Lappeenrannan teknillinen yliopisto

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

Päivittäistavarakauppojen lämmöntalteenoton vertailu booster-kylmälaitoksissa

Työn tarkastaja: Markku Nikku

Työn ohjaaja: Markku Nikku

Lappeenrannassa 10.7.2018

Aleksi Hassinen

TIIVISTELMÄ

Aleksi Hassinen
School of Energy Systems
Energiatekniikan koulutusohjelma

Opinnäytetyön ohjaaja: Markku Nikku
Kandidaatintyö 2018
25 sivua, 10 kuvaa ja 7 taulukkoa

Hakusanat: kandidaatintyö, booster, lämmöntalteenotto, LTO, hiilidioksidi

Työn tavoitteena oli tutkia booster-kylmäkoneikkojen lämmöntalteenoton tehokkuutta kahdeksassa K-supermarketissa. Tarkastelun kohteena oli kylmäkoneikkojen energian kulutukset verrattuna lämmöntalteenoton tuomaan energiaan. Työn toimeksiantajana toimi Kesko Oyj.

Tutkimustiedot saatiin mittareilla, jotka olivat valmiiksi asennettuina LTO-piiriin ja kylmäkoneikon sähkökeskukseen. Osa mittareiden lukemista saatiin etäyhteyden kautta ja osa käytiin lukemassa paikan päällä. Kauppojen mittausjaksot ja ulkolämpötilat eroavat toisistaan ja nämä erot on otettu huomioon tulosten tarkastelussa.

Mittaustulosten pohjalta selvitettiin syitä eroille eri kohteiden välillä. Tulosten avulla voitiin todeta lämmöntalteenoton olleen muita kauppoja tehokkaampi, jos tulistuslämmön lisäksi hyödynnettiin lauhdelämpöä. Tutkimuksella saatiin tietoa kauppojen LTO:n nykytilanteesta ja mittauksien luotettavuudesta.

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä

Sisällysluettelo

Symboli- ja lyhenneluettelo 4

1 JOHDANTO 5

2 HIILIDIOKSIDI KYLMÄAINEENA 7

2.1 Hiilidioksidin ominaisuudet 7

2.2 Hiilidioksidin ympäristövaikutukset ja turvallisuus 8

2.3 Hiilidioksidin jäähdytysprosessit 9

2.3.1 Alikriittinen prosessi 9

2.3.2 Transkriittinen prosessi 10

2.4 Hiilidioksidin booster-järjestelmä 11

2.5 Lämmöntalteenotto booster-järjestelmällä 13

3 TUTKIMUSKOHTEIDEN TARKASTELU 15

3.1 Kohteiden esittely 15

3.2 Mittausjärjestelyt 17

3.3 Oletukset ja huomiot 18

3.4 Tulokset 19

4 YHTEENVETO 24

LÄHTEET 25

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset aakkoset

E	sähköenergia	[kWh]
h	ominaisentalpia	[J/kg]
p	paine	[Pa]
Q	lämpöenergia	[kWh]
t	aika	[s]
T	lämpötila	[°C]

Alaindeksit

k	koneikko
LTO	lämmöntalteenotto

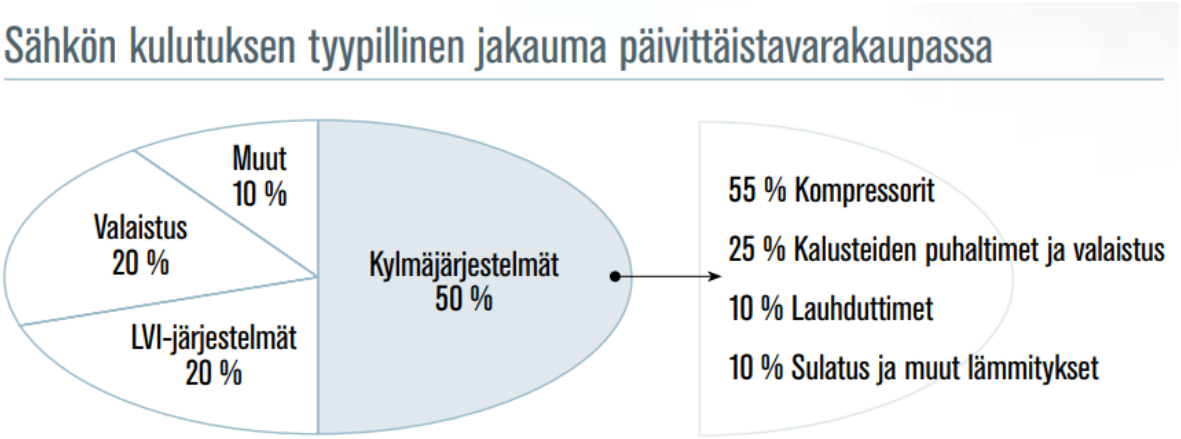
Lyhenteet

EER	energy efficiency ratio, kylmäkerroin
GWP	Global warming potential, lämmityspotentiaali
LTO	lämmöntalteenotto
ODP	Ozone depletion potential, aineen otsonihaitallisuus

1 JOHDANTO

Tämän kandidaatintutkielman tarkoituksena on tutkia supermarkettien lämmöntalteenottoa. Työ tehdään yhteistyössä Kesko Oyj:n kanssa, ja tarkastelun kohteina toimii kahdeksan K-supermarkettia.

Päivittäistavarakaupat ovat valtakunnallisesti ja kansainvälisesti suuria sähkönkuluttajia. Tästä sähkönkulutuksesta suurin tekijä on kylmäjärjestelmät. Kuvassa 1 on esitetty päivittäistavarakaupan tyypillinen sähkönkulutusjakauma (Motiva 2009, 3.).



Kuva 1. Päivittäistavarakaupan sähkönkulutus tyypeittäin. (Motiva 2009, 3.)

Elintarvikkeiden jäähdyttämiseen käytettävän sähkön sivutuotteena tulee lämpöä, jota voidaan käyttää päivittäistavarakaupan lämmitystarpeisiin. Tämän lämmön hyödyntämisellä voidaan vähentää esimerkiksi ostettavaa kaukolämpöenergiaa.

Työn teoriaosuudessa perehdytään hiilidioksidiin (CO_2) kylmäaineena ja lämmöntalteenottoon päivittäistavarakaupan näkökulmasta. Työn teoriaosuuden jälkeen tutkitaan ja vertaillaan kahdeksan supermarket-kokoluokan päivittäistavarakaupan kylmäjärjestelmien sähkönkulutuksia ja lämmöntalteenottoa. Tutkimuksen apuna käytetään mitattuja sähkö- ja lämpöenergioita sekä kauppojen kylmäjärjestelmien ja lämmöntalteenoton analysointia. Kauppojen kylmäaineena käytetään hiilidioksidia, ja jokainen kauppa on varustettu vähintään yhdellä lämmöntalteenottopiirillä.

