



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

EERIK KARPPINEN
EUROOPAN UNIONIN KYLMÄAINELAINSÄÄDÄNNÖN VAIKU-
TUKSET PIENEN KOKOLUOKAN MARKETTIEEN KYLMÄN-
TUOTON TEKNISIIN SOVELLUTUKSIIN JA ENERGIATEHOK-
KUUTEEN

Diplomityö

Tarkastaja: dos. Hannu Ahlstedt
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Luonnontieteiden tiedekunnan tiede-
kuntaneuvoston kokouksessa 3.
helmikuuta 2016

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Ympäristö- ja energiatekniikan koulutusohjelma

KARPPINEN, EERIK: Euroopan Unionin kylmäainelainsäädännön vaikutukset pienen kokoluokan markettien kylmäntuoton teknisiin sovellutuksiin ja energiatehokkuuteen

Diplomityö, 67 sivua, 1 liitesivu

Helmikuu 2016

Pääaine: Talotekniikka

Tarkastaja: dosentti Hannu Ahlstedt

Avainsanat: energialaskenta, kylmäainelainsäädäntö, lämmöntalteenotto, omakoneellinen kaluste, välillinen lauhdutus, hiilidioksidikylmäaine, boosterlaitteisto, pieni marketti

Kylmäainelainsäädäntö tiukentuu ja sen myötä HFC-kylmäaineiden käyttö ajetaan alas. Isomman kokoluokan marketeissa lainsäädäntö ei ole ongelma, koska niissä kylmäntuotto on kannattavaa tehdä hiilidioksidilla toimivalla booster-koneistolla. Pienemmässä kokoluokassa hiilidioksiditoteutus on kallis ratkaisu, ja konehuoneen tilantarve on usein ongelma.

Hiilidioksiditoteutuksen rinnalle on pienen kokoluokan marketteihin tulossa omakoneelliset kalusteet, jotka käyttävät välillistä lauhdutusta. Omakoneellisten kalusteiden ongelmana on varsinkin pakkaspuolen kylmäainevalinta, mutta kylmäpuolella ympäristöystävällinen propaani toimii kylmäaineena verrattain energiatehokkaasti.

Tämän diplomityön tarkoituksena on kartoittaa markkinoiden kylmäainetilannetta ja vertailla pienen marketin kylmäntuoton eri ratkaisujen energiatehokkuutta. Omakoneellisille välillisille kalusteille on luotu tämän diplomityön osana energialaskentaohjelma, jonka avulla voidaan verrata sähkönkulutusta ja lämmöntalteenottoa booster-koneiston energialaskentaohjelman tuloksiin. Tämän diplomityön tarkoituksena on auttaa löytämään kylmäntuoton konsepti pieniin marketteihin, minkä vuoksi työssä käsitellään ratkaisuja, joilla hankkeita on käytännössä tarkoitus toteuttaa.

Diplomityön tulokset osoittavat, että hiilidioksiditoteutus on sähkönkulutukseltaan edullisempi ratkaisu varsinkin, kun lämmöntalteenotto on käytössä. Kuitenkin pienen marketin lämmöntarve on niin vähäistä, että lämmöntalteenottolaitteistoon ei välttämättä investoida. Kun lämmöntalteenotto ei ole käytössä, omakoneellinen ratkaisu, jossa kylmäpuolen kylmäaineena toimii R134a ja pakkaspuolen kylmäaineena R410A, on energiatehokkuudeltaan varteenotettava vaihtoehto. Kuitenkin ympäristöystävällisyyden ja kylmäainelainsäädännön kannalta booster-koneisto on paras ratkaisu.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Environmental and Energy Technology

KARPPINEN, EERIK: The effects of European Union's regulation on refrigerants on the technical applications and the energy efficiency of refrigeration in small grocery stores

Master of Science Thesis, 67 pages, 1 appendix page

February 2016

Major: Building Services Engineering

Examiner: Adjunct Professor Hannu Ahlstedt

Keywords: energy calculation, regulation on refrigerants, heat recovery, plug-in shelf unit, indirect condensing, carbon dioxide refrigerant, booster system, small grocery store

As the regulation on refrigerants tightens the use of HFC refrigerants is decreased. In larger supermarkets regulation is not an issue because refrigeration is profitable to implement with a carbon dioxide booster system. In small grocery stores the carbon dioxide system is an expensive solution and the space requirement of the engine room is often a problem.

An indirect plug-in system which uses indirect condensation is standing out as an alternative for the carbon dioxide system in small grocery stores. The problem with the indirect plug-in system is particularly the choice of refrigerant in freezers. In higher temperatures propane works well as a refrigerant.

The purpose of this thesis is to identify the market situation of refrigerants and to compare the energy efficiency of different refrigeration solutions in small grocery stores. The energy calculation tool for indirect plug-in systems has been made as a part of this thesis. With the energy calculation tool it is possible to compare electricity consumption and heat recovery with the corresponding results of an energy calculation tool for a carbon dioxide booster system. Another purpose of this thesis is to find the concept of implementing refrigeration in small grocery stores. Due to this purpose, this thesis is about solutions that actually are implemented in real projects.

The results of this thesis show that carbon dioxide booster system is more energy efficient especially when the heat recovery is enabled. In small grocery stores the need of heating is so small that there might be no point in investing on the heat recovery equipment. When the heat recovery is disabled the indirect plug-in system in which refrigerant in higher temperatures