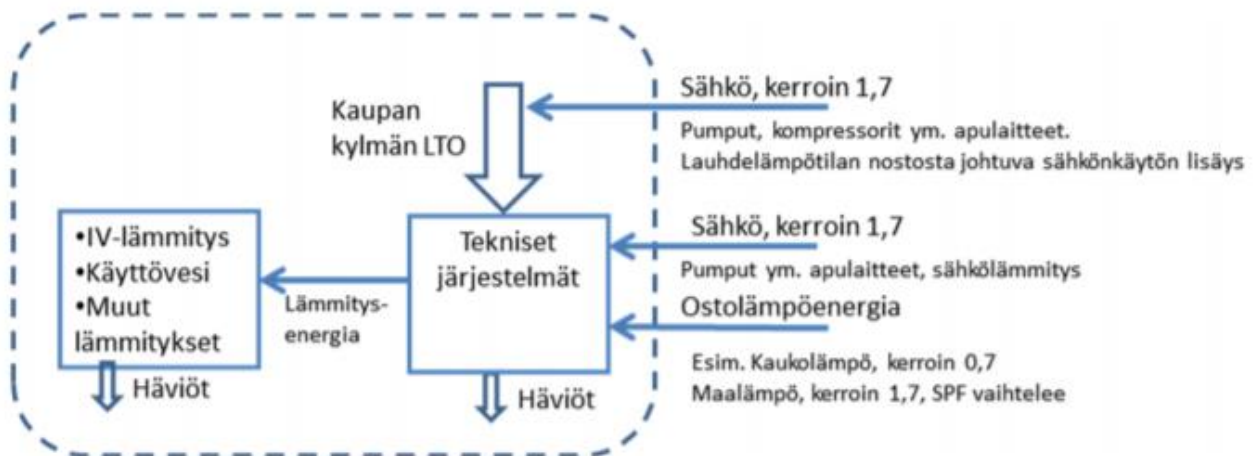
Energiakaivojen hyödyntäminen on yleistymässä kohteissa, joissa lauhdelämpöä on hyödynnettävissä merkittävästi. Yleisin maalämpösovellus on kalliolämmön hyödyntäminen maalämpöpumpun avulla rakennusten lämmityksessä. Kallioperän tasaisena pysyvän matalan lämpötilan vuoksi sitä voidaan hyödyntää tehokkaasti myös rakennusten jäähdytysjärjestelmän tuottaman lauhdelämmön tai muun lämpöenergian lämpövarastona. Jäähdytykseen energiakaivojen hyödyntämien voi olla joko kompressorivusteista tai vapaajäähdytystä. Energiakaivojen lämpötila on matala ja lähes ulkolämpötilasta riippumaton, mikä mahdollistaa kesäaikana matalan lauhtumislämpötilatason myös kaupan kylmäjärjestelmälle. Vapaa jäähdytyksessä viileää lämmönkeruunestettä pumpataan energiakaivoista jäähdytysjärjestelmän lämmönsiirtimille, jolloin energiakaivokenttä toimii jäähdytyksen lämpönieluna. Tällä tavalla jäähdytys voidaan toteuttaa ilman kompressorikoneistoa, jolloin kylmäkerroin on parempi, koska sähköenergiaa käytetään ainoastaan lämmönkeruunesteen pumppauksessa. (Pre-Design Guide, 2004.)

Energiakaivojen hyödyntäminen on mahdollista vapaajäähdytyksessä ja koneellisessa jäähdytyksessä. Kuvassa 10. on esitetty tulevaisuudessa toteutettava maalämpöjärjestelmä, jossa maalämpöpumppu toimii sekä lämmitys- että jäähdytyskäytössä. Jäähdytyskäytössä lauhtuslämpö voidaan siirtää kuvan mukaisesti ulkoilmaan tai myös energiakaivoihin, kun niiden lämpötilatasapaino säilyy hallinnassa.



Kuva 10.. Energiakaivoja hyödyntävä maalämpö- ja jäähdytysjärjestelmä.

Käytettäessä kalliota jäähdytysjärjestelmän lämpövarastona, kallion lämpötila nousee ja lämpöpumpun lämmitysprosessin hyötysuhde paranee. Lisäksi lauhdutettaessa lämpöä viileään kallioon kompressorikulutus on vähemmän sähköä kuin esimerkiksi ulkoilmaan lauhdutettaessa. Energiakaivon toimintaan vaikuttavat merkittävästi kallion lämmönjohtavuus, sekä mahdolliset kallion sisäiset veden virtaamat. Mitoitettaessa energiakaivokenttää onkin tärkeää tuntea energiakaivojen tavoitellun energiataseen lisäksi kallion lämmönjohto- ja varausominaisuudet. Energiakaivoihin ladattava kiinteistön sisässä syntyvä lauhde-energia huomioidaan e-lukulaskennassa uusiutuvaksi energiaksi. Kuvassa 11. on esitettyä kiinteistön e-luku laskennan perusteet.



Kuva 11. Lämmityksen taseraja E-lukulaskennassa (Motiva 2012, 23).

5 TUTKIMUSONGELMA

Päivittäistavaraliikkeen kylmälaitoksen laitteistovalintaan keskeisesti vaikuttavia tekijöitä ovat lainsäädäntö, investoinnin kustannusvaikutus, sekä käyttö- ja ylläpitokustannukset. Tällä tutkimuksella tuotetaan vertailukelpoista tietoa tutkittavien kylmälaitosten energiatehokkuudesta, sekä ympäristö- ja ilmastovaikutuksista. Tutkimuksessa huomioidaan lainsäädännön asettamat edellytykset kylmälaitteistoissa käytettäviin kylmäaineisiin, sekä energiatehokkuusvaatimuksiin. Tutkimuksella haetaan vastausta siihen, millaisia ovat ympäristö- ja kustannusvaikutusten kannalta suotuisimmat ratkaisut tuleviin kylmälaitosinvestointeihin. Tutkimus havainnollistaa erityyppisten kylmälaitosten toiminnan energiatehokkuutta päivittäistavaraliikkeissä, huomioiden kiinteistössä käytössä olevan lämmitysjärjestelmän. Tutkimus tarkastelee myös kiinteistöissä käytettävien automaatiojärjestelmien soveltuvuutta kiinteistön talotekniikka- ja kylmälaitosten synergiamahdollisuuksiin energiatehokkuuden näkökulmasta.

Tutkimuksessa kylmälaitostyyppit käsitellään järjestelmätasolla. Jäähdytysprosesseihin ei tässä työssä ole paneuduttu yksityiskohtaisesti. Tutkimuksen kolmen eri tutkimuskohteen tarkoitus on toimia havainnollistavina esimerkkeinä, joiden kautta tarkastellaan kylmäjärjestelmien synergian, sekä optimoinnin merkitystä energiatehokkuuden näkökulmasta. Tutkimus pyrkii tuottamaan tulevissa kylmälaitosinvestoinneissa hyödynnettävissä olevaa tietoa, sekä ottamaan osaa laajempaan kylmäalan ilmastovaikutuksista käytävään keskusteluun.

Tutkimuksen keskeinen tavoite on myös pyrkiä paikkaamaan aihetta koskevan ajankohtaisen tiedon puutetta.

Tutkimus keskittyy nimenomaan kylmälaitteistojen ympäristö- ja ilmastovaikutuksiin koskevaan lainsäädäntöön ja sen muutoksiin, eikä tutkimuksessa ole paneuduttu elintarvikehygieniaan koskevaan lainsäädäntöön.

5.1 Tutkimuksen toteutus

Tutkimus sisälsi kolmen toisistaan poikkeavan kylmälaitteiston toiminnan vertailun. Kohteet sijaitsevat Mikkelin kaupungin alueella. Tutkimuskohteiden valintaperusteina oli kiinteistöjen kolme eri kylmäaineella toimivaa, sekä toimintatavaltaan toisistaan poikkeavaa kylmälaitostyyppiä. Tutkimuksessa määriteltiin kiinteistössä käytettävien kylmäkalusteiden ja kylmäsäilytystilojen pinta-alat ja kalustemäärät, erotellen plus- ja pakkaskalusteet erilleen. Tutkimuksessa plus asteisista kylmälaitteistoista käytetään lyhennettä MT (mid temperature) ja pakkalaitteistoista LT (low temperature). Tutkimuksessa verrattiin MT laitteiden energiakulutusta kWh / kalustemetri kaavalla (3)

$$E_{MT} = \frac{\text{kokonaisenergia (kWh)}}{\text{MT kalusteet (m)}} = \frac{\text{kWh}}{\text{MTkalustemetri}} \quad \text{Kaava (3)}$$

sekä LT laitteiden energiakulutusta kaavalla (4)

$$E_{LT} = \frac{\text{kokonaisenergia(kWh)}}{\text{LTkalusteet(m)}} = \frac{\text{kWh}}{\text{LTkalustemetri}} \quad \text{Kaava (4)}$$

Yleisesti päivittäistavaraliikkeiden energiatehokkuutta mitataan arvolla energy efficiency index (EEI) (kaava 5.)

$$EEI = \frac{\text{energiakulutus(kWh)}}{\text{myymäläpinta-ala(m2)}} = \text{kWh/m2} \quad \text{Kaava (5)}$$

Tutkimuksen vertailulukuna käytettiin vuoden 2019 kiinteistökohtaisia energiankulutustietoja, jotka kerättiin Enerkey tietojärjestelmästä.

Tutkimusprosessissa pyrittiin kartoittamaan mahdollisimman laajasti alan kirjallisuutta. Kylmä-aineita koskevan lainsäädännön viimeaikaiset muutokset ovat kuitenkin johtaneet siihen, että painettua kirjallisuutta aiheesta on saatavissa rajoitetusti. Alan tuorein ja ajantasaisin tieto on pääasiassa saatavissa globaalisti toimivien suurten kylmä-aineita valmistavien yritysten tuottamista materiaaleista. Kylmälaitoksia koskevia tietoja ja tutkimustuloksia haettiin eri tiedonhakupöytäkirjoista, kuten ScienceDirect:istä. Kylmälaitosten energiatehokkuutta ja kylmäaineiden ominaisuuksia kuvaavaa tarkastelua suoritettiin CoolPack, sekä Coolselector® ohjelmistojen avulla.

Tutkimus käynnistyi kohdetietojen kirjauksilla. Tutkittavien kohteiden perustiedot ja kuukausikohtaiset kokonaisenergiakulutustiedot on tallennettu Granlund Manager, sekä Enrekey kiinteistöhallinta- ja energiaseurantajärjestelmiin. Kohteista laadittiin kiinteistötietokortit, joihin kerättiin tiedot käytössä olevista laitteistoista ja energiakulutuksista. Tiedot kattavat perustiedot kylmälaitoksista, käytettävistä kylmä-aineista ja myymälän kylmäkalusteista. Kylmälaitteistojen kulutusta verrattiin myymälän sisältämien kylmäkalusteiden kokonaismäärään. Kiinteistöjen kylmäkalusteista laadittiin vertailutaulukot kalustemääräkohtaisen vertailutiedon saavuttamiseksi. Kiinteistötietojärjestelmästä saatua tietoa hyödynnettiin kylmälaitteistojen- ja kiinteistöjen ominaisenergiakulutusta määriteltäessä. Lämmityskauden aikana määriteltiin kiinteistön kylmälaitteistosta saatavan lauhdelämmön osuus kiinteistön lämmitysenergian kulutuksessa. Työssä seurattiin ulkolämpötilan muutoksen aiheuttamaa vaikutusta kiinteistöjen kylmälaitosten energiakulutukseen. Tutkimuksessa määriteltiin tutkittavien kiinteistöjen jäähdytyskalusteille ominaistehontarve (W/m^2), jota verrattiin tutkittavien kohteiden kesken. Tutkimuksessa selvitettiin myös kylmälaitoksen energiakulutuksen osuus kiinteistöjen kokonaisenergiakulutuksesta. Tulosten analysoinnin yhteydessä selvitettiin kiinteistöautomaation ja kylmälaitteistoa ohjaavan automatiikan yhteensovituksen toimivuus kiinteistön energiakäytön osalta. Tutkimustulosten perusteella laadittiin vertailutaulukko tutkittavien kohteiden kylmälaitosten energiatehokkuudesta, sekä lauhdelämmön hyödyntämisestä kiinteistön lämmöntuotantoon.

Lämpöpumpun toimintaa osana kylmälaitosta tarkasteltiin myös kahden erillisen kohde-esimerkin avulla. Kohteet eivät kuulu tämän tutkimuksen varsinaisiin tutkimuskohteisiin, eikä niitä ole tässä työssä tarkasteltu laajemmin. Kohde-esimerkit toimivat täydentävänä osana

tarkasteltaessa lauhdelämmityksen hyödyntämisen merkitystä kiinteistön kokonaisenergiankulutukseen saneerauskohteissa. Samantyyllisiä saneeraustöitä ei ole suoritettu varsinaisissa tutkimuskohteissa. Varsinaiset tutkimuskohteet esitellään seuraavassa luvussa.

5.2 Tutkimuskohteet

Tutkimuskohteet ovat Osuuskauppa Suur-Savon päivittäistavaraliikkeitä. Kohteiden kylmälaitokset ovat toisistaan poikkeavia. Sale Otava (kohde A) edustaa tutkimuksessa perinteisintä keskuskoneellista kylmälaitostyyppiä. Kylmälaitoksessa on käytössä F-kaasuasetuksen piiriin kuuluva korkean GWP luvun omaava kylmäaine R 404. Laitoksen lauhdelämpöä hyödynnetään kylmäainekiertoisen lämmityspatterin välityksellä tuloilman lämmitykseen lämmityskauden aikana. Sale Savisilta (kohde B) edustaa omakoneellisiin kylmäkalusteisiin perustuvaa välillisen lauhdutuksen laitostyyppiä. ns. waterloop laitos. Laitos sisältää kylmäkalustekohtaiset kompressorikoneikot, joista lauhde on ohjattu keskitettyyn liuoskiertoiseen lauhdeverkostoon. Kylmälaitoksista vapautuva lauhdelämpö ohjautuu lämmityskauden aikana lämpöpumpun höyrystinpiirille ja kesäaikana kahteen energiakaivoon tai vesikatolla sijaitsevalle nestelauhduttimelle. S-Market Rantakylän (kohde C) kylmälaitteisto edustaa alhaisen GWP luvun omaavaa hiilidioksidilaitteistoa. Lämmityskauden aikana kompressorikoneikkoa hyödynnetään kohteessa kiinteistön lämmöntuotantoon, korottamalla kompressorikoneikon lauhtumispainetta lämmöntuoton osuuden kasvattamiseksi. Tutkimuskohteiden tarkempia tietoja on käyty läpi seuraavissa kappaleissa.