Työn tavoitteena on etsiä syitä kauppojen eroavaisuuksille lämmöntalteenotossa ja analysoida kohteiden lämmöntalteenoton suoriutumista. Tutkimuskysymykset ovat: Kuinka paljon tietyllä sähköenergian kulutuksella saadaan lämpöä talteen? Miksi samalla ilmastolla ja saman

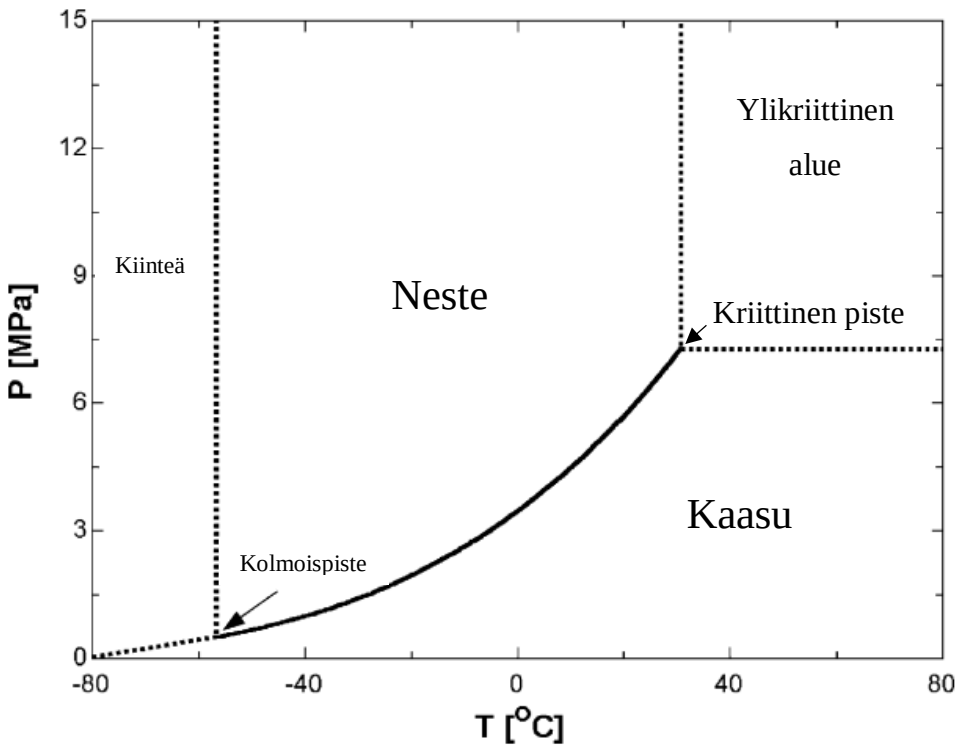
tyyppisellä jäähdytysjärjestelmällä saadaan talteen eri määrä lämpöä? Ensimmäinen tutkimuskysymys on luotu vastaamaan siihen, kuinka sähköenergian kulutus vaikuttaa lämmöntalteenottoon. Toinen alaongelma taas on luotu tarkentamaan vastauksia siitä, mitkä tekijät vaikuttavat lämmöntalteenoton eroavaisuuksiin kauppojen välillä. Tämän työn tarkoitus on siis saada kokonaisvaltainen kuva siitä, mistä kauppojen lämmöntalteenoton erot syntyvät sekä siihen, kuinka tehokasta lämmöntalteenotto kaupoissa on.

2 HIILIDIOKSIDI KYLMÄAINEENA

Kylmäaine on nimitys kylmäkoneistoissa käytetylle kiertoaineelle. Kylmäaineen hyviin ominaisuuksiin kuuluvat esimerkiksi myrkyttömyys, palamattomuus, hyvä lämmönjohtavuus ja suuri höyrystymislämpö. (Aittomäki 2012, 103.) Nykyään hiilidioksidi on yleistynyt merkitsevästi markettien kylmäjärjestelmissä, joten työn kirjallisuuskatsauksessa tarkastellaan tämän vuoksi vain hiilidioksidia. (Aittomäki 2012, 121.)

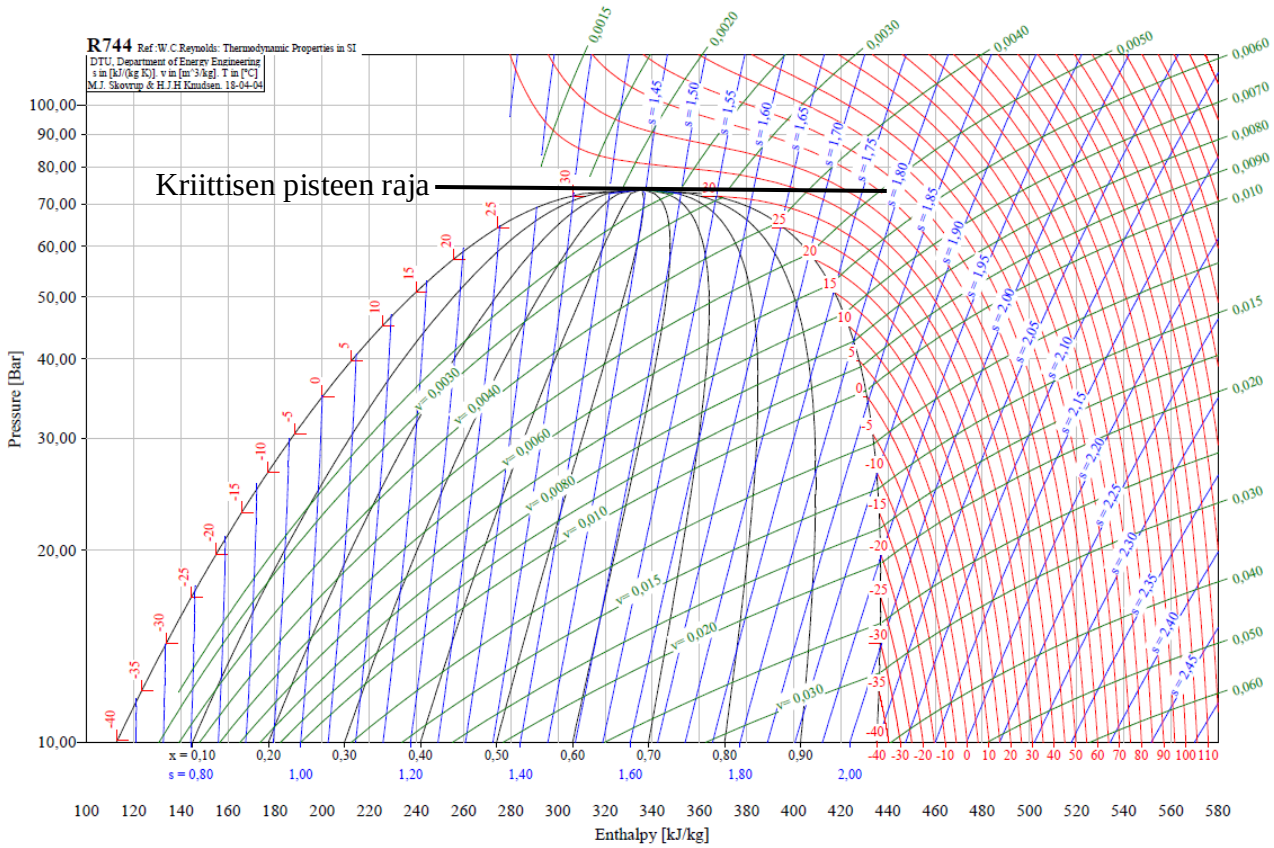
2.1 Hiilidioksidin ominaisuudet

Kylmäaineena hiilidioksidi on omalaatuinen, sillä sen kriittinen piste on matalassa lämpötilassa 31,06 °C ja korkeassa paineessa 73,8 bar. Hiilidioksidin kolmoispisteellä on myös korkea paine, 5,2 baaria. Käytännön sovelluksissa on tärkeää, että paine ei laske lähelle 5,2 baaria, sillä muuten kiinteä hiilidioksidi voi tukkia virtauksen. Hiilidioksidilla on lisäksi hyvät lämmönsiirto-ominaisuudet, jotka parantavat esimerkiksi lämmöntalteenotossa saatavaa energiaa. (Aittomäki 2012, 122.) Kuvassa 2 on esitetty edellä mainitut pisteet paineen ja lämpötilan funktioina.



Kuva 2. Hiilidioksidin kolmoispiste ja kriittinen piste paine, lämpötila -kuvaajassa. (Kim et. al. 2004, 124.)

Kuvassa 3 on esitetty kylmäaineille olennainen hiilidioksidin logaritminen paine ja entalpia -kuvaaja.



Kuva 3. Hiilidioksidin logaritminen paine ja entalpia -kuvaaja. (Refrigeration Utilities -ohjelma, 2018.)

Kuvaan on merkitty kriittisen pisteen raja, joka on olennainen tekijä hiilidioksidiprosesseissa. Kuvassa on esitetty myös lämpötilat celsiusasteina punaisella värillä. Kuvaajan luomiseen on käytetty apuna Refrigeration Utilities -ohjelmaa.

2.2 Hiilidioksidin ympäristövaikutukset ja turvallisuus

Hiilidioksidi on palamaton ja suhteellisen myrkytön aine. Hiilidioksidi ei myöskään reagoi haitallisesti elintarvikkeiden kanssa. Ihmiselle hiilidioksidi ei aiheuta terveysriskiä pieninä pitoisuuksina, ja oireet alkavat vasta pitoisuuden ollessa yli 3-5 % hengitysilmasta. Oireina ovat sekavuus, näköhäiriöt ja hyperventilaatio. Hiilidioksidi on hajuton ja mauton kaasu, ja mahdollisten vuotojen havaitsemiseksi suljetuissa tiloissa täytyy olla valvonta- ja turvalaitteet. (Aittomäki 2012, 122.)

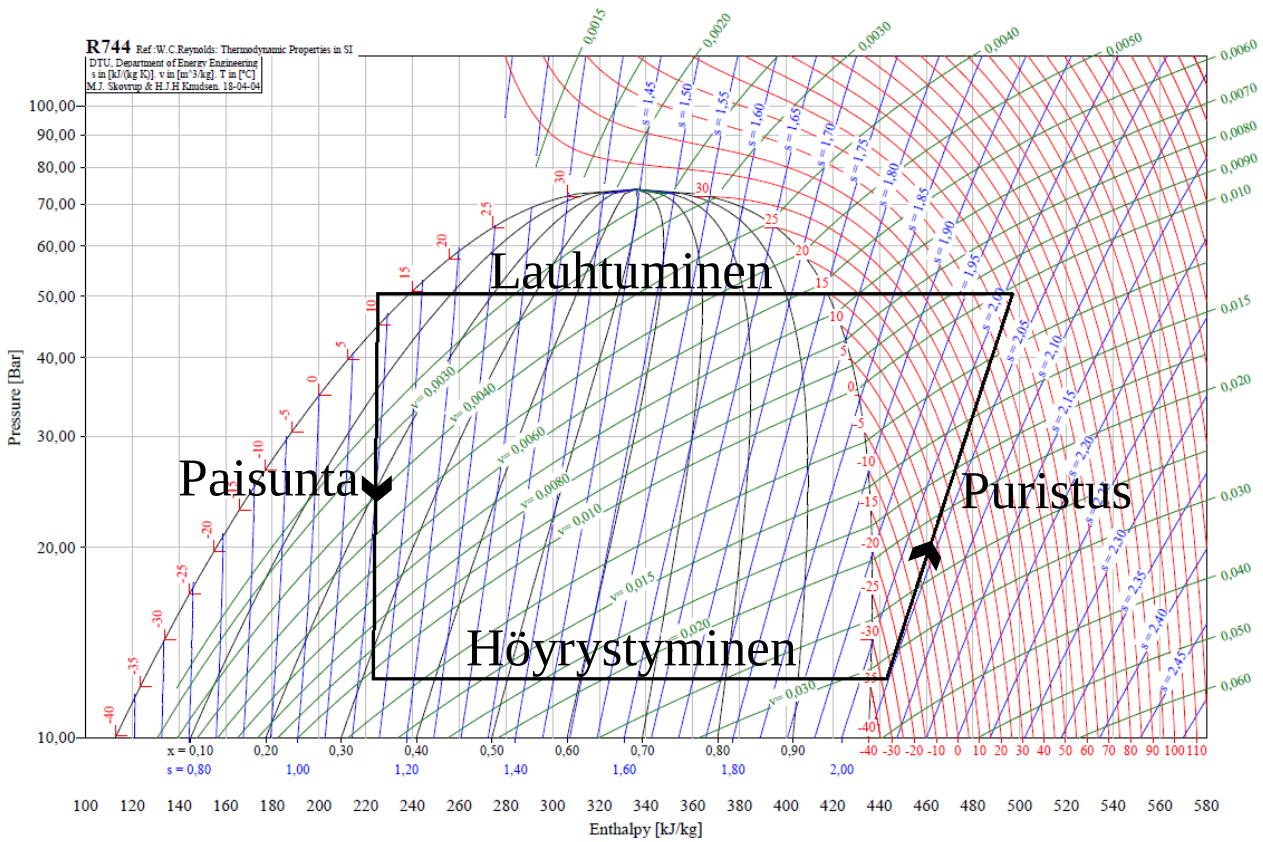
Ympäristönäkökulmasta hiilidioksidi on ideaali kylmäaine. Sen kasvihuonevaikutuksen luku GWP (Global warming potential) on 1,0, joka on pienin mahdollinen luku kasvihuonekaasulle. (Aittomäki 2012, 122.) Hiilidioksidin ODP (Ozone Depletion Potential), eli kylmäaineen suhteellisen otsonihaitallisuuden luku, on 0. (Sawalha 2008, 8.)

2.3 Hiilidioksidin jäähdytysprosessit

Hiilidioksidia voidaan käyttää jäähdytysprosesseissa alikriittisesti tai transkriittisesti. Hiilidioksidin jäähdytysprosessin kylmäkerroin (EER) on riippuvainen lopullisen lämpönielun lämpötilasta. Lämpönieluna, eli kohteena, johon lämpö luovutetaan, voi toimia esimerkiksi ulkoilma tai LTO-piiri. Alhaisilla lämpönielun lämpötiloilla prosessi voi toimia alikriittisesti, jolloin häviöt ovat pienemmät ja kylmäkerroin korkeampi. Korkeilla lämpönielun lämpötiloilla prosessin korkeapainepuoli joutuu ylikriittiselle alueelle, jolloin häviöt kasvavat ja EER on pienempi. Hiilidioksidia käytetäänkin kylmäaineena erityisesti kylmän ilmaston maissa, joissa on tarjolla matalan lämpötilan lämpönieluja. (Sawalha 2008, 25.)

2.3.1 Alikriittinen prosessi

Alikriittisessä prosessissa hiilidioksidin paine pysyy koko prosessin ajan kriittisen paineen alapuolella. Alikriittisen prosessin suurin lämmönluovutus tapahtuu hiilidioksidin lauhtumisessa. Alikriittinen prosessi on esitetty logaritmisen paineen ja entalpian funktiona kuvassa 4. (Aittomäki 2012, 71.)