5.2.1 Tutkimuskohde A: Sale Otava

Sale Otava on taajama-alueella sijaitseva Sale ryhmään kuuluva myymälä, jonka rakennusvuosi on 2001. Myymälän bruttopinta-ala on 664 m². Liikkeen kylmälaitos rakentuu vuonna 2001 asennetuista R 404 kylmäaineella toimivista plus- ja pakkaskoneikoista. Koneikko koostuu neljästä MT kompressorista ja kolmesta LT kompressorista. Myymälän kylmäkalusteet on uusittu vuonna 2016. Kiinteistön lämmitys on toteutettu sähkötoimisilla säteilylämmittimillä, sekä tuloilman lämmityksellä. Kylmälaitosten lauhdelämpöä hyödynnetään tuloilman lämmityksessä sekä tuulikaapin kiertoilmalämmittimissä. Tuloilman jälkilämmitys on toteutettu sähkölämmityspatterilla. Lämmityskauden ulkopuolisena aikana kylmäaine lauhdu-

tetaan lauhdepatterin välityksellä ulkoilmaan. Kiinteistön sähkönkulutus mitataan etäluettavalla päämittarilla. Sähkönkulutustietoa tallentuu järjestelmään tuntitason tarkkuudella. Kylmälaitoksen sähkönmittaus on sijoitettu kylmälaitoksen sähkökeskukseen. Kylmälaitoksen energiakulutus seurannan lukemat on kerätty kohteeseen suoritettujen katselmuskäyntien yhteydessä. Taulukossa 2. on esitelty kohteen tarkempia kohdetietoja.

Taulukko 2. Kohdetiedot: Tutkimuskohde A

KIINTEISTÖ	
Rakennusvuosi	2001
Huoneistoala m ²	665,8
Tilavuus m ³	2689
Lämmitysmuoto	Sähkö
Ilmanvaihto	Koneellinen
KONEIKKO	
Malli	Keskus
Kylmäaine	R404A
GWP-arvo	3922
Käyttöönottovuosi	2001
MT nimellisteho kW	63,1
LT nimellisteho kW	15,8
KALUSTETIEDOT	
MT pinta-ala m ²	30,04
LT pinta-ala m ²	10,74

5.2.2 Tutkimuskohde B: Sale Savisilta

Sale Savisilta on vuonna 2016 Savisillan kaupunginosaan rakennettu päivittäistavaraliike. Liikkeen pinta-ala on 688,5m². Liikkeen kylmäjärjestelmä koostuu omakoneellisista kylmäkalusteista. Kylmäaineena koneikoissa on käytössä R 410 kylmäaine. Nestelauhdutteisista useista eri jäähdytysyksiköistä koostuvaa kokonaisuutta, jossa yksiköiden lauhde kerätään keskitetysti yhteiseen lauhdeverkostoon, kuvataan water loop järjestelmäksi. Kohteessa kylmälaitosten lauhdelämpö hyödynnetään kiinteistön lämmityskäytössä, tai ohjataan järjestelmään sisältyviin kahteen energiakaivoon. Lämpöpumppu hyödyntää lauhdelämmöstä vapautuvaa energiaa lämpöpumpun höyrystimessä. Kohteen lauhdelämmön hyödyntämistä on käsitelty lisää kappaleissa 5 ja 6. Kohteen ilmanvaihtojärjestelmä toimii tarpeenmukaisesti sisäilman CO₂ pitoisuuden ja poistoilman lämpötilan mukaan. Ilmanvaihto- ja lämmitysjärjestelmää ohjaa kiinteistöautomaatiikka. Kesäajan jäähdytys on hoidettu tuloilmakonee-

seen asennetun energiakaivoja hyödyntävän jäähdytyspatterin avulla. Lämpimän käyttöveden tuotto on hoidettu sähkölämmitteisen käyttövesivaraajan avulla. Kohdetiedot ovat esitelty alla olevassa taulukossa 3.

Taulukko 3. Kohdetiedot: Tutkimuskohde B

KIINTEISTÖ	
Rakennusvuosi	2015
Huoneistoala m ²	688,5
Tilavuus m ³	3150
Lämmitysmuoto	Maalämpö
Ilmanvaihto	Koneellinen
KONEIKKO	
	Omakoneellinen
Malli	Waterloop
Kylmäaine	R410A
GWP-arvo	1720
Käyttöönottovuosi	2015
MT nimellisteho kW	48,79
LT nimellisteho kW	13,1
KALUSTETIEDOT	
MT pinta-ala m ²	32,26
LT pinta-ala m ²	12,08

5.2.3 Tutkimuskohde C: S-Market Rantakylä

S-Market Rantakylä on tutkimuskohteista suurin ja ainoa, joka kuuluu market kokoluokan myymälöihin. Kauppa on rakennettu vuonna 1980. Myymälään on suoritettu peruskorjaus vuonna 1990 ja laajennus vuonna 2001. Kohteen kylmäjärjestelmä on uusittu vuonna 2014. Kylmälaitos on CO₂ kylmäaineella toimiva ns. booster koneikko. Booster koneikossa pakkaspuolen kompressorien lauhdelämpö ohjataan plussakompressoreiden imulinjaan. Koneikkoa hyödynnetään lämmityskauden aikana kiinteistön lämmitykseen, lauhtumislämmön painetta korottamalla. Paineenkorotuksen ohjaus on toteutettu kiinteistöautomaatiikan välityksellä. Kiinteistön lämmitys tapahtuu tuloilmakoneen välityksellä. Tuloilmakone sisältää lauhdelämpöpatterin ja sähköisen jälkilämmityspatterin. Ilmanvaihdon ohjaus toimii sisäilman CO₂ mittauksen ohjaamana. Normaaliolosuhteissa kone pyörii ½ nopeudella, sisäilman CO₂ pitoisuuden ylittäessä 900ppm. ohjautuu kone täydelle teholle. Tuloilman lämmitystä ohjataan huonetermostaattien avulla. Myymäläkiinteistön piha-alueella sijaitsee polttoainejakelupiste. Tarkempia kohdetietoja taulukossa 4.

Taulukko 4. Kohdetiedot: Tutkimuskohde C

KIINTEISTÖ	
Rakennusvuosi	1980
Huoneistoala m ²	1900,6
Tilavuus m ³	10420
Lämmitysmuoto	Sähkö
Ilmanvaihto	Koneellinen
KONEIKKO	
Malli	Keskuskoneellinen booster
Kylmäaine	R744
GWP-arvo	1
Käyttöönottovuosi	2014
MT nimellisteho kW	117
LT nimellisteho kW	31
KALUSTETIEDOT	
MT pinta-ala m ²	93,15
LT pinta-ala m ²	65,34

6 ENERGIAKULUTUS TUTKIMUSKOhteissa

Tässä kappaleessa arvioidaan kylmälaitoksen vaikutusta kiinteistön kokonaisenergiakulutukseen tutkimuskohteissa. Tutkimus osoittaa, että yksin kylmälaitoksen energiakulutuksella ei ole ratkaisevaa merkitystä kiinteistön kokonaisenergiakulutuksen kannalta, huolimatta siitä, että kylmälaitteiston elinkaarikustannuksista jopa 90 % aiheutuu laitteiston käytön aikaisista energiakustannuksista. Kylmälaitoksen investointipäätöstä suoritettaessa hankintahinta on kuitenkin edelleen ratkaisevassa asemassa. Ratkaisuvaihtoehtoja suoritetaan useimmiten erillishankintana, jolloin yhteensovittaminen kiinteistön muiden taloteknisten ratkaisuiden kanssa jää vähälle huomiolle, tai jopa huomiotta. Vaakakupissa painaa lainsäädännön asettamat rajoitteet käytettävien kylmäaineiden osalta, sekä ennusteet kylmäaineiden markkinatilanteesta ja siitä seuraavasta hinnoittelusta.

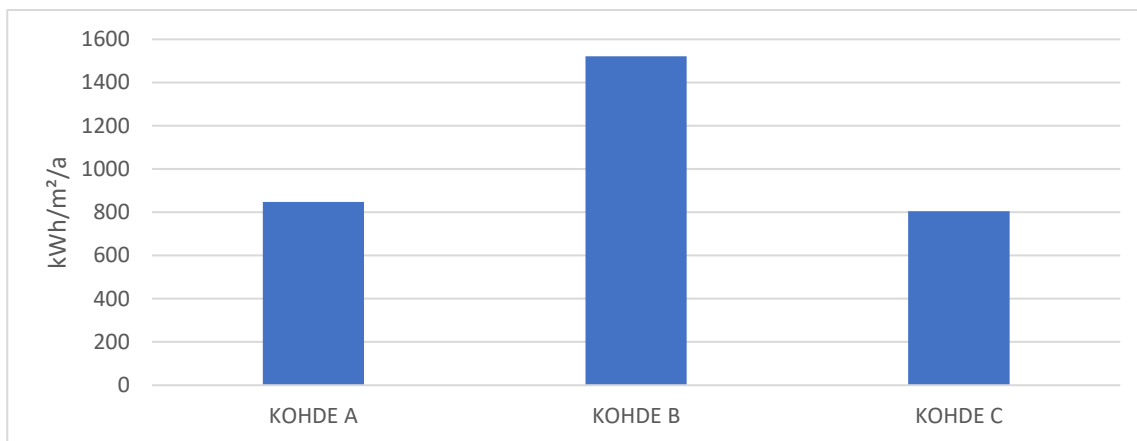
Kylmälaitoksissa hyödynnettävien kylmäaineiden lämmönsiirto- ja virtausominaisuuksien vaikutukset kiinteistön kokonaisenergiatavotteeseen ovat vähäiset. Hiilidioksidia (CO₂) kylmäaineena käytettävässä laitoksessa putkiston paineenkestolle asettuu merkittävästi korkeammat vaatimukset, kun puolestaan putkistokoko hiilidioksidilaitoksissa on merkittävästi

pienempi. Kylmäaineputkiston mitoituksessa laitoksen energiatehokkuuteen voidaan vaikuttaa huomioimalla riittävä putkistokoko ja mahdollisimman vähäiset kertavastukset alhaisen dynaamisen painehäviön aikaansaamiseksi. Tyypillisenä raja-arvona on yleisesti käytössä 2 K sallittu painehäviö. Kylmälaitoksen energiakulutuksen kannalta merkittävimmät tekijät ovat kylmäprosessin höyrystymis- ja lauhtumislämpötilat. Yhden asteen muutos höyrystymis- tai lauhtumislämpötilassa vastaa n. 3% laitoksen energiakulutuksessa. Höyrystymislämpötilaa pyritään laitoksissa nostamaan mahdollisimman korkeaksi, elintarvikeviranomaisten säättämän tuotevalvonnan asettamien rajoitusten mukaan. Keskuskoneellisessa kylmälaitoksessa alhaisimman höyrystymislämpötilan määrittää jäähdytysverkostoon kytkeytyvän alhaisimman lämpötilatason edellyttämä kylmäkaluste. Viimevuosina kalusteiden höyrystymislämpötiloja on kyetty nostamaan asentamalla kalusteisiin ovia ja kansia lämmön johtumisen estämiseksi. Energiansäästöä on mahdollisuus saada aikaan myös kylmäkalusteiden käytön optimoinnilla, jolloin kylmälaitteiston automatiikka sallii höyrystymislämpötilan vaihdella kuormitusta vastaavalla tasolla. Myös lauhtumispainetta voidaan optimoida sallimalla lauhtumispaineen vaihtelu lauhteen luovutuslämpötilaa vastaavalla tasolla. Optimoinnista käytetään yleisesti nimitystä kellutus.

Seuraavissa kappaleissa käydään läpi tutkimuskohteiden kylmälaitteistojen energiatehokkuutta, kiinteistöjen kokonaisenergiatehokkuutta sekä kiinteistön kylmälaitteiston lauhdelämmön hyödyntämisominaisuuksia. Kappaleissa havainnollistetaan kuinka kylmälaitteistojen energiatehokkuusvertailu kokonaisenergiankulutuksesta irrallisena ei ole mielekäästä, ja kuinka kiinteistön energiatehokkuutta voidaan parantaa kattavan lauhdelämmön hyödyntämisen avulla.

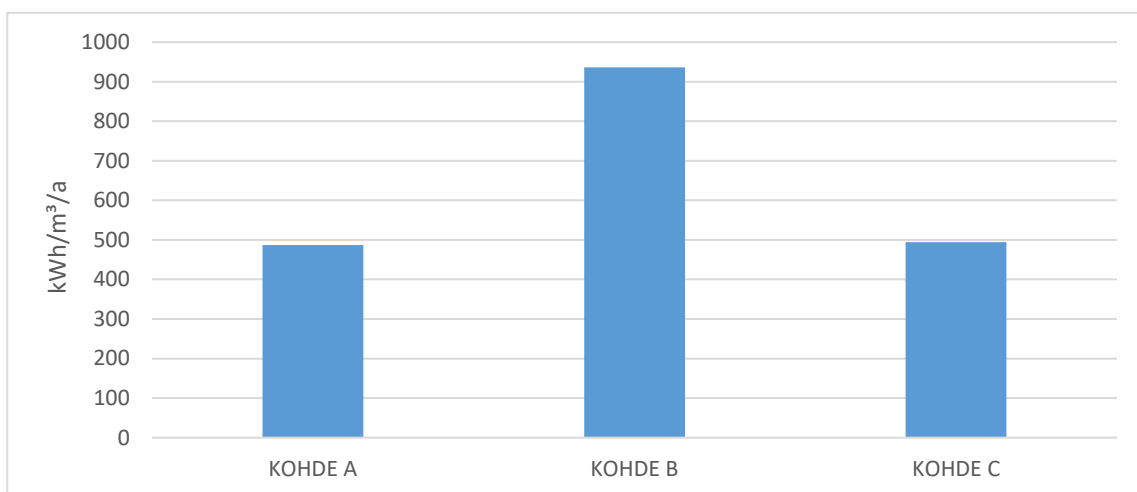
6.1 Kiinteistöjen kylmälaitteistojen energiakulutusvertailu

Tutkimuskohteiden kylmälaitteistojen energiakulutusvertailu sisältää tutkimuskohdekohtaisen kylmäkalusteiden pinta-ala ja tilavuustiedot. Tutkimuksessa verrattiin jäähdytettyjen tilojen energiakulutusta määrittämällä laitteistojen ominaissähkön kulutusta kWh/m²/a (kuva 12) ja kWh/m³/a (kuva 13). S-ryhmän alueosuuskauppa HOK-Elannolle tehdyn Pro Gradu -tutkielman mukaan kylmälaitteiden osuus kokonaisähkönkulutuksesta Alepa myymälöissä on keskimäärin 56 %, S-marketeissa 52 % ja Prismoissa 34 % (Styrman 2018, 30)



Kuva 12. Jäähdytettyjen tilojen energiankulutus kWh/m²/a

Jäähdytettävien tilojen pinta-alojen suhteessa säilytystilojen tilavuuteen ei tutkimuskohteiden välillä ollut merkittäviä eroja.