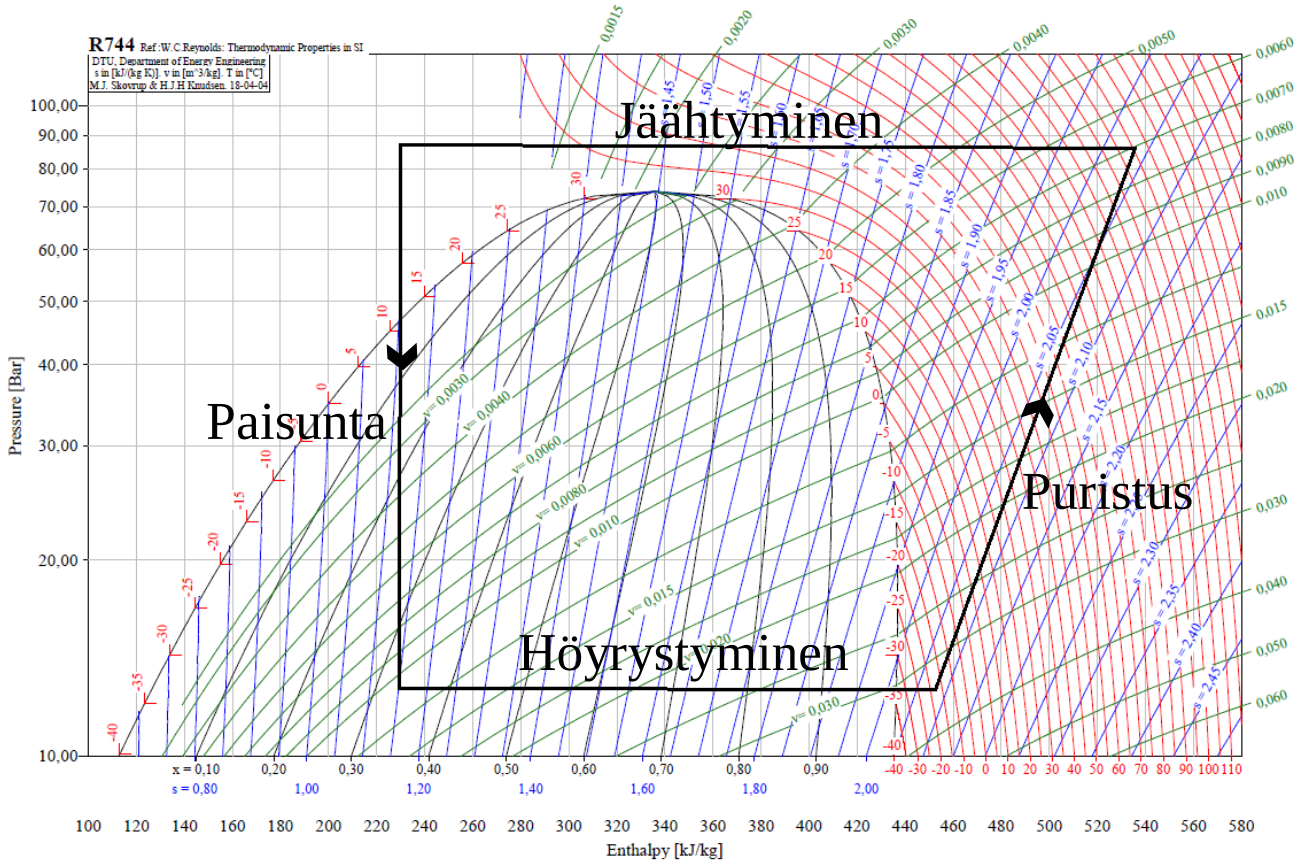


Kuva 4. Hiilidioksidin yksinkertainen alikriittinen prosessi logaritmisen paineen ja entalpian kuvaajassa. (Refrigeration Utilities -ohjelma, 2018.)

Kuvaajassa hiilidioksidi puristetaan ensin korkeaan paineeseen ja lämpötilaan (puristus). Tämän jälkeen hiilidioksidi luovuttaa lämpöenergiaa lauhduttimessa, jolloin hiilidioksidi lauhtuu tulistuneesta kaasusta nesteeksi (lauhtuminen). Hiilidioksidi paisutetaan höyrystimen paineeseen, jolloin hiilidioksidin lämpötila laskee (paisunta). Matalan lämpötilan hiilidioksidi vastaanottaa lopuksi lämpöenergiaa kylmäkalusteesta höyrystimessä, jolloin kylmäkalusteen lämpötila laskee. (höyrystyminen).

2.3.2 Transkriittinen prosessi

Transkriittisessä prosessissa hiilidioksidin paine ja lämpötila nousee yli kriittisen pisteen. Prosessin matalapainepuoli on alikriittisen pisteen alapuolella, ja prosessin korkeapainepuoli on kriittisen pisteen yläpuolella, missä ei voida erottaa neste- ja höyryfaasia toisistaan. Transkriittisessä prosessissa lämmönluovutuksessa ei tapahdu enää lauhtumista, vaan ainoastaan hiilidioksidikaasun jäähtymistä. (Aittomäki 2012, 71.) Transkriittinen prosessi on esitettynä logaritmisen paineen ja entalpian kuvaajassa kuvassa 5.

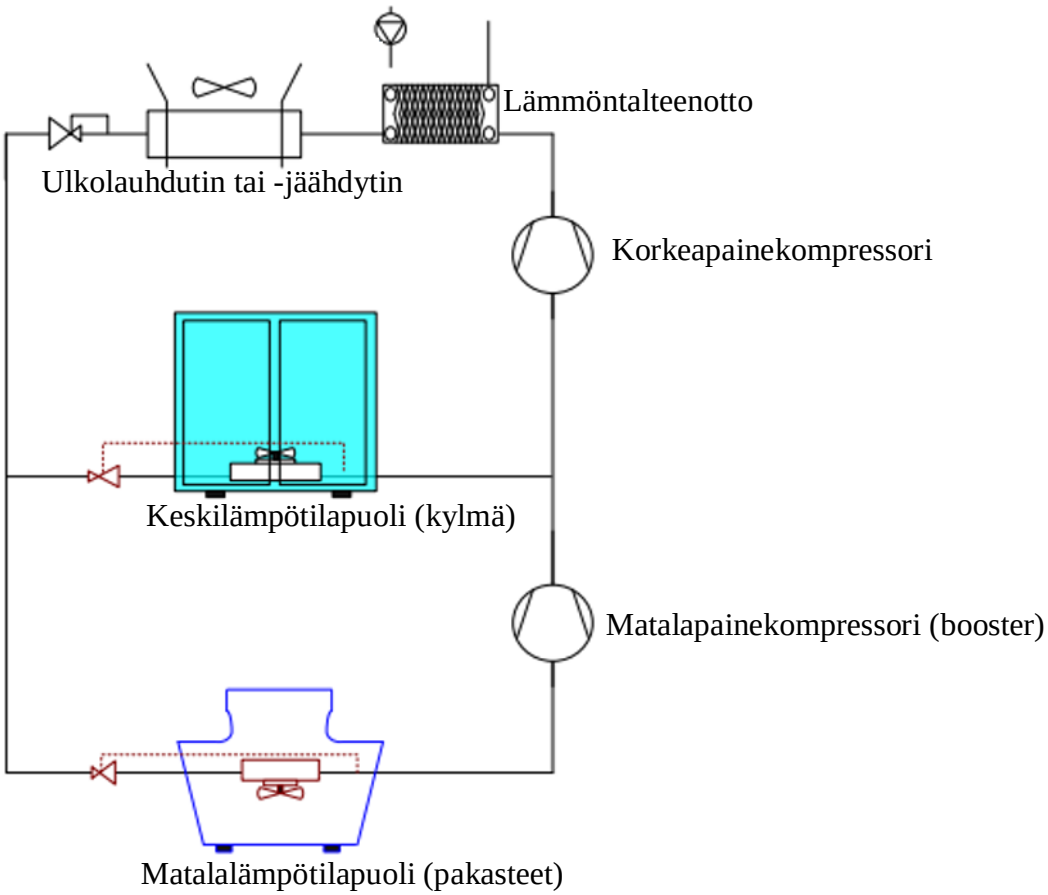


Kuva 5. Hiilidioksidin yksinkertainen transkriittinen prosessi logaritmisen paineen ja entalpian kuvaajassa. (Refrigeration Utilities -ohjelma, 2018.)

Prosessi on muutoin samanlainen, kuin kuvassa 4, mutta puristuksen jälkeen ei tapahdu lauhtumista, vaan hiilidioksidin lämmönluovutus tapahtuu ainoastaan jäähdyttämällä hiilidioksidia (jäähtyminen).

2.4 Hiilidioksidin booster-järjestelmä

Booster-järjestelmä on kaksiportainen järjestelmä, joka voi toimia transkriittisesti tai alikriittisesti. Kaksiportaisessa järjestelmässä kylmäaine puristetaan kahdessa osassa. (Aittomäki 2012, 71.) Kuvassa 6 esitellään yksinkertainen booster-järjestelmä (Bush J et. al. 2018, 1.).



Kuva 6. Yksinkertainen booster-järjestelmä. (Sawalha S. 2012, 10.)

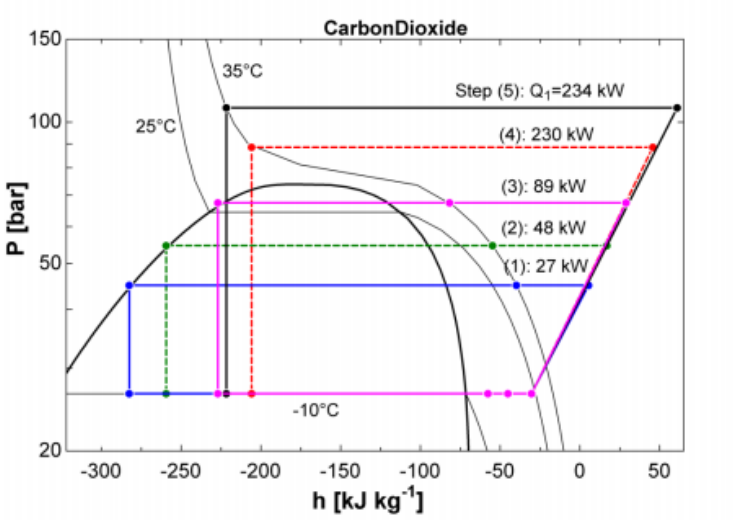
Kuvassa matalapainekompressori puristaa matalalämpötilapuolen kylmäaineen keskilämpötilapuolen paineeseen. Keskilämpötilapuolelta kylmäaine puristetaan korkeapainekompressorilla lauhduttimen tai kaasunjäähdyttimen paineeseen. (Bush J et. al. 2018, 1.)

2.5 Lämmöntalteenotto booster-järjestelmällä

Kylmäntuottoprosessissa syntyvä lämpö on erityisesti Suomen olosuhteissa mahdollista hyödyntää. Lämmöntalteenoton suunnittelussa täytyy aina huomioida systeemin toimivuus, jotta elintarvikkeiden jäähdytys ei häiriintyisi. (Hakala & Kaappola 2007, 212.) Kylmälaitoksen lauhdutuslämpö on yleensä jakaantunut seuraavasti: tulistuslämpö on 10-20 prosenttia, lauhdutuslämpö on 80-90 prosenttia ja alijäähdytys on vastaavasti 0-5 prosenttia lauhdutuslämmöstä. (Hakala & Kaappola 2007, 211.) Hiilidioksidin termodynaamisten ominaisuuksien seurauksena tulistuksen osuus on korkeampi kuin muilla kylmäaineilla (Aittomäki 2012, 212). Jos hiilidioksidia käytetään transkriittisesti, on lauhdutuslämpö tällöin kokonaan tulistuslämpöä.

Hiilidioksidin termodynaamisten ominaisuuksien vuoksi sen lämpötila korkeapainekompressorin jälkeen ennen jäähdyttimiä/lauhduttimia on korkea verrattuna muihin yleisiin kylmäaineisiin. Transkriittisessä prosessissa lämpötila on jopa 150 °C ja alikriittisessä jopa 83 °C. (Aittomäki 2012, 213.) Tämän lämpöenergian voi hyödyntää esimerkiksi käyttöveden ja tilojen lämmittämiseen. Jos kaikkea lämpöä ei voida luovuttaa lämmöntalteenottoon, luovutetaan se ulkona sijaitsevalle lauhduttimelle tai jäähdyttimelle. (Kim et. al. 2004, 164.) Lämmöntalteenotossa on tärkeää, että saatavissa oleva lämpö saadaan hyödynnettyä kohteen tarpeisiin. Hyödyntämisen parantamiseksi voidaan käyttää esimerkiksi vesivaraajaa, joka varaa lämmöntalteenotosta saadun lämmön. (Motiva 2012, 13.)

Booster-järjestelmän lämmöntalteenotosta saatavaa lämpöä on mahdollista lisätä puristamalla hiilidioksidi normaalia korkeammalle painetasolle. Painetason nosto laskee kuitenkin voimakkaasti kylmäkerrointa (EER) (Aittomäki 2012, 213.). Painetason noston hyöty on riippuvainen esimerkiksi vaihtoehtoisen lämmitysmenetelmän kustannuksista. Kuvassa 7 on kuvattu loppupaineen vaikutus saatavilla olevaan tulistuslämmöntalteenoton tehoon. (Sawalha S. 2012, 14.)



Kuva 7. Korkeapainekompressorin loppupaineen vaikutus saatavaan tulistuslämpötehoon. (Sawalha S. 2012, 14.)

Kuvassa esitetään loppupaineen vaikutus tulistuslämmöntalteenoton tehoon. Kuvan kohtien 3 ja 4 välisen suuren eron selittää se, että hiilidioksidin ollessa kriittisen pisteen yläpuolella voidaan kaikki lämpö hyödyntää tulistuksen lämmöntalteenotossa. (Sawalha S. 2012, 14.)

3 TUTKIMUSKOHTEIDEN TARKASTELU

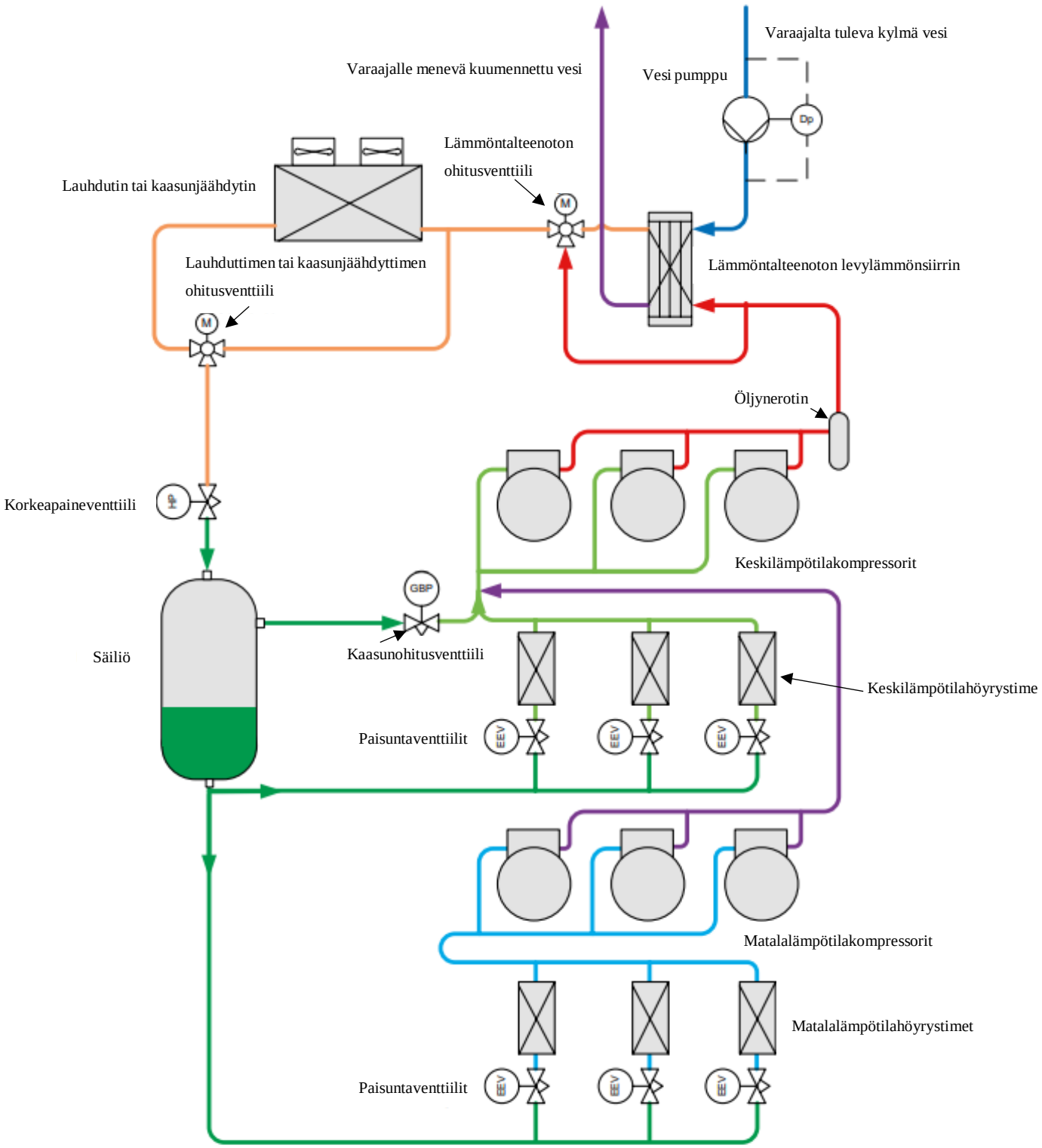
Tutkimuksen kohteena toimii kahdeksan K-supermarketin lämmöntalteenotto ja sen energiantuotto verrattuna kylmäkoneiden sähkönkulutukseen. Kylmäkoneikko jäähdyttää kauppojen kylmähuoneet ja -kalusteet sekä pakkashuoneet ja -kalusteet. Kauppoja vertaillaan myös toisiinsa.