Kuva 13. Jäähdytettyjen tilojen energiankulutus kWh/m³/a

Tutkimuskohteissa jäähdytyslaitteiston osuus kokonaisenergiankulutuksesta vaihtelee 20—50 prosentin välillä (kuva 14). Kohteissa A ja C kylmälaitoksen hyötysuhde muuttuu lauhtumispaineen nousun johdosta kesäaikana. Merkittävä muutos hyötysuhteessa tapahtuu kohteessa C, jossa CO² laitoksen energiankulutuksen vaihtelu näkyy kesäaikana olosuhteissa, jolloin järjestelmä toimii kriittisen pisteen yläpuolella, eikä faasimuutos toteudu. Kohteessa B ulkolämpötilasta riippuva vaihtelu on vähäisin, johtuen energiakaivojen hyödyntämisestä lauhtumislämpötilan säätelyssä.



Kuva 14. Kylmälaitteistojen osuus kiinteistön kokonaisenergiakulutuksesta.

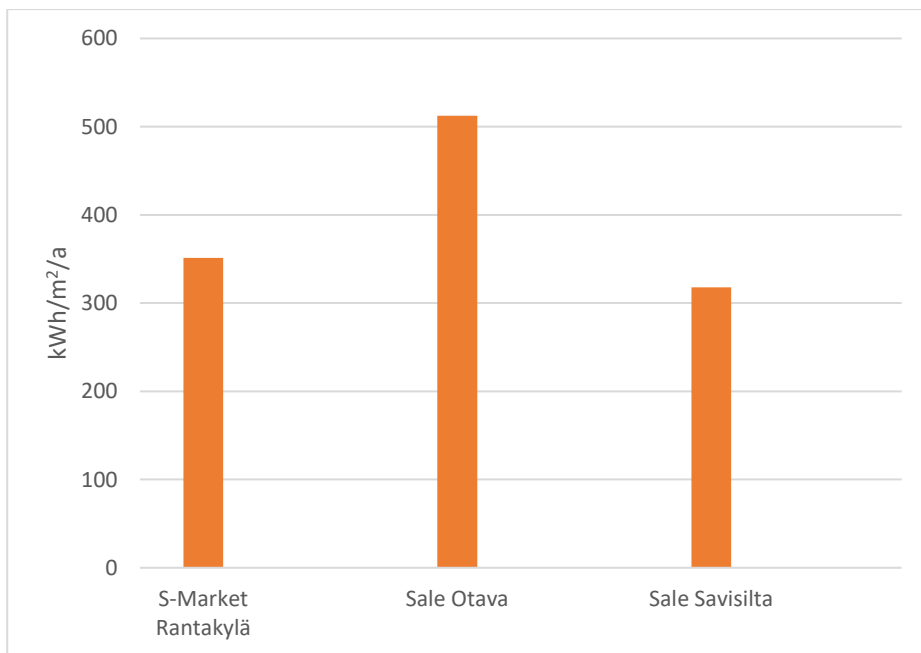
6.2 Kiinteistöjen kokonaisenergiankulutus vertailu

Tässä kappaleessa verrataan kiinteistöjen välisiä kokonaisenergiankulutustietoja. Päivittäistavarakauppojen sähköenergian ominaiskulutus bruttopinta-alaa kohden on hypermarketeissa keskimäärin 220 kWh/brm², market-kokoluokan liikkeissä 320–460 kWh/brm² ja lähikaupoissa 600 kWh/brm². Lämmön ominaiskulutus bruttopinta-alaa kohden on marketeissa 130–170 kWh/brm² ja lähikaupoissa 120 kWh/brm². Market kauppoihin lukeutuvat <400 m² kaupat ja lähikauppoja ovat 100–400 m² kaupat. (Motiva 2012, 5.) Energiategokkaan kylmälaitteiston ohella kiinteistön energiakäytössä on tarpeen huomioida rakennuksissa suotuisa ja tarpeenmukainen sisäilmasto, valaistus sekä lämpimän veden saanti. Näiden kaikkien tuottamiseen ja ylläpitämiseen kuluu paljon energiaa, ja siksi onkin tärkeää huomioida energiategokkaat ratkaisut kokonaisuutena. Tutkimuskohteiden keskinäinen energiankulutus poikkeaa toisistaan merkittävästi, johtuen kohteiden erityyppisten kylmälaitostyyppien lisäksi erityyppisistä lämmityksen ja valaistuksen toteutustavoista. Kiinteistöjen energiankäytön jaottelua lämmityksen, valaistuksen ja muun sähkönkäytön osalta hankaloitti tutkimuskohteiden sähkönkulutuksen erillismittaroinnin puuteellisuus. Tutkimuskohteissa kokonaisenergiakulutuksen ohella luotettavaa mittaustietoa oli saatavissa ainoastaan erillismittaroinnilla varustettujen kylmälaitteistojen osalta. Kokonaisenergiankäytön jakauman arvioinnissa hyödynnettiin Enerkey ohjelmistoa, jonka pohjalta todettiin sähkönkäytön kasvun suuruus lämmityskauden aikana suhteutettuna ulkolämpötilaan. Ohjelmisto mahdollisti sähkönkäytön seurannan tuntikulutuksen tarkkuudella. Enerkey ohjelmiston avulla määriteltiin kiinteistön sisävalaistuksen, ilmanvaihdon, sekä muun sähkönkäytön osuus, erottamalla kokonaisenergiakulutuksesta vastaavan ajan kylmälaitteiston käyttämä energia (taulukko 5).

Taulukko 5. Kiinteistöjen energiankäytön jakauma

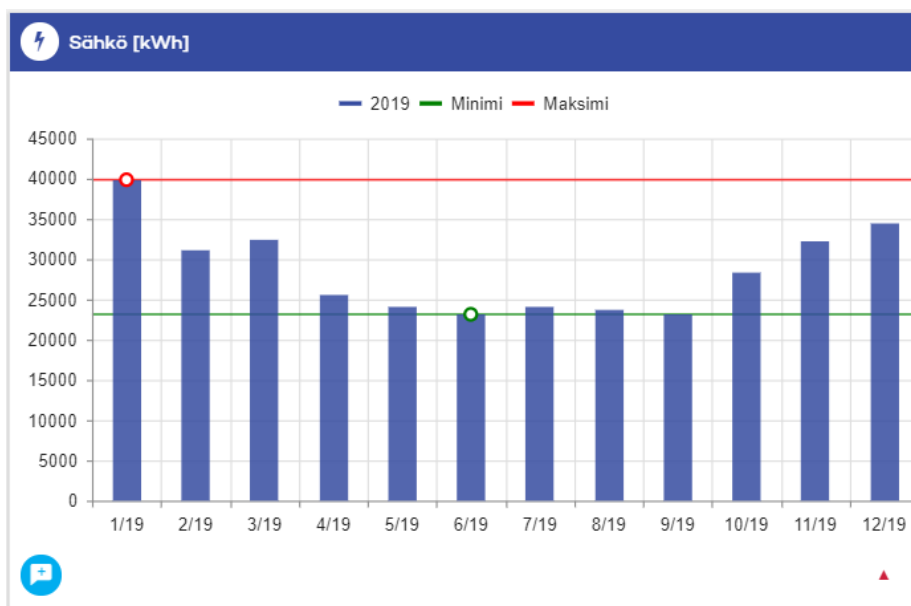
	S-Market Rantakylä		Sale Otava		Sale Savisilta	
Kiinteistön kokonaisenergiankulutus (MWh/a)	667,6		341,3		218,9	
kylmälaitteiston osuus (MWh/a)	208	31 %	69	20 %	111	51 %
IV ja lämmitys (MWh/a)	300	45 %	150	44 %	52	24 %
valaistus (MWh/a)	87	13 %	90	26 %	42	19 %
Muu	73	11 %	34	10 %	13	6 %
		100 %		100 %		100 %

Kuvassa 15. esitettynä tutkimuskohteiden ominaisenergiankulutustiedot. Kohteissa ominaisenergiankulutuksen vaihteluväli suurimman ja pienimmän välillä on 38 prosenttia. Kiinteistön kokonaisenergiankulutusta vertaillen esiin nousee lauhdelämmön hyödyntämisen merkitys kiinteistön lämmitysenergiankäytössä.



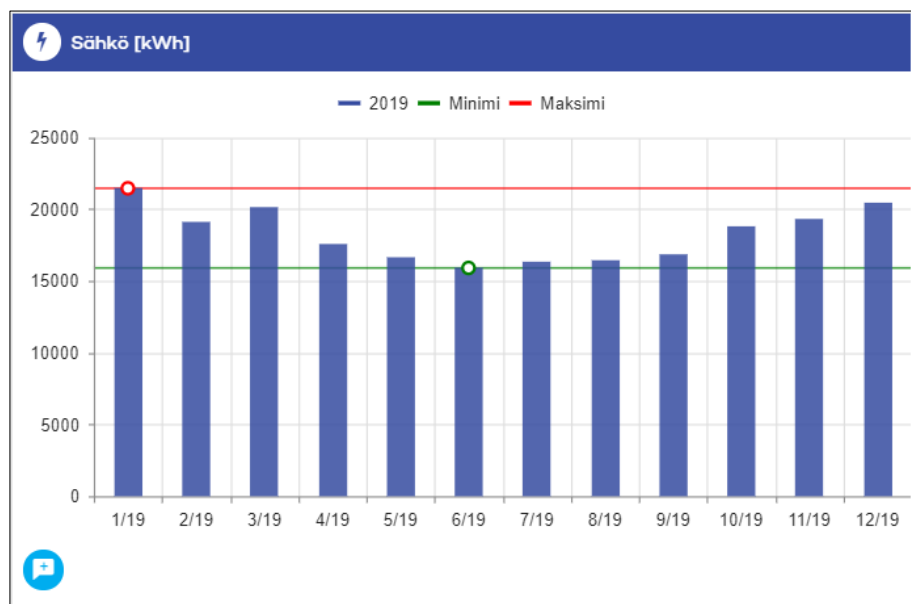
Kuva 15. Tutkimuskohteiden ominaisenergiankulutus.

Kuva 16. kuvaa vuodenajan vaikutusta kiinteistön kokonaisenergiankulutukseen tutkimuskohteessa A. Tutkimus osoittaa lämmitykseen tarvittavan lisäenergian kasvun talvikuukausina. Heinäkuun sähkönkulutuksen keskiteho on 32 kW. Tammikuussa vastaava luku on 53,5 kW.



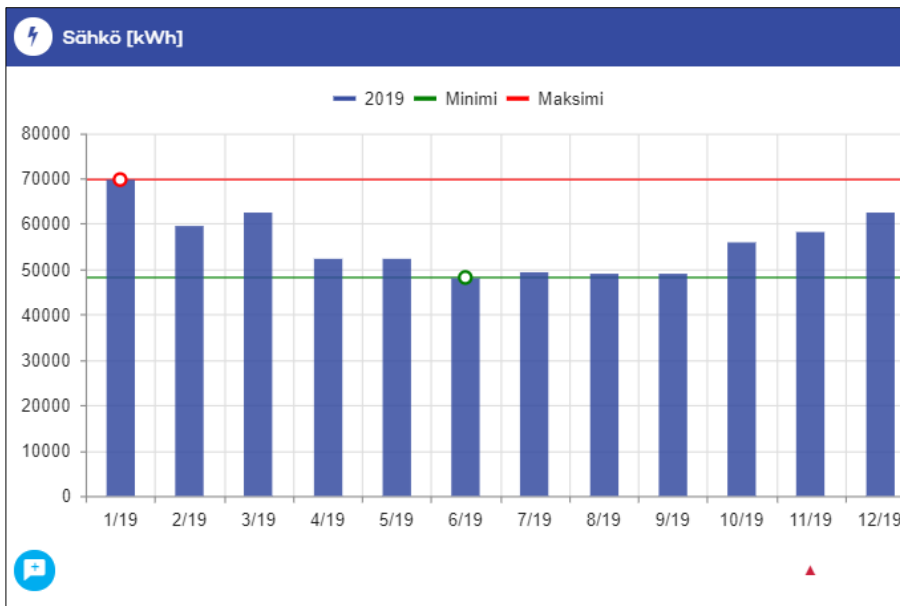
Kuva 16. Kohde A: Sale Otava kokonaisenergiankulutus 2019.

Kuva 17. kuvaa kuukausittaisen energiakulutuksen vaikutusta kiinteistön kokonaisenergiakulutukseen tutkimuskohteessa B. Kohteessa heinäkuun 2019 sähkönkulutuksen keskiteho on 24,6 kW ja tammikuussa 35,6 kW.



Kuva 17. Kohde B: Sale Savisilta kokonaisenergiankulutus 2019.

Kohteen C kuukausittainen kokonaisenergiakulutus on esitelty kuvassa 18. Kohteen heinäkuun 2019 sähkönkulutuksen keskiteho on 66,4 kW ja vastaava luku tammikuussa 93,7 kW.



Kuva 18. Kohde C: S-Market Rantakylä kokonaisenergiankulutus 2019.