Kaupat käyttävät jäähdytysjärjestelmänä booster-kylmäkoneikkoa, jonka kylmäaineena on hiilidioksidi, ja jäähdytysjärjestelmät toimivat joko transkriittisesti tai alikriittisesti. Kaupoissa ei ole nostettu loppupainetta lämmöntalteenoton lisäämiseksi sen vuoksi, että kaupoissa on keskitetty mahdollisimman taloudelliseen jäähdyttämiseen.

3.1 Kohteiden esittely

Kohteena olevat kaupat ovat K-supermarketteja ja sijaitsevat Itä- ja Etelä-Suomessa. Kaupat ovat numeroitu sattumanvaraisesti kaupoiksi 1-8. Kaikissa kaupoissa käytetään booster-koneikkoja, ja jokainen kauppa on varustettu vähintään yhdellä LTO-piirillä.

Kauppojen lämmitystarve on toteutettu lämmöntalteenoton lisäksi kaukolämmöllä lukuun ottamatta kauppoja 3 ja 7. Kaupassa 3 lämmöntarpeen kattamiseen käytetään lämpöpumppua, lämpövastuksia sekä tulistus- ja lauhdelämmön talteenottoa. Kaupassa 7 lämmitystarve on toteutettu lämmöntalteenoton lisäksi sähkölämmityksellä. Kuvassa 8 esitetään havainnollistava kuva kauppojen kylmäpiiristä.



Kuva 8. Kohteiden yksinkertaistettu jäähdytysjärjestelmä. (Advansor A/S 2016, 7.)

Jäähdytysjärjestelmässä kompressorit ovat kytkettynä rinnan, ja molemmissa lämpötilatasoissa yksi kompressori on varustettu taajuusmuuntajalla. Kompressorien määrä vaihtelee kohteittain

riippuen kylmä- ja pakkastehon tarpeesta. Kauppa 1 eroaa muista kohteista siten, että LTO-tulistimen jälkeen hyödynnetään lauhdelämpö. Lisäksi kaupassa 1 on lämpöpumppu, joka on liitetty järjestelmään ulkolauhduttimen jälkeen. Ulkoilmalla tai LTO-piirillä jäähdytettyä hiilidioksidia voidaan jäähdyttää edelleen lämpöpumpun avulla. Taulukossa 1 kuvataan kauppojen jäähdytystehot jaoteltuna kylmä- ja pakkastehoon. Kylmäkoneikon sähkönkulutus on suoraan riippuvainen vaadittavasta jäähdytystehosta.

Taulukko 1. Kauppojen kylmä- ja pakkastehot.

	Kylmäteho [kW]	Pakkasteho [kW]	Summa [kW]
Kauppa 1	130,8	29,1	159,9
Kauppa 2	126,7	26,7	153,4
Kauppa 3	198,8	34,7	233,5
Kauppa 4	127,6	29,6	157,2
Kauppa 5	160,0	35,0	195,0
Kauppa 6	123,0	22,0	145,0
Kauppa 7	156,6	30,1	186,7
Kauppa 8	231,0	31,3	262,3

3.2 Mittausjärjestelyt

Työssä käytetyt mittaustiedot on saatu selville kylmäkoneikon sähkönkulutusmittarilta ja lämmöntalteenoton piiriin kytketyllä mittarilla. LTO:n lämmittävänä aineena toimii hiilidioksidi ja lämmitettävänä aineena vesi. Lämmitetty vesi viedään varaajalle, jotta mahdollisimman suuri osa LTO:n tuottamasta lämmöstä saadaan hyötykäyttöön. Lämmöntalteenoton mittauspisteet sijaitsevat LTO-piirin lämmönsiirtimen ja varaajan välisissä putkissa. Mittarit mittaavat meno- ja paluuputken lämpötilaeron ja LTO-piirin virtausnopeuden, josta mittarin sisäisellä laskennalla saadaan lämpöenergia. Taulukosta 2 nähdään kaupoissa käytettävät mittarit.

Taulukko 2. Kauppojen mittarit

	Mittari
Kauppa 1	Kamstrup Multical 602
Kauppa 2	Kamstrup Multical 402
Kauppa 3	Saint-Gobaini Sharky 775
Kauppa 4	Kamstrup Multical 602
Kauppa 5	Qalcosonic Heat 1
Kauppa 6	B Meters Hydrosplit-M3
Kauppa 7	Qalcosonic Heat 1
Kauppa 8	Kamstrup Multical 602

Osa mittaustiedoista on luettu etäyhteyden avulla, ja osa tuloksista on käyty lukemassa paikan päällä. Jokaisessa kaupassa kuitenkin käytiin mittaustilanteen varmistamiseksi.

3.3 Oletukset ja huomiot

Tutkimuksen luotettavuuden varmistamiseen liittyy seuraavia huomioita. Mittausajanjakso sijoittui lämmityskaudelle, ja ulkolämpötilat olivat matalia. Matalan ulkolämpötilan takia kauppojen oletettiin toimivan mittausjaksolla alikriittisellä alueella.

Kaupassa 8 oli kaksi LTO-piiriä, joista lauhdutuslämmön poiston mittaus saatiin tehtyä, mutta tulistuslämmöntalteenoton mittari ei ollut toiminnassa. Tämän vuoksi kaupan 8 lämmöntalteenottotuloksissa huomioitiin vain lauhdelämmön osuus. Kaupassa 3 oli kaksi LTO-piiriä ja lämpöpumppu kytkettynä kylmäjärjestelmään. LTO-piireissä oli kaupan 8 tapaan tulistuksen ja lauhdelämmön poisto. Lämpöpumppu oli kytkettynä ulkojäähdyttimen jälkeen. Kaupassa 5 taas koneikon ja LTO:n mittausjaksot erosivat toisistaan, sillä LTO-mittari saatiin toimimaan vasta myöhemmin. Kaupoissa 1, 2, 4, 5, 6 ja 7 hyödynnettiin vain tulistuslämpöä.

Jäähdytysjärjestelmän kylmäkertoimeen vaikuttaa ulkolämpötila. Taulukossa 3 on kauppojen ulkolämpötilat mittausjaksolta. Lämpötilat saatiin luettua etäyhteyden avulla. Koska kaupassa 6 ei ollut etäyhteyttä ollenkaan, otettiin ulkolämpötila 20 kilometrin päässä olevalta kaupalta 3, jossa oli etäyhteys. Ulkolämpötilat mitattiin tunnin tarkkuudella. Keskiarvo laskettiin tuntikohtaisten lämpötilojen keskiarvosta.

Taulukko 3. Kauppojen ulkolämpötilat mittausjaksolta.