Kohteessa A, Sale Otava, kiinteistön kylmälaitteiston vuotuinen energiankulutus suhteessa kokonaisenergiankulutukseen on tutkimuskohteista alhaisin, mutta kiinteistön ominaisenergiakulutus puolestaan tutkimuskohteista korkein. Kylmäsäilytyksen ominaiskulutuksen perusteella kohde C, S-Market Rantakylä, toimii energiatehokkaimmin, kuitenkin kiinteistön ominaisenergiakulutusta nostaa sähköisen tuloilmalämmityksen käyttö lämmityskauden aikana. Lauhdelämmön kattavammalla käytöllä kohteen lämmitykseen käytettävää energiankulutusta olisi mahdollista vähentää tuntuvasti. Liittämällä järjestelmään energiakaivot olisi mahdollista varastoida lämmityskauden ulkopuolella hyödyntämätöntä lauhde-energiaa ja rajoittaa laitteiston toimintaa ylikriittisellä alueella lämpimänä aikana. Tutkimuskohde B, Sale Savisilta, omaa tutkimuskohteista alhaisimman kiinteistön ominaisenergiankulutuksen, johon keskeisesti vaikuttavia tekijöitä ovat matalalla lämpötilalla toimiva lämmitysjärjestelmä, sekä sisäilmaston huomioiva ilmanvaihdon tarpeenmukaistaminen. Lämmönsiirto on kohteessa toteutettu lattialämmityksellä ja kiertoilmatoiminnolla varustetulla ilmanvaihtokoneella. Kohteen jäädytettyjen tilojen energiankulutus on noin 48 prosenttia korkeampi kuin tutkimuskohteista matalimmassa. Tästä energiankulutuksesta 31 prosenttia kuluu lauhdeverkon kiertovesipumpussa. Energiatehokkuuden parantamiseksi kohteessa tulisi selvittää mahdollisuudet lauhdeverkon virtaaman optimoinnin mahdollisuuksiin.

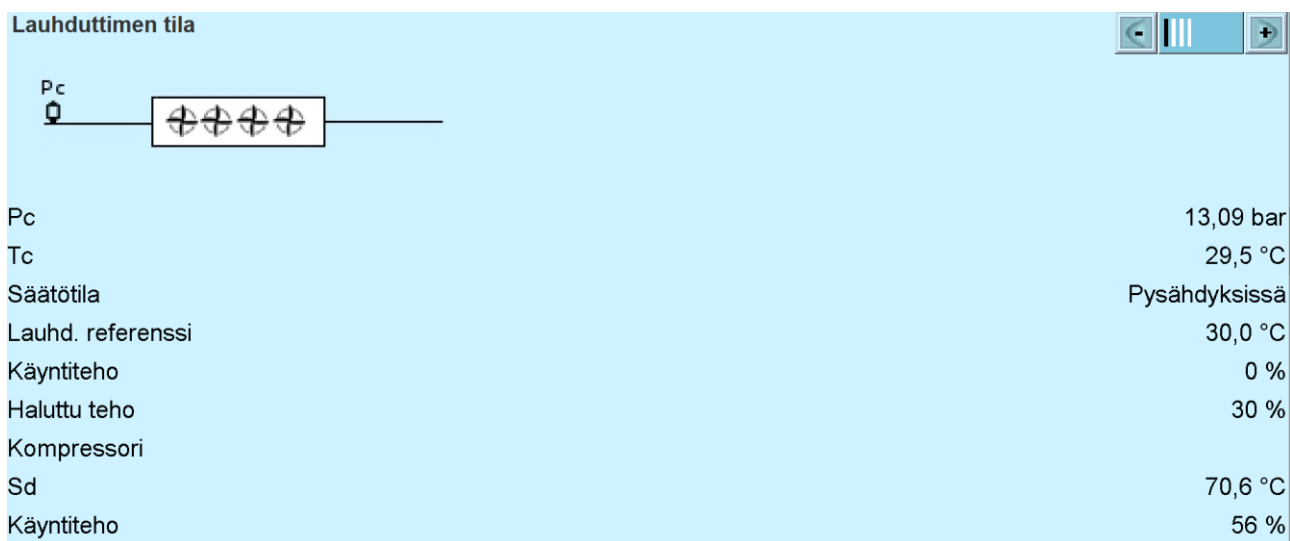
6.3 Lauhdelämmön energiatehokkuuden vertailu

Tässä kappaleessa vertaillaan kiinteistön kylmälaitteiston lauhdelämmön hyödyntämisominaisuuksia. Kuten aikaisempien kappaleiden perusteella voidaan todeta, on lauhdelämmön hyödyntämisellä merkittävä vaikutus kiinteistön kokonaisenergiankulutukseen. Erityisesti tutkimuskohteiden A ja C osalta lämmityskauden ulkopuolisena aikana merkittävä osa lauhde-energiaa johdetaan ulos ilman hyödyntämismahdollisuutta. Alla on käsitelty lauhteen hyödyntämistä tutkimuskohteittain.

6.3.1 Tutkimuskohde A: Sale Otava

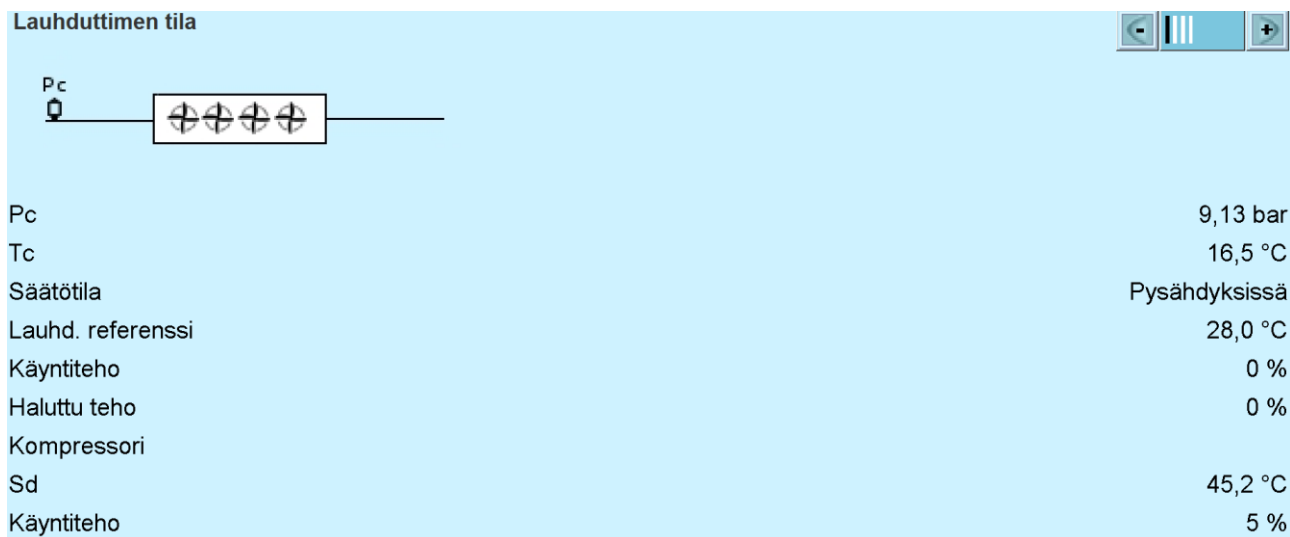
Sale Otavassa lauhdelämmön talteenotto on toteutettu pakkas- ja plussakoneikkojen kuumakaasuputkistoihin sijoitettujen lämmönsiirrinten avulla. Lämmönsiirrinten ensiöpuolella virtaa kylmäainehöyry kompressorin pumppaamana. Höyryn energiasisältöön vaikuttavat höyryn lämpötila ja tiheys. Lämmönsiirtimen toisiopuolella virtaa etyleeniglykoli lämmönsiirtoneste. Nesteen lämpötilaa säädetään kylmälaitoksen automatiikan ohjaamana, pyrkimyksenä sitoa kylmäainekierrossa olevasta kuumakaasusta lämpö alhaisimman lämpötilan nesteeseen. Nesteen lämpötilan ja virtauksen välityksellä säädetään kylmäaineen lauhtumislämpötila ja paine koneikon vakaan toiminnan edellyttämälle tasolle. Lämmityskauden ulkopuolisena aikana kylmäaineen lauhtuminen toteutetaan ulkona sijaitsevan puhallinlauhduttimen avulla. Kohteessa lauhtumisenergian määrää säätelee koneikkojen käyntiajat ja käyntitehot. Järjestelmä ei sisällä lauhde-energian varastointia. Kohteen kylmälaitosten kokonaisenergiakulutus oli vuonna 2019 68.9 MWh. Kylmälaitoksen toimintaa ohjaa ja säätää Danfoss kylmälaitosautomaattikka.

Kuvassa 19. pakastekoneikon lämmönsiirtimelle virtaavan kuumakaasun lämpötila (S_d) kuvan tallennushetkellä oli 70,6° C. Lämmönsiirtimen jälkeen lämpötila on laskenut tasoon (T_c) 29,5° C. Tallennushetkellä koneikon käyntiteho on ollut 56 % kokonaistehosta. Pakastekoneikon alhaisesta imukaasun lämpötilasta johtuen kuumakaasun lämpötila on n. 30K korkeampi kuin plussakoneikon kuumakaasun lämpötila. Pakastekoneikon teho tutkimuskohteessa on 25 % plussakoneikon tehosta, jolloin lauhteen kokonaismäärä on merkittävästi pienempi kun plussakoneikosta saatavan lauhde-energian määrä. Pakkaskoneikon puhaltimet käynnistyvät kun kuumakaasu saavuttaa lämmöntalteenoton jälkeen lämpötilan +30°C. Lämmityskauden ajan puhaltimet ovat normaalisti sammuksissa.



Kuva 19. JK1 Pakastekoneen lauhdepiiri.

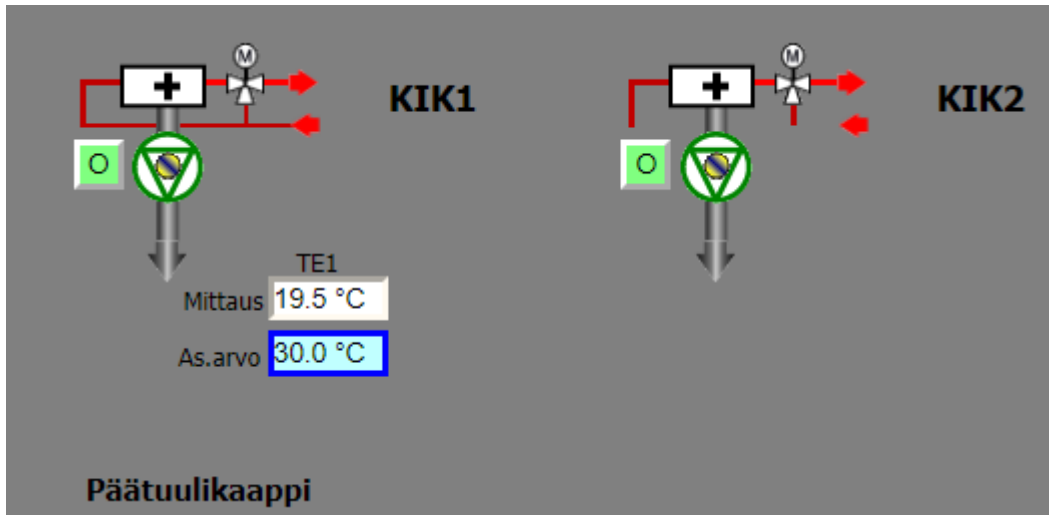
Kuvassa 20. plussakoneikon lauhdepiiri, jossa lämmönsiirtimelle tulevan kuumakaasun lämpötila on 45,2°C. Koneikon käyntiteho 5 % koneikon kokonaistehosta. Plussakoneikosta saatavan lauhde-energian osuus saatavan lauhde-energian kokonaismäärästä on n. 75 %. Plussakoneikon ulkoilmalauhduttimen puhaltimet käynnistyvät, kun LTO; siirtimeltä ulkoilmalauhduttimelle virtaava kuumakaasu saavuttaa lämpötilan + 28.0°C.



Kuva 20. JK 2 Plussakoneikon lauhdepiiri.

Lauhdelämmön hyödyntäminen on toteutettu tuloilmakanavistoon asennetun lauhdepatteerin-, sekä tuulikaappiin sijoitettujen kiertoilmalämmitinten välityksellä (kuva 21). Tuloilmako-

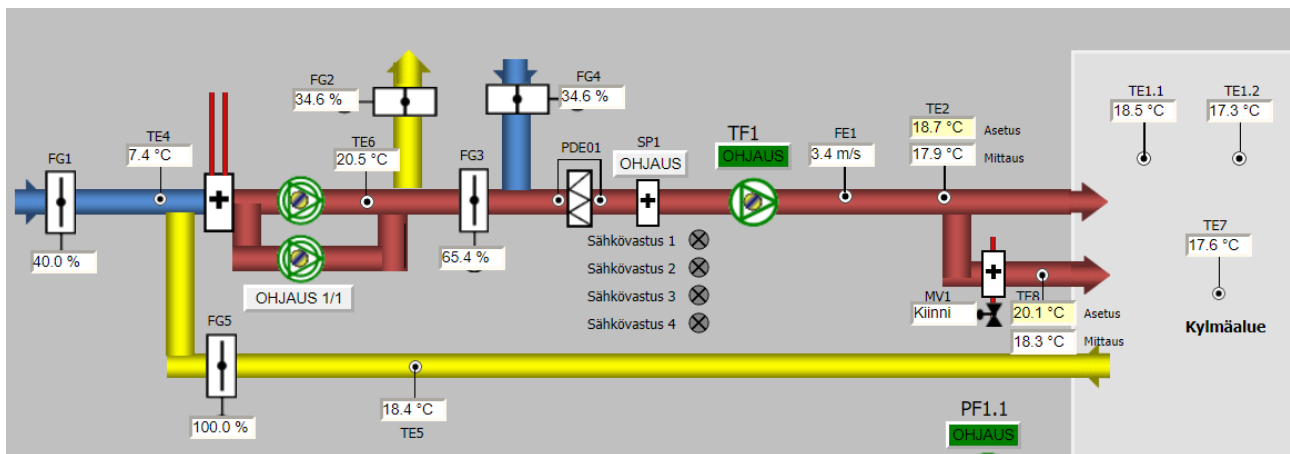
neen lauhdepatteri on sijoitettu tuloilman esilämmitykseen, ennen sähkötoimista jälkilämmityspatteria. Lauhdelämpö kyetään hyödyntämään hyvällä hyötysuhteella tuloilman lämpötilan ollessa alhainen.



Kuva 21. Tuulikaapin kiertoilmalämmittimet.

Kuvan 21. kiertoilmalämmittimien toimintaa ohjataan kiinteistöautomaatiikan välityksellä. Lämmityskauden aikana tuloilman asetusarvoksi on asetettu + 30°C lauhdelämmön jatkuvan hyödyntämisen varmistamiseksi. Kiertoilmalämmittimet on varustettu nestekiertoisilla lämmityspattereilla ja lämmön siirtoa tehostavilla puhaltimilla. Tuulikaappiin sijoitettujen kiertoilmalämmittimien tehtävä on rajoittaa lämmityskauden aikana ulko-oven avoinnaolon aikaista kylmän ilman sisään virtausta.

Tuloilmakoneikko on varustettu kylmälaitoksen lauhdepiiriin kytketyllä nestekiertoisella esilämmityspatterilla (kuva 22). Esilämmityspatterin tehoa ohjataan kiinteistöautomaatiikan välityksellä, hyödynnettävissä olevan lauhdetehon, sekä asetetun tuloilman lämpötilan perusteella. Tuloilman jälkilämmitys on toteutettu sähkölämmitteisen patterin avulla. Kohteessa sisäilman lämpöolosuhteet totutetaan tuloilman lämmityksen välityksellä, sekä taustatiloihin sijoitettujen sähköpatterien avulla.

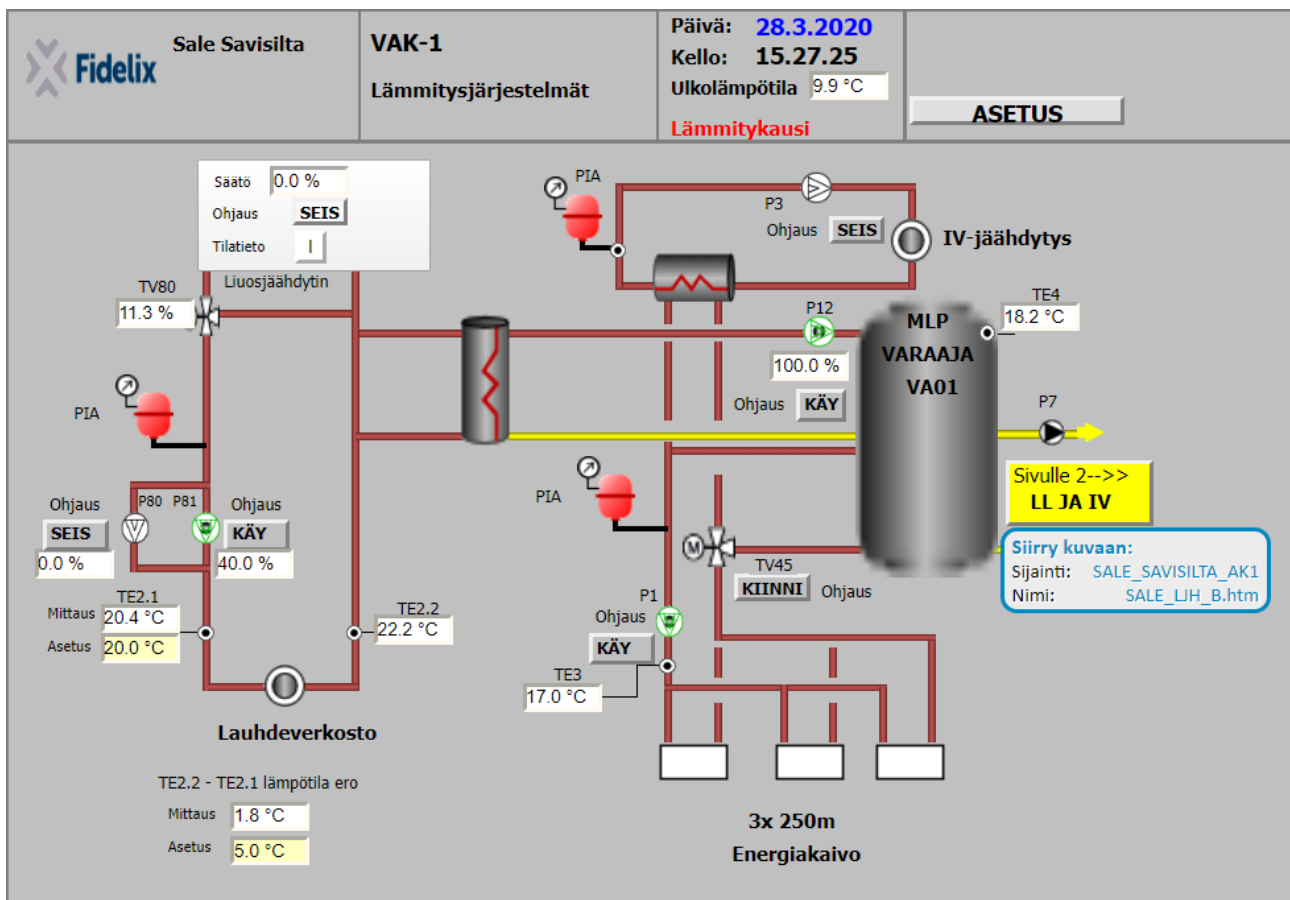


Kuva 22. Myymälätilan tuloilmakone.

Tuloilman esilämmityspatteri on energiatehokas tapa hyödyntää lauhde-energiaa lämmityskauden aikana. Lauhdelämmön lisäksi kiinteistön lämmityssähkön kulutus oli vuonna 2019 n.150 MWh. Lämmitykseen käytetyn sähkön osuus kokonaisenergiankulutuksesta oli n. 44%. Lauhdelämmön osuus kiinteistön lämmityksestä 40MWh/a. Lämmityksen osuudesta lauhde-energialla katetaan kohteessa n. 21%. Lauhdelämmön hyödyntämistä kiinteistön lämmön tuotantoon olisi mahdollista lisätä lauhteen välillisen varastoinnin- ja lämpöpump-putekniikan avulla.

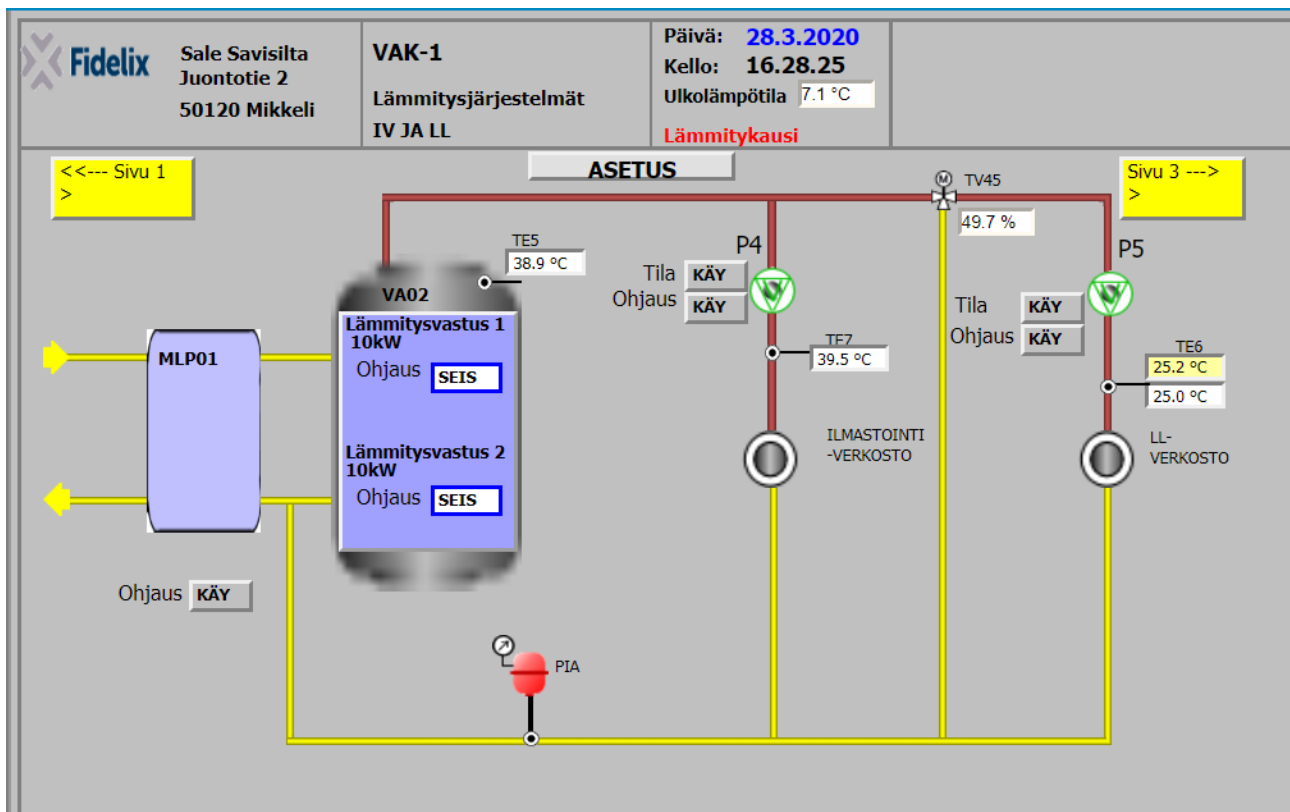
6.3.2 Tutkimuskohde B: Sale Savisilta

Sale Savisilta on rakennettu vuonna 2016. Kohde on erityisen mielenkiintoinen siitä syystä, että itselläni oli mahdollisuus olla mukana kiinteistön LVI tekniikan suunnittelussa ja kylmälaitoksen rakentamisessa alusta alkaen. Kiinteistön kylmälaitteistoksi valikoitui omakoneellisiin kalusteisiin perustuva Waterloop järjestelmä, josta saatavan lauhdelämmön hyödyntämiselle asetettiin korkea tavoite jo suunnittelun alkuvaiheessa. Waterloop järjestelmässä jokainen kylmäkaluste on varustettu kalusteen yhteyteen asennetulla kompressorikoneikolla ja nestelauhduttimella. Nestelauhduttimelta lauhde kerätään myymälää kiertävän lauhdeputkiverkoston välityksellä ensisijaisesti kuvassa 23. näkyvään lauhdevaraajaan. Kohteen lämmitys on toteutettu maalämpöpumpulla, jonka höyrystinpiiriin johdetaan neste lauhdevaraajasta. Lämmönsiirto tilojen lämmitykseen tapahtuu lattialämmityksen ja tuloilman jälkilämmityksen välityksellä. Kohteeseen porattiin kaksi energiakaivoa, jotka toimivat kesäaikaan lauhde-energian varastoina ja lämmityskaudella lämpöpumpun primäärienergiälähteinä.



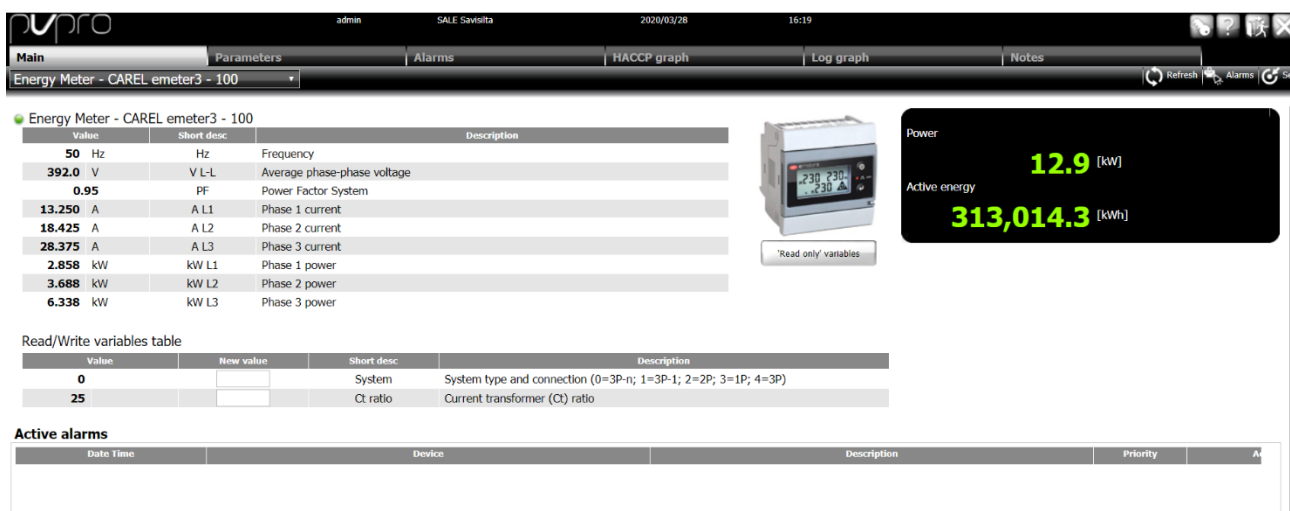
Kuva 23. Sale Savisilta lauhdepiiri.

Kuvassa 24. on esitetty lämpöpumppu, joka toimii kiinteistön pääasiallisena lämmönlähteenä. Kohteessa toimiva lämpöpumppu on Gemin 64kW. Lämpöpumpulta lämpö johdetaan varajaan ja lämmitysverkostoon alla olevan kuvan mukaisesti (kuva 24).



Kuva 24. Sale Savisilta lämmitys.

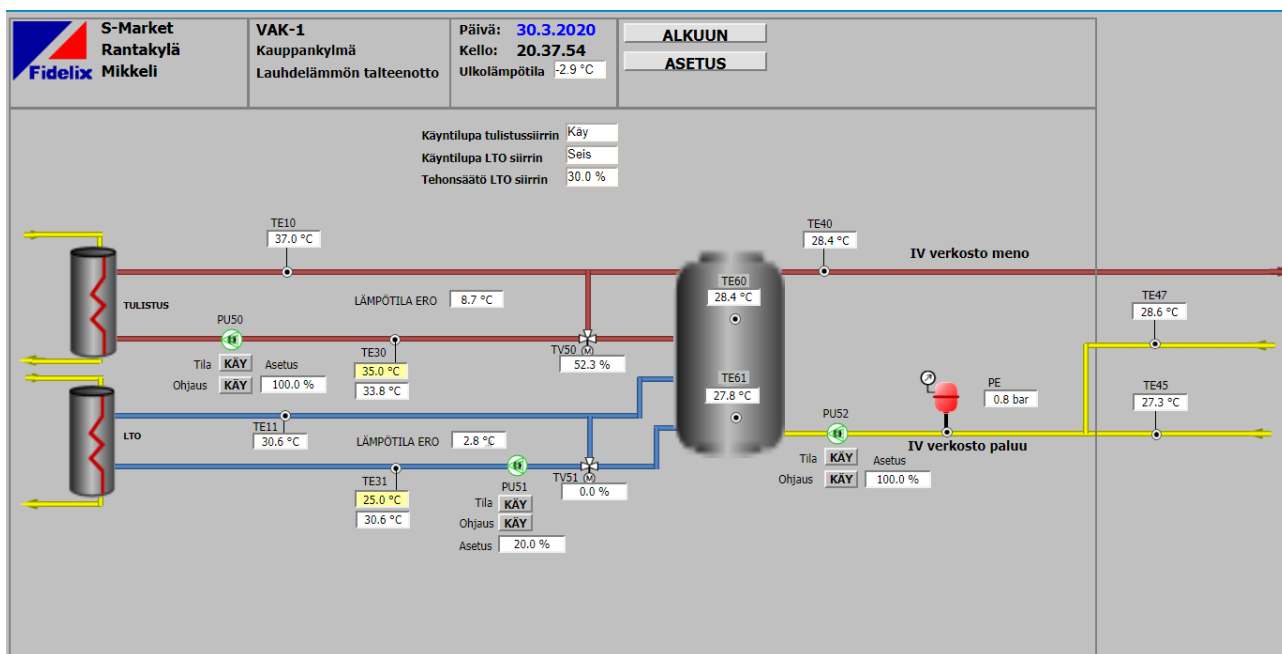
Kylmäaineena jäähdytysyksiköissä on käytössä R 410 kylmäaine. Kylmälaitoksen säätö- ja ohjausautomaattikka Carel pvpro mahdollistaa järjestelmän reaaliaikaisen seurannan ja ohjausmuutokset internetin välityksellä (kuva 25).