	Minimi [°C]	Maksimi [°C]	Keskiarvo [°C]
Kauppa 1	-24,5	5,9	-5,7
Kauppa 2	-15,5	12,9	-2,6
Kauppa 3	-11,8	5,6	-1,7
Kauppa 4	-17	12	-3,3
Kauppa 5	-15,5	12,9	-2,6
Kauppa 6	-11,8	5,6	-1,7
Kauppa 7	-4,7	4,4	-0,4
Kauppa 8	-20,5	11,2	-3,2

Kaupan 1 lämpötila erosi maantieteellisen sijaintinsa vuoksi, sillä se sijaitsi kaupoista pohjoisimpana ja itäisimpänä. Kaupan 7 korkein keskilämpötila johtui mittausjakson

ajankohdan erosta, sillä mittaus suoritettiin lähempänä kesää. Kokonaisuudessaan ulkolämpötilojen ero oli vähäistä.

3.4 Tulokset

Kaupat 1-4 saatiin luettua etäyhteyden avulla ja näiden ajanjakso on keskenään sama eli 5.3.2018 klo 13 – 9.4.2018 klo 13. Mittausajanjakson pituus oli täten 5 viikkoa eli 35 päivää. Kaupat 5-8 käytiin mittaamassa paikan päällä, joten ajanjaksot eroavat toisistaan. Vertailun parantamiseksi laskettiin päivittäinen keskiarvo paikan päällä mitatuista energioista. Taulukossa 4 on esitetty alkumittauksen ja loppumittauksen tiedot. ”Kauppa 5_k” kuvaa koneikon mittausajanjaksoa ja ”Kauppa 5_{LTO}” LTO:n mittausajanjaksoa. Taulukossa 5 esitetään koneikon kuluttama sähkö ja LTO:n tuottama energia taulukon 4 ajanjaksolta.

Taulukko 4. Kauppojen 5-8 mittausajanjaksot.

	Ensimmäinen mittaus	Toinen mittaus	Ajanjakso [d]
Kauppa 5_k	2.3.2018 10:20	5.4.2018 13:40	34,14
Kauppa 5_{LTO}	7.3.2018 13:00	5.4.2018 13:40	29,03
Kauppa 6	5.3.2018 10:00	9.4.2018 14:50	35,20
Kauppa 7	20.3.2018 0:00	9.4.2018 13:00	20,54
Kauppa 8	7.3.2018 11:15	9.4.2018 10:30	32,97

Taulukko 5. Kauppojen energiat taulukon 4 ajanjaksolla.

	Koneikon kuluttama sähkö [kWh]	LTO:n tuottama energia [kWh]
Kauppa 5	11852,3*	9442,0*
Kauppa 6	9585,9	15420,0
Kauppa 7	6822,8	8003,0
Kauppa 8	17342,0	13100,0

* mittausjakso eri

Seuraavaksi lasketaan energiankulutus ja LTO:n tuottama energia 35 päivälle vertailun helpottamiseksi yhtälöllä (1). Vertailujaksoksi on valittu 35 päivää, koska etäyhteyden ajanjakso oli 35 päivää.

$$\frac{E_a}{t_a} \times t_v = E_v \tag{1}$$

missä E_a on alkuperäinen sähköenergia tai lämpöenergia [kWh]

E_v on vertailujakson sähköenergia tai lämpöenergia [kWh]

t_a on alkuperäinen mittausjakso [d]

t_v on vertailujakso 35 päivää [d]

Nyt, kun kaikkien kauppojen mittausajanjaksot on saatu 35 päivään, niin voidaan taulukoida kaikkien kohteiden arvot samalla ajanjaksolla taulukkoon 6.

Taulukko 6. 35 päivän arvot yhdistettynä.

	Koneikon kuluttama sähkö [kWh]	LTO:n tuottama energia [kWh]
Kauppa 1	16517	12530
Kauppa 2	8743	6480
Kauppa 3	19596	37150
Kauppa 4	15558	11270
Kauppa 5	12151	11385
Kauppa 6	9531	15332
Kauppa 7	11625	13636
Kauppa 8	18411	13907

Suurin eroavaisuus löytyy kaupan 3 LTO:n tuottamasta energiasta, joka on suuri verrattuna muihin. Kauppaa 8 lukuun ottamatta suuren LTO:n energiatuoton ansiona voidaan pitää tulistuksen LTO:a, ja lisäksi kaupan 3 suuret lukemat johtuvat tulistuksen LTO:n lisänä käytettävästä lauhdelämmön LTO:sta. Kaupassa 3 siis hyödynnetään korkean lämpötilan tulistuslämmön lisäksi matalamman lämpötilan lauhdelämpöä. Kaupan 8 LTO-energia olisi korkeampi, jos tulistuslämmön osuus olisi saatu mitattua. Kohdetta voidaan kuitenkin vertailla lauhdelämmön osalta. Yhtälössä (2) lasketaan koneikon kuluttaman sähkön ja LTO:n tuottaman energian suhde.

$$\frac{Q_{LTO}}{E_v} = S \tag{2}$$

missä Q_{LTO} on LTO:n tuottama lämpöenergia [kWh]

S on suhdeluku [-]

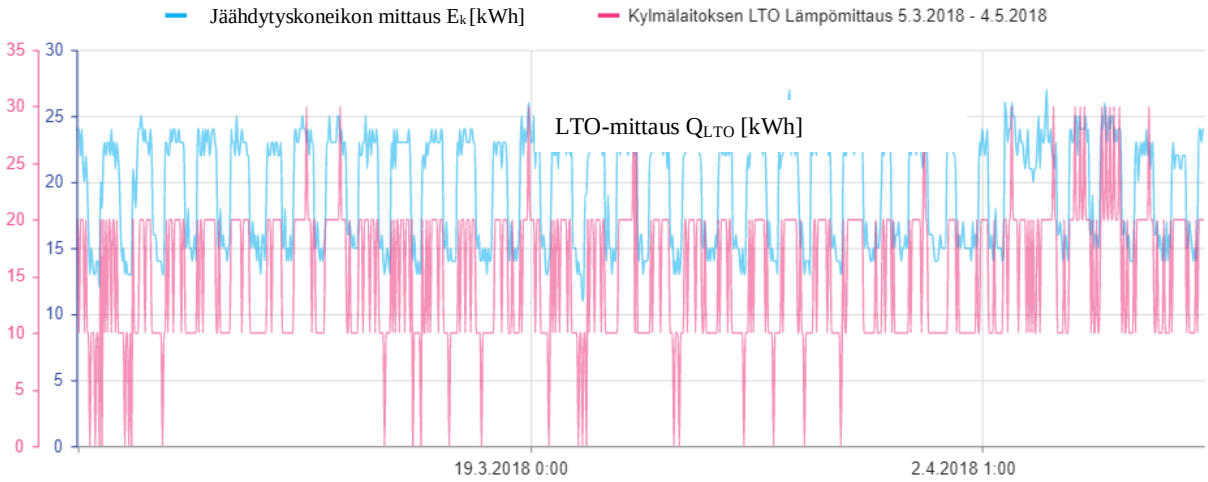
Taulukossa 7 esitetään loput tulokset. Mitä suurempi arvo, sitä enemmän saadaan kulutetusta energiasta lämpöä talteen.

Taulukko 7. LTO-energian suhde käytettyyn sähköenergiaan. Suurempi arvo on parempi.