Kuva 25. Kuvassa energiamittaus Carel pvpro ohjausautomaattikalla.

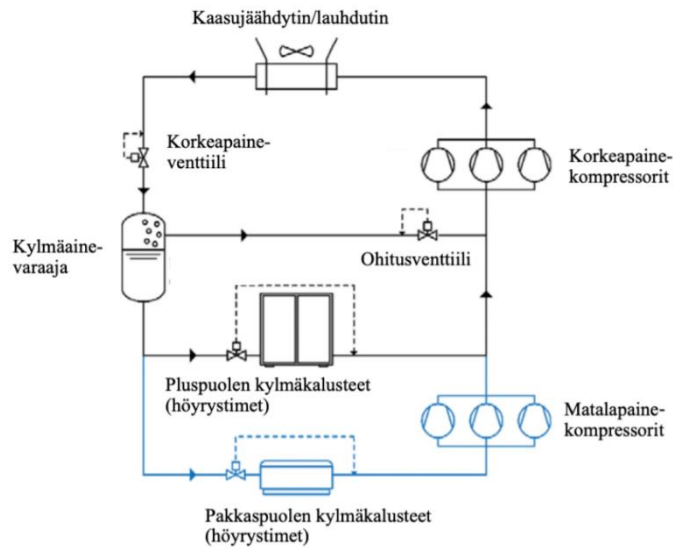
6.3.3 Tutkimuskohde C: S-Market Rantakylä

S-Market Rantakylän CO₂ kylmälaitoksen lauhdelämpö tuotetaan tulistuslämmönsiirtimen ja päälauhduttimen avulla (kuva 26). Lauhduttimilta lauhde-energia johdetaan lauhdevaraa-jaan, josta edelleen tuloilman esilämmitykseen. Kiinteistöautomaatiikka ohjaa kylmälaitoksen lauhtumislämpötilan korotusta lämmityskauden aikana lämmöntuoton lisäämiseksi. Suurimman osan vuodesta järjestelmä toimii alikriittisellä alueella, jolloin aikaansaadun faasimuutoksen ansiosta järjestelmän kylmäntuoton energiatehokkuus säilyy hyvällä tasolla. CO₂ koneikon energiatehokkuuden arviointi lämpöpumpuna on haasteellista, koska lauhtumislämpötilan nostamisen vaikutusta koneikon energiankulutukseen ei voida tarkasti eritellä. Kohteessa käytössäoleva Booster-järjestelmä rinnakkaiskompressorilla edustaa transkriittisten CO₂ -järjestelmien toista sukupolvea, ja se on ollut kaupallisesti saatavilla vasta vuodesta 2011. Danfossin mukaan kyseinen järjestelmä on esimerkiksi Tukholmassa noin 23 % energiatehokkaampi kuin R404A-järjestelmä. Suurin osa kylmäjärjestelmistä on asennettuna Etelä-Euroopassa ja lämpimän ilmaston maissa. (Danfoss 2017, 10, 14, 28.)



Kuva 26. Kohde C: S-Market Rantakylä lauhdepiiri.

Kuvassa 27 vuodesta 2011 alkaen markkinoilla olleen tyypillisen CO₂ booster-koneikon toiminnan periaatekaavio.

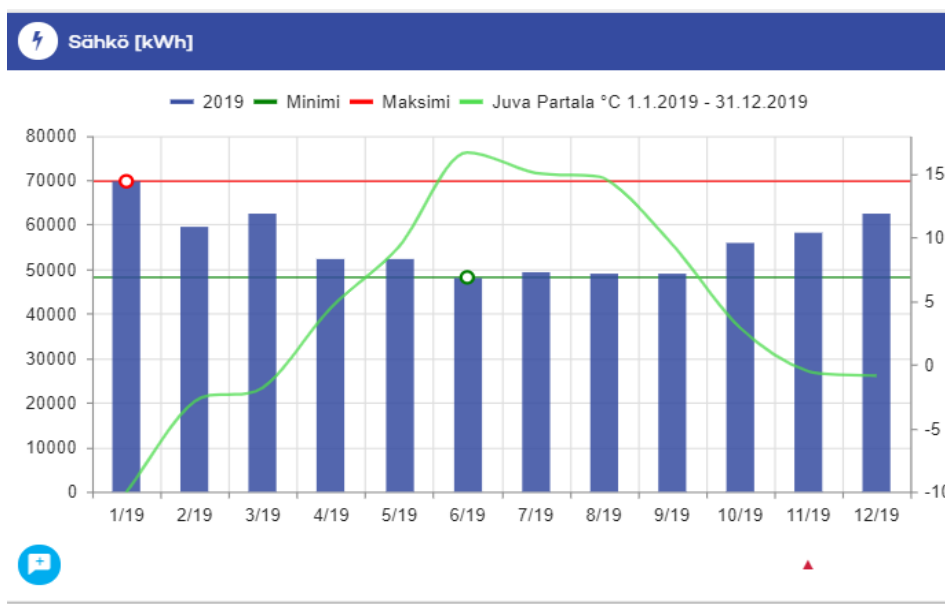


Kuva 27. Tyypillinen CO₂ booster-koneikko.

7 LÄMPÖPUMPPU OSANA LÄMMITYSJÄRJESTELMÄÄ

Kuten aikaisemmissa kappaleissa on kuvattu, on päivittäistavaraliikkeiden kylmälaitteistoista saatavissa järjestelmästä riippuen eri suuruiset määrät lämmitykseen hyödynnettävää lauhdelämpöä. Kuitenkaan lauhteen lämpötila ei usein itsessään ole riittävän korkealla tasolla hyödynnettäväksi kiinteistön lämmityskäyttöön. Lauhde-energialla saavutettava lämpötila rajoittuu tyypillisesti +30°C asteeseen kun kiinteistön lämmitykseen vaaditaan +30—60°C asteen lämpötila. Hyödynnettäessä lauhdelämpöä lämpöpumpun primäärienergiälähteenä on saavutettavissa hyvä hyötysuhde lämpöpumpun toiminnalle. Mikäli lämpöpumpulle johdettava liuos on +15°C, voi lämpöpumpun hyötysuhde (COP) olla yli 7.

Nykyteknologia tarjoaa lämpöpumppuihin pohjautuvia ratkaisuja yhdistettynä kiinteistön lämmityksen- ja kesäajan viilennystarpeeseen. Tämän tutkimuksen tutkimuskohteissa lämpöpumppuratkaisua on hyödynnetty Sale Savisillassa (tutkimuskohde B). S-Market Ranta-kylän (tutkimuskohde C) hiilidioksidia (CO₂) kylmäaineena käyttävää koneikkoa hyödynnetään kiinteistön lämmöntuotantoon, korottamalla kylmäaineen lauhtumislämpötilaa kiinteistön lämmöntarpeen mukaan. Kompressorikoneikon paineenkorotus näkyy kohteen lämmityskauden aikaisena kulutuksen kasvuna. Kylmäkoneikon hyödyntäminen on taloudellisesti kannattavaa kohteissa, joissa muu lämmöntuotanto tapahtuu sähköllä. Kuva 28. havainnollistaa ulkolämpötilan vaikutuksen CO₂ kompressorikoneikon sähkönkulutukseen.

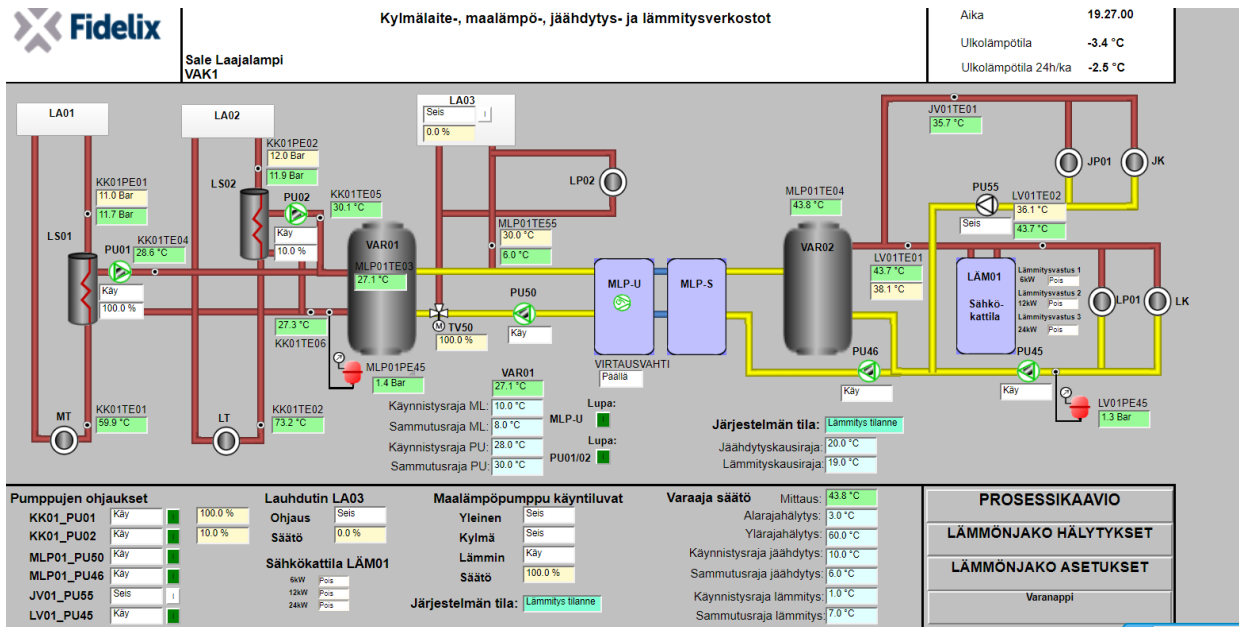


Kuva 28: S-Market Rantakylä (kohde C) sähkönkulutus vuositaso.

Lämpöpumpun toimintaa osana kylmälaitosta esitellään kahden tutkimuskohteista erillisen kohteen avulla. Sale Laajalampi, lämpöpumppulaitos ilman energiakaivoja ja Sale Puumala, jossa kohteeseen porattiin 2 kpl 250 m syviä energiakaivoja. Näiden esimerkkien tarkoitus on osoittaa lauhdelämmityksen hyödyntämisen merkitys kiinteistön kokonaisenergiankulutukseen saneerauskohteissa. Kyseisiä muutoksia ei ole toteutettu tutkielman tutkimuskohteissa.

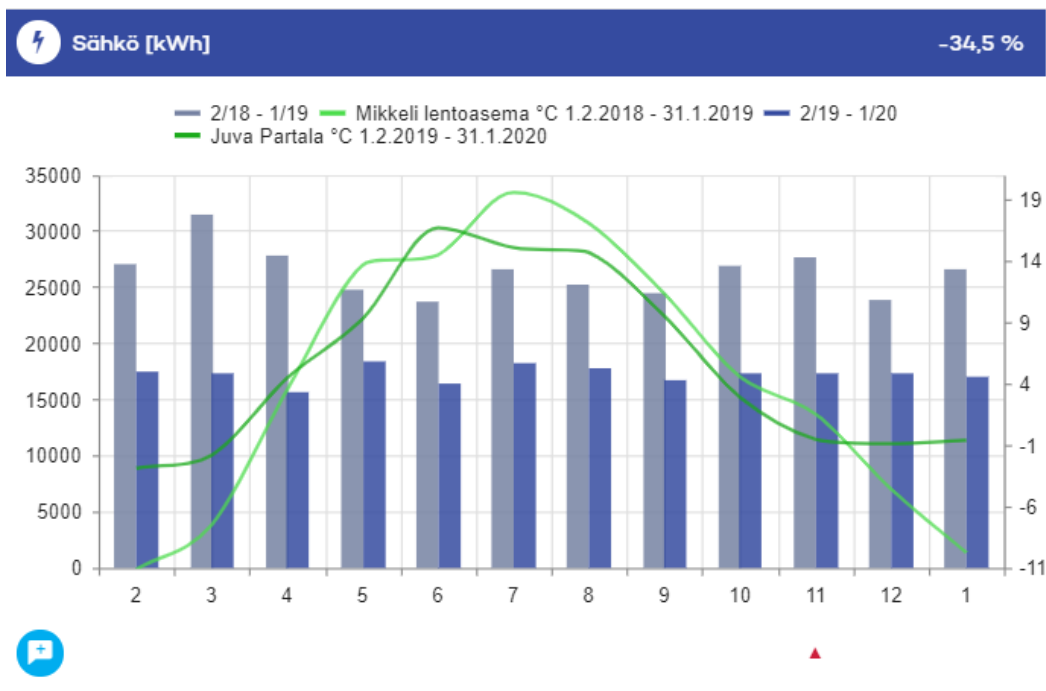
Kuvan 29. kohteessa Sale Laajalampi suoritettujen kylmäkalusteiden uusinnan yhteydessä korvattiin sähköisellä tuloilman lämmityksellä ja kattosäteilijöillä toiminut lämmitysjärjestelmä lauhdelämpöä hyödyntävällä lämpöpumppuratkaisulla. Kohteessa ei remontin yhteydessä uusittu kylmäkoneikkoja. Kohteen sijainnista johtuen ei järjestelmään liitetty energiakaivoja. Lämmöntuottojärjestelmä sisältää kylmäainepiireissä olevat lämmönsiirtimet, joiden välityksellä kylmälaitoksen lämpö johdetaan lauhdevaraajaan. Kiinteistöautomaatiikka huolehtii säädetyn paineen säilymisen kylmäainepiirissä. Lauhdevaraajasta energia johdetaan lämpöpumpulle, joka nostaa lämmitykseen käytettävän veden lämmityksen tarpeen edellyttämälle tasolle. Järjestelmä sisältää sähkötoimisen läpivirtauslämmittimen, joka toimii menoveden lämpötilan ohjaamana, nostaen verkostoon johdettavan veden lämpötilan asetetun hetken arvoon, mikäli lämpöpumpulta tulevan veden lämpötila on alhaisempi, kun ase-

tusarvo. Jäähdytystarpeen aikana järjestelmä toimii vedenjäähdyttimenä, tuottaen tarvittavan kuivaus- ja viilennystehon IV koneelle ja kattokonvektoreille. Alla olevassa kuvassa (kuva 29) Sale Laajalammen lämpöpumppujärjestelmä.



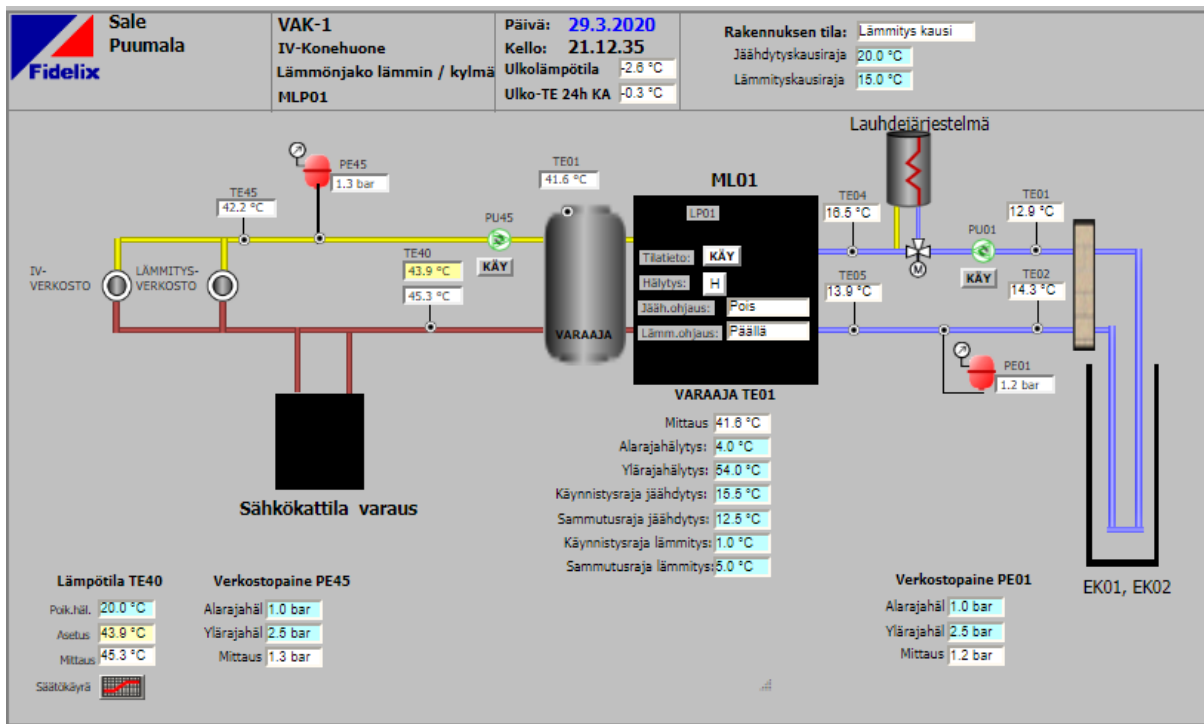
Kuva 29. Sale Laajalammi

Yhdessä kylmäkalusteiden uusinnan kanssa suoritettujen toimenpiteiden aikaansaama säästö vuotuisessa energiankulutuksessa on 34,5%. Kohteen energiankulutuksen seurannasta voidaan havaita, ettei ulkolämpötilan muutoksella ole merkittävää vaikutusta kiinteistön energiakulutukseen lämpöpumppuasennuksen jälkeen (kuva 30).



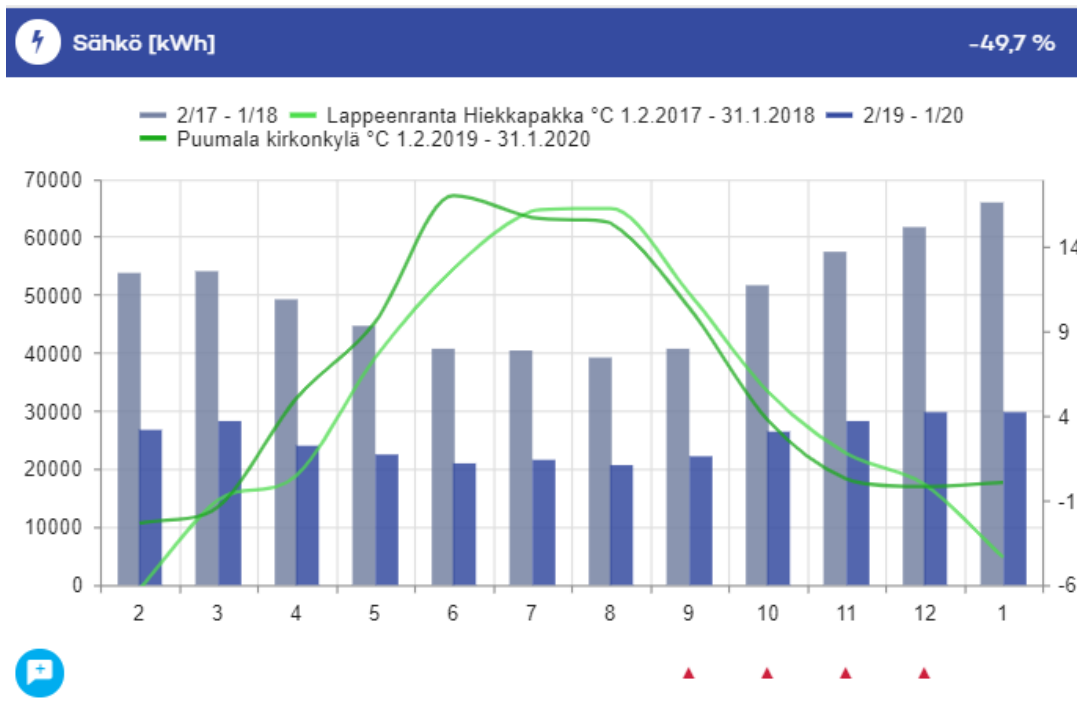
Kuva 30. Sale Laajalampi sähkönkulutus 2018-2019.

Kohteessa Sale Puumala korvattiin vanha keskuskoneellinen kylmälaitos waterloop järjestelmällä. Kalusteet uusittiin ovellisiin omakoneellisiin kaappikylmiöihin ja pakkasvarastoihin. Järjestelmä varustettiin lämpöpumpulla ja energiakaivoilla (kuva 31). Kiinteistön lämmitysjärjestelmään lisättiin kattoon asennettavia puhallinkonvektoreita, joiden välityksellä tapahtuu pääosa kiinteistö lämmityksestä. Puhallinkonvektorit ja lämpöpumppu toimii ke-säaikana tilojen jäähdytyksessä ja ilman kuivauksessa.



Kuva 31. Sale Puumala lämmitysjärjestelmä.

Sale Puumala kiinteistön energiakulutus laski kylmälaiteiston uusinnan ja lämpöpumppu-asennuksen jälkeen 49% (kuva 32). Myös vuodenaikojen välinen energiakulutuksen vaihtelu väheni kohteessa merkittävästi.



Kuva 32. Sale Puumala sähkönkulutus 2018-2019.

Kohde-esimerkit osoittavat kuinka järjestelmän uusinnalla ja lauhteen hyödyntämisellä lämmityksen vaatiman energian määrän vaikutukset kokonaisenergiankulutukseen jäävät vähäisiksi.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Kylmä-alaa koettelee yksi historiansa suurimmista muutoksista. Kansallinen ja EU-lainsäädäntö pakottavat siirtymään ympäristöystävällisempiin kylmäaineisiin vuoteen 2030 mennessä. Edessä on noin 2300 päivittäistavaraliikkeen kylmälaitoksen uusinta vastaamaan F-kaasuasetusta. Pelkästään uusittavien kylmälaitosten uusinnan taloudellinen arvo on 700–800 miljoonaa euroa. Lisäksi lauhdelämpöä hyödyntävien lämpöpumppujen ja lämpöpumpputeknologian sovellusten odotetaan kasvattavan suosiota kasvaneen markkinamahdollisuuksien ohjauksen vaikutuksesta.

Tämän tutkimuksen valossa voidaan todeta, että tulevaisuudessa investoinneissa on keskeistä tarkastella kylmälaitosta osana kiinteistön taloteknistä kokonaisuutta. Pelkästään kylmälaitteistojen ominaiskulutusten ja pinta-alojen välisen korrelaation tutkiminen osoitti, että tutkimuskohteiden energiatehokkuuksien tasoja ei ole mielekästä verrata keskenään. Johtopäätöksenä voidaan tutkimuksen tuloksista todeta, että jokaista kohdetta on tarkasteltava yksilönä, huomioiden kohteen ominaispiirteet. Lainsäädännön edellyttämät, että S-ryhmän itse asettamat tavoitteet edellyttävät energiankäytön osalta tulevaisuudessa entistäkin tarkempaa seuranta- ja jokaisen osa-alueen kriittistä tarkastelua. Asetetut tavoitteet ylläpitävät jatkuvan investointi- ja kehittämistarpeen vähintään sopimuskauden 2030 loppuun asti. Uusien rakennusten osalta energiatehokkaaseen toimintaan tähtäävä suunnittelu on aloitettava jo rakennushankkeen hankesuunnitteluvaiheessa. Voidaan uskoa, että digitalisaation mukaantulo kiinteistötekniikan integrointiin tulee mahdollistamanaan älykkäästi toimivan myymäläratkaisun toteutuksen lähivuosina. Älykäs automaatio kykenee ennakoimaan ympäristöolosuhteissa tapahtuvia muutoksia, säätilan, asiakasvirran ja energiakäytön hallinnassa hyödynnettävien mittauksien ja säätötoimenpiteiden välityksellä. Energiansäästöön tähtääviä investointisuunnitelmia laadittaessa, on syytä tunnistaa ensimmäisen investoinnin taloudellisten vaikutusten seuraukset jatkoinvestointien kannattavuudelle.

Kuten tutkimus osoitti, yksinomaan kylmälaitoksessa käytetyn kylmäaineen merkitys ole ei ole ratkaisevassa asemassa energiatehokkuutta määriteltäessä. Uusia kylmäaineita kehitetään jatkuvasti vahvasti markkinoiden ohjaamana, ja lähitulevaisuudessa uusien kylmälaitosten kylmäaineina tullaan hyödyntämään pääasiassa ns. luonnollisia kylmäaineita kuten hiilidioksidia ja propaania.

.

LÄHTEET

Aittomäki A. (2012) *Kylmäteknikka*. Suomen kylmäyhdistys. 4. painos.

Gullo P., Elmegaard B., Cortella G. (2018) Energy and environmental performance assessment of R744 booster supermarket refrigeration systems operating in warm climates. *International Journal of Refrigeration*, 64, s. 61–79

Danfoss (2017) *Optimalisatie CO2 systemen m.b.v. ejecteur*. [Verkkodokumentti]. (Luettu 19.02.2020.)

European Comission (2019) Tietoja fluorattuja kasvihuonekaasuja sisältävien laitteiden maahantuojiille EU:n F-kaasuasetuksessa säädetyistä velvoitteista. [Verkkodokumentti] https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/f-gas/docs/guidance_equipment_importers_fi.pdf (Luettu 19.02.2020.)

EU (2015) *EU legislation to control F-gases*. [Verkkojulkaisu] https://ec.europa.eu/clima/policies/f-gas/legislation_en#tab-0-0 (Luettu 30.01.2020.)

EU (2019) *Fluorinated greenhouse gases*. [Verkkojulkaisu] https://ec.europa.eu/clima/policies/f-gas_en (Luettu 30.01.2020.)

Hakala P. ja Kaappola E. (2007) *Kylmälaitoksen suunnittelu*. 2. tarkistettu painos. Opetushallitus.

Kaappola, E. Hirvelä, A. Jokela, M. ja Kianta, J. (2015) *Kylmäteknikan perusteet*. Helsinki: Opetushallitus.

Kapanen M. (2017) *Kylmäainetilanne 2017*. [Verkkodokumentti]. <http://www.skll.fi/yhdistys/www/att.php?type=2&id=175> (Luettu 30.01.2020.)

Karampour M., Sawalha S. ja Arias J. (2016) *Eco-friendly Supermarkets: an Overview*. Raportti toteutettu osana SuperSmart H2020 projektia.

Karampour M. ja Sawalha S. (2018). State-of-the-Art Integrated CO₂ Refrigeration System for Supermarkets: a Comparative Analysis. *International Journal of Refrigeration*, 86, 239-257.

MOTIVA (2009) *Kylmää tehokkaasti päivittäistavarakaupalle* [verkkojulkaisu]. https://www.motiva.fi/files/2889/Kylmaa_tehokkaasti_paivittaistavarakaupalle.pdf (Luettu 28.3.2020.)

MOTIVA (2012) *Kaupan kylmälaitteiden ja -järjestelmien lauhdelämmön talteenotto: Laskentaohje*. https://www.motiva.fi/files/7973/Kaupan_kylmalaitteiden_ja_-jarjestelmien_lauhdellammon_talteenotto_Laskentaohje.pdf (Luettu 28.03.2020.)

Pre-Design Guide For Ground Source Cooling Systems with Thermal Energy Storage. 2004. Denmark, EU Commission SAVE programme & Nordic Energy Research, Soil Cool / Rekyl project 02. 37p.

Remes M. (2018) Kaupalla edessä vuosikymmenen suururakka. *KylmäExtra*, 2. Verkkojulkaisu. http://www.kylmaextra.fi/lehdet/kylmaextra_2_2018/kaupalla_edessa_vuosikymmenen_suururakka. [Päivitetty 24.9.2019].

Reinikainen T. ja Johansson A. (2019) *Kestävät julkiset hankinnat F-kaasujen käytön ja päästöjen vähentämisessä*. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 30. Verkkojulkaisu. www.syke.fi/julkaisut. [Päivitetty 24.9.2019].