	S [-]
Kauppa 1	0,759
Kauppa 2	0,741
Kauppa 3	1,896
Kauppa 4	0,724
Kauppa 5	0,937
Kauppa 6	1,609
Kauppa 7	1,173
Kauppa 8	0,755

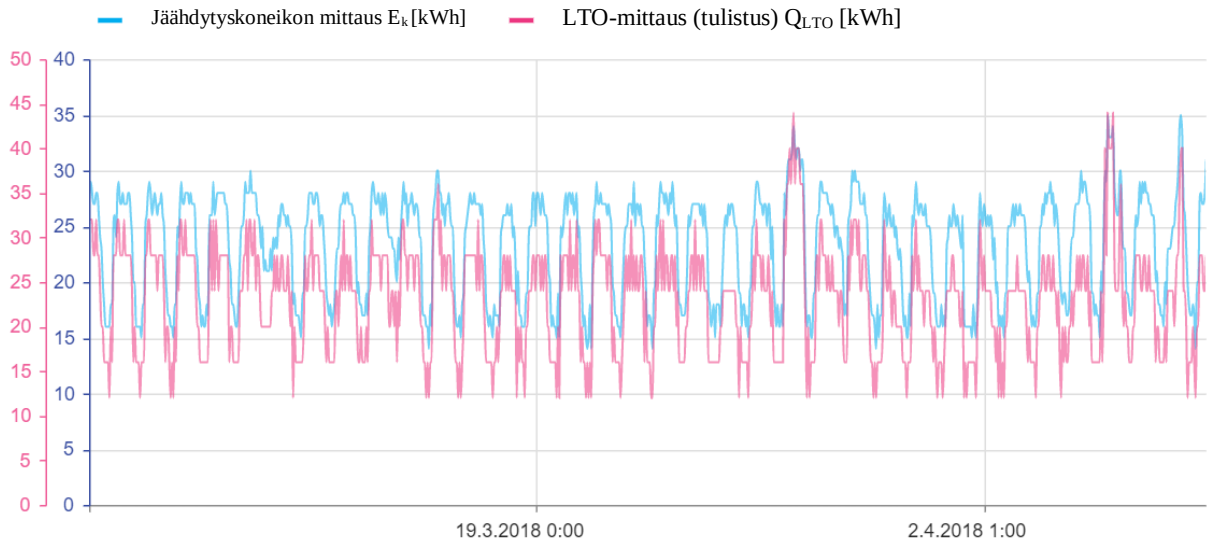
Kaupan 3 korkea suhdeluku on seurausta jo aiemmin mainitusta lauhdelämmön hyödyntämisestä. Jos kaupassa 3 ei huomioitaisi lauhdelämmön poistoa, niin suhdeluvuksi tulisi 0,989. Kaupan 6 suhdeluku on huomattavan korkea verrattuna muihin, koska kaupassa 6 hyödynnettiin vain tulistuslämpö. Syyksi voidaan epäillä mittausvirhettä tai vikaa järjestelmässä.

Kauppojen 1-4 luenta keräsi 2 kWh tai 10 kWh pulsseja ja lisäsi rajan saavutettuaan energiamäärän lokiin. Kuvassa 9 nähdään etäyhteyden energialuennan kuvaaja kaupalle 1, joka on kerännyt 10 kWh energimääriä. Kuvassa 10 on kaupan 3 energialuennan kuvaaja, joka on 2 kWh:n tarkkuudella. Kauppojen 1, 2 ja 4 mittaus on toteutettu 10 kWh pulsseina ja kaupan 3 mittaus 2 kWh pulsseina.



Kuva 9. Kaupan 1 tuntikohtainen jäähdytyskoneikon ja LTO:n mittaustulokset.

LTO-mittauksen kuvaajasta voidaan huomata, että arvot ovat joko 0, 10, 20 tai 30 kWh. LTO:n kuvaaja olisi paremiin luettavissa, jos luennan tarkkuus olisi vähintään kuvan 10 mukainen.



Kuva 10. Kaupan 3 tuntikohtainen jäähdytyskoneikon ja LTO:n tulistuksen poiston mittaustulokset

Kaupan 3 etäyhteyden luenta oli tarkempi kuin kaupoissa 1, 2 ja 4. Kuvaajassa LTO-mittaus on esitetty 2 kWh tarkkuudella. Kuvaajasta myös huomataan, miten lämpöenergian talteenotto seuraa käytetyn sähköenergian määrää. Korkean sähköenergian kulutuksen aikana lämpöenergian talteenotto on luonnollisesti myös korkea. Kuvaajasta voidaan myös huomata eroja siinä, onko kauppa auki vai kiinni. Kun kauppa on kiinni, sähköenergian kulutus tippuu merkitsevästi, jolloin sama ilmiö tapahtuu lämmöntalteenotollekin.

Mittaustulosten oikeudellisuuteen voitaisiin perehtyä tarkemmin tarkastamalla etäyhteydellä luetut arvot paikan päällä. Kauppojen laajemmalla mittaroinnilla voitaisiin havaita järjestelmän toiminnassa esiintyviä poikkeamia, jotka vaikuttavat LTO-energiaan. Jos kaupoissa käytettäisiin keskenään saman tyyppisiä mittareita, olisi mittaustulokset paremmin vertailukelpoisia.

4 YHTEENVETO

Tämän kandidaatintyön tavoitteena oli selvittää K-supermarkettien lämmöntalteenotolla saatava energia ja vertailla näitä energioita toisten K-supermarkettien kanssa. Työssä perehdyttiin kirjallisuuden avulla kauppojen koneistoon ja lämmöntalteenottoon. Kirjallisuuden tarkastelun avulla voitiin ymmärtää kauppojen kylmäjärjestelmän ja lämmöntalteenoton perusperiaatteet sekä kylmäaineena käytetyn hiilidioksidin ominaisuudet.

Tulosten perusteella voidaan todeta, että kylmäjärjestelmän lämmöntalteenotto on merkittävä lisä kaupan lämpöenergian tarpeeseen. Kauppojen keskinäisiä eroavaisuuksia voidaan perustella eri lämmönhyödyntämistavoilla ja mittausvirheillä. Tästä tutkielmasta on löydettävissä myös tiettyjä rajoitteita. Mittaustietojen koonti onnistui hyvin, mutta tulosten oikeellisuuteen on suhtauduttava kriittisesti. Kauppojen lämmöntalteenoton suhdelukujen tarkempaan eroavaisuuksien tarkasteluun tarvittaisiin sekä laajempaa mittarointia että luotettavampia mittauksia.

Jatkotutkimuksena voisi olla kauppojen laajempi ja syvällisempi seuranta, jolla saataisiin lisää tietoa lämmöntalteenottoon vaikuttaviin tekijöihin. Tämän työn tulosten perusteella voisi esimerkiksi tehdä syvällisempiä tutkimuksia kauppoihin, joissa mitatut tulokset poikkeavat merkitsevästi toisistaan. Jatkotutkimusaiheena voisi tutkia lisäksi sitä, kuinka paljon talteen otetusta lämpöenergiasta saadaan todellisuudessa hyötykäyttöön.

LÄHTEET

Advansor A/S, 2016. Environmentally friendly systems for supermarkets. [verkkojulkaisu]. [viitattu 10.4.2018]. Saatavissa: http://www.advansor.dk/media/1199/eng_compsuper-2.pdf

Aittomäki, A, 2012. Kylmätekniikka. 4. painos. Helsinki, Suomen Kylmäyhdistys ry.

Bush J, Aute V & Radermacher R, 2018. Transient simulation of carbon dioxide booster refrigeration system with mechanical subcooler in demand response operation. Science and Technology for the Built Environment.

Hakala, P ja Kaappola, E, 2007. Kylmälaitoksen suunnittelu. 2. Tarkistettu painos. Opetushallitus.

Kim M. et. al., 2004. Progress in Energy and Combustion Science 30 (2004) 119–174.

Motiva, 2012. Kaupan kylmälaitteiden ja -järjestelmien lauhdelämmön talteenotto [verkkojulkaisu]. [viitattu 25.3.2018]. Saatavissa: https://www.motiva.fi/files/7973/Kaupan_kylmalaitteiden_ja_-jarjestelmien_lauhdelammon_talteenotto_Laskentaohje.pdf

Motiva, 2009. Kylmää tehokkaasti päivittäistavarakaupalle [verkkojulkaisu]. [viitattu 7.4.2018]. Saatavissa: https://www.motiva.fi/files/2889/Kylmaa_tehokkaasti_paivittaistavarakaupalle.pdf

Sawalha S, 2008. Carbon Dioxide in Supermarket Refrigeration. Doctoral Thesis. Division of Applied Thermodynamics and Refrigeration Department of Energy Technology Royal Institute of Technology. Tukholma, Ruotsi.

Sawalha, S, 2012. Investigation of heat recovery in CO2 trans-critical solution for supermarket refrigeration. International journal of refrigeration, 145-156.