Reinikainen T. (2019) *Kansainvälinen Kigalin sopimus tuli voimaan – vähentää osaltaan kasvihuonekaasupäästöjä*. Suomen Ympäristökeskus. Tiedote 11.1.2019.

Schönberger H., Galvez-Martos J-L. ja Styles D. (2013) *Best Environmental Management Practice in the Retail Trade Sector*. European Commission. JRC Scientific Policy Reports, Luxembourg: Publications Office of the European Union. Verkkojulkaisu. <http://susproc.jrc.ec.europa.eu/activities/emas/documents/RetailTradeSector.pdf>. (Luettu 27.9.2019.)

S-kanava (2018) *Vuosikatsaus 2018*. <https://www.s-kanava.fi/web/s-ryhma/vuosikatsaus/etusivu> (Luettu 19.3.2020.)

SKLL – Suomen Kylmäliikkeiden Liitto ry (2018) *Kylmäaineiden hinnat nousseet vauhdilla*. Verkkojulkaisu. <http://www.skll.fi/www/att.php?type=2&id=322>. (Luettu 24.9.2019.)

Styrman J. (2018) *HOK-Elannon vähittäismyyntikauppojen tavoiteltavat energiatehokkuus-tasot*. Pro gradu -tutkielma. Helsingin Yliopisto, Taloustieteen laitos, Ympäristöekonomia.

Tassou S.A., Ge Y., Hadawey A. ja Marriott D. (2011) Energy consumption and conservation in food retailing. *Applied Thermal Engineering*, 31, 147-156.

Työ- ja elinkeinoministeriö (2009) *Energiatehokkuustoimikunta. Ehdotus energiansäästön ja energiatehokkuuden toimenpiteiksi*. Edita Publishing Oy

Työ- ja elinkeinoministeriö (2019) *Energiatehokkuustyöryhmän raportti*. https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161811/TEM_53_2019_Energiatehokkuustyoryhman_raportti_WEB.pdf?sequence=1&isAllowed=y (luettu 16.3.2020.)

VTT (2007) *Energy Use: Visions and Technology Opportunities in Finland*. 1. painos. Helsinki. Edita Prima Ltd.

Xu Y., Zaelke D., Velders G. J. M., ja Ramanathan V. (2013) The role of HFCs in mitigating 21st century climate change. *Atmospheric Chemistry Physics*, 13, 6083–6089. <https://energiatehokkuussopimukset2017-2025.fi/kesko-kaupparakennus-lampenee-energianerokkaasti-hukkalammolla/> (Luettu 30.12.2019.)

Asetukset ja lainsäädäntö

Energiatehokkuuslaki (1429/2014). <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2014/20141429>

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi (EU) 2018/844, annettu 30 päivänä touko-
kuuta 2018, rakennusten energiatehokkuudesta annetun direktiivin 2010/31/EU ja energia-
tehokkuudesta annetun direktiivin 2012/27/EU muuttamisesta.

Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EU) N:o 517/2014, annettu 16.4.2014, fluora-
tuista kasvihuonekaasuista ja asetuksen (EY) N:o 842/2006 kumoamisesta.

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi (EU) 2012/27/EU, annettu 25 päivänä loka-
kuuta 2012, energiatehokkuudesta, direktiivien 2009/125/EY ja 2010/30/EU muuttamisesta
sekä direktiivien 2004/8/EY ja 2006/32/EY kumoamisesta.

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi (EU) 2010/31/EU, annettu 19 päivänä touko-
kuuta 2010, rakennusten energiatehokkuudesta.

EUVL (21.12.2018) EUROOPAN PARLAMENTIN JA NEUVOSTON DIREKTIIVI (EU)
2018/2001, annettu 11 päivänä joulukuuta 2018, uusiutuvista lähteistä peräisin olevan
energian käytön edistämisestä. *Euroopan unionin virallinen lehti* L 328/82, s. 82–209 .
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=celex:32018L2001> (luettu 19.3..2020.)

LIITTEET

Liite 1:

Kylmäkalusteiden vertailutiedot

	S-market		Sale Otava		Sale Savisilta	
Total area, m ²	1900,6		665,8		688,5	
Refrigeration system	CO ₂ transcritical booster		Centralized Direct expansion		Water-loop	
Refrigerant	R744		R404A		R-410A/Water/Brine	
Side	LT, CO ₂	MT, CO ₂	LT, DX	MT, DX	LT, R-410A	MT, R-410A
Temperatures	-34/-8 °C	-8/32 °C	-35/40 °C	-10/40 °C		
Dim. Capacity, kW	31,0	117,0	13,2	63,3		
Condensers	Gas cooler		Air-cooled		Air-cooled	
Capacity, kW	223,0		49,0	180,0		
Display cabinets						
Display cabinets length, m	44,47	101,25	10,00	33,75	11,25	36,25
Display cabinets area, m ²	65,34	93,15	10,74	30,04	12,08	32,26
Display cabinets net volume, m ³	34,87	87,20	9,13	35,22	12,06	40,80
Capacity, kW	23,80	76,50	8,60	45,25	6,00	29,16
Evaporators	Luvata	Luvata 4x	Alfa laval	Alfa laval 2x	Lu-ve	Lu-ve
Room, Temperature °C	Cold -18/-25	Cool +2/+4	Cold -18/-25	Cool +2/+4	Cold -18/-25	Cool +2/+4
Room area, m ²	14,40	85,55	11,90	28,54	7,20	21,60
Room volume, m ³	43,20	256,65	28,56	68,17	18,00	54,00
Capacity, kW	3,6	17,6	2,00	6,8	2,07	6,29
Required cooling, kW	27,40	94,10	10,60	52,05	8,07	35,45
According to required capacity						
Specific consumption, kW/m	0,62	0,93	1,06	1,54	0,72	0,98
kW/m ²	0,42	1,01	0,99	1,73	0,67	1,10
kW/m ³	0,79	1,08	1,16	1,48	0,67	0,87
According to dim. Capacity						
Specific consumption, kW/m	0,70	1,16	1,32	1,88		
kW/m ²	0,47	1,26	1,23	2,11		
kW/m ³	0,89	1,34	1,45	1,80		
Refrigerant quantity, kg	300		100	200		

S-market	MT		LT	
Display cabinets	Open Vertical Multideck	Vertical glass-door	Vertical glass-door	Closed island
Model	Panama 2/Leons	Osaka 2	Brema 5/Wengen 5	Toronto 3
Products	Vegetables & fruits	Milk prod., meat, drinks	Frozen food, ice cream	Frozen food
Temperatures	+6 °C	+2/+4 °C	-18/-25 °C	-18/-25 °C
Length, m	20,00	81,25	22,59	21,88
Horizontal display surface, m ²	32,80	218,40	75,55	36,75
Area, m ²	18,40	74,75	24,19	41,15
Net volume, m ³	19,23	67,97	21,98	12,89
Cooling capacity, kW	30,60	45,90	18,40	5,40
Sale Otava	MT		LT	
Display cabinets	Open Vertical Multideck	Vertical glass-door	Combi	
Model	Leons	Leons, Cahi		
Products	Vegetables & fruits	Food,drinks	Frozen food	
Temperatures	+6 °C	+2/+4 °C	-18/-25 °C	
Length, m	7,50	26,25	10,00	
Area, m ²	6,68	23,36	10,74	
Horizontal display surface, m ²	27,49	96,17	9,13	
Net volume, m ³	8,78	26,45	9,13	
Cooling capacity, kW	10,20	35,05	8,60	
Sale Savisilta	MT		LT	
Display cabinets	Open Vertical Multideck	Vertical glass-door	Vertical glass-door	
Model	Leons	Gazelle	Granbering	
Products	Vegetables & fruits	Food,drinks	Frozen food	
Temperatures	+6 °C	+2/+4 °C	-18/-25 °C	
Length, m	7,50	28,75	11,25	
Area, m ²	6,68	25,59	12,08	
Horizontal display surface, m ²	27,49	91,57	43,40	
Net volume, m ³	8,56	32,23	12,06	
Cooling capacity, kW	10,20	18,96	6,00	

Sale Otava									
Display cabinets									
LT									
Type	Model	Position	Temperature, °C	Length, m	Open area, m ²	Horizontal area, m ²	Net volume, m ³	Area, m ²	Cooling capacity, kW
Combi		2a	-18/-25	2,50	3,38	2,28	2,28	2,69	2,20
		2b		3,75	5,06	3,42	3,42	4,03	3,20
		3a		3,75	5,06	3,42	3,42	4,03	3,20
Σ				10,00	13,50	9,13	9,13	10,74	8,60
MT									
Vertical glass-door	Leons	12a	+2/+4	3,75	6,75	13,74	3,78	3,34	5,00
		13b		2,50	4,50	9,16	2,52	2,23	3,35
		14a		2,50	4,50	9,16	2,52	2,23	3,35
		15b		2,50	4,50	9,16	2,52	2,23	3,35
		16a		3,75	6,75	13,74	3,78	3,34	5,00
		17b		3,75	6,75	13,74	3,78	3,34	5,00
		18a		3,75	6,75	13,74	3,78	3,34	5,00
Open Vertical	Leons	19a	+6	3,75	6,75	13,74	4,39	3,34	10,20
		20b		3,75	6,75	13,74	4,39	3,34	
Vertical glass-door	Cahi	21a	+2/+4	3,75	6,75	13,71	3,78	3,34	5,00
Σ				33,75	60,75	123,66	35,22	30,04	45,25
Σ MT+LT				43,75	74,25	132,79	44,35	40,78	53,85
Combi dimensions									
105cm			50cm						
	46cm								
	86cm								

S-market									
Display cabinets									
LT									
Type	Model	Position	Temperature, °C	Length, m	Open area, m ²	Horizontal area, m ²	Net volume, m ³	Area, m ²	Cooling capacity, kW
Vertical glass door	Brema 5	2	-22/-25	3,12	5,20	9,30	2,95	3,01	7,70
		3		3,90	6,50	11,60	3,68	3,76	
		4		3,90	6,50	11,60	3,68	3,76	
Closed island	Toronto 3	5	-18/-25	1,88	2,22	3,15	1,23	1,95	5,40
		6		7,50	15,19	12,60	4,19	14,70	
		7		7,50	15,19	12,60	4,19	14,70	
		8		5,00	10,13	8,40	3,28	9,80	
Vertical glass door	Wengen 5	9	-18/-25	3,89	5,78	14,35	3,89	4,55	10,70
		10		3,89	5,78	14,35	3,89	4,55	
		11		3,89	5,78	14,35	3,89	4,55	
			Σ	44,47	78,25	112,30	34,87	65,34	23,80
MT									
Vertical glass-door	Osaka 2	21	+4/+6	3,75	5,79	10,08	3,14	3,45	4,50
		22		2,50	3,86	6,72	2,09	2,30	
		23		2,50	3,86	6,72	2,09	2,30	
		24		3,75	5,79	10,08	3,14	3,45	5,90
		25		3,75	5,79	10,08	3,14	3,45	
		26		3,75	5,79	10,08	3,14	3,45	
		27		3,75	5,79	10,08	3,14	3,45	5,90
		28		3,75	5,79	10,08	3,14	3,45	
		29		3,75	5,79	10,08	3,14	3,45	
		30		2,50	3,86	6,72	2,09	2,30	4,60
		31		3,75	5,79	10,08	3,14	3,45	
		32		3,75	5,79	10,08	3,14	3,45	
		33		3,75	5,79	10,08	3,14	3,45	5,90
		34		3,75	5,79	10,08	3,14	3,45	
		35		3,75	5,79	10,08	3,14	3,45	
		36		3,75	5,79	10,08	3,14	3,45	6,40
		37		3,75	5,79	10,08	3,14	3,45	
		38		3,75	5,79	10,08	3,14	3,45	
		39		3,75	5,79	10,08	3,14	3,45	7,10
		40		3,75	5,79	10,08	3,14	3,45	
Open Vertical Multideck	Panama 2	41	+2/+4	2,50	3,86	6,72	2,09	2,30	20,40
		42		2,50	3,86	6,72	2,09	2,30	
		43		3,75	5,79	10,08	3,14	3,45	
		44		3,75	5,79	10,08	3,14	3,45	
Vertical glass-door	Osaka 2	45	+8/+10	2,50	3,86	6,72	2,09	2,30	3,50
		46		3,75	5,79	10,08	3,14	3,45	
		47		3,75	5,79	10,08	3,14	3,45	2,10
Open Vertical Multideck	Leons 37	48	+2/+4	3,75	6,75	13,74	4,39	3,45	10,20
		49		3,75	6,75	13,74	4,39	3,45	
			Σ	101,25	158,25	279,49	87,20	93,15	76,50
			Σ MT+LT	146	237	392	122	158	100

Sale Savisilta									
Display cabinets									
LT									
Type	Model	Position	Temperature, °C	Length, m	Open area, m ²	Horizontal area, m ²	Net volume, m ³	Area, m ²	Cooling capacity, kW
Vertical glass door	Granbering	2	-18/-25	3,75	6,25	14,47	4,02	4,03	6,00
		3		3,75	6,25	14,47	4,02	4,03	
		4		3,75	6,25	14,47	4,02	4,03	
Σ				11,25	18,75	43,40	12,06	12,08	6,00
MT									
Vertical glass door	Gazelle	20	+2/+4	3,75	6,58	11,94	4,18	3,34	2,48
		21		3,75	6,58	11,94	4,18	3,34	2,48
		22		3,75	6,58	11,94	4,18	3,34	2,48
		23		2,50	4,39	7,96	2,78	2,23	1,65
		24		2,50	4,39	7,96	2,78	2,23	1,65
		25		2,50	4,39	7,96	2,78	2,23	1,65
		26		2,50	4,39	7,96	2,78	2,23	1,65
Open Vertical	Leons	27	+6	3,75	6,58	11,94	4,18	3,34	2,48
		28		3,75	6,75	13,74	4,39	3,34	10,2
		29		3,75	6,75	13,74	4,39	3,34	
Vertical GD	Gazelle	30	+8/+10	3,75	6,58	11,94	4,18	3,34	2,48
			Σ	36,25	63,93	119,06	40,80	32,26	29,16
			Σ MT+LT	47,50	82,68	162,46	52,86	44,35	35,16

			4 freezer	6.8 walk-room
multideck	vegetable +6	1m	1,04	
	fish,meat 0	1m	1,73	
	visa kita +2	1m	1,8	
	drinks		1,8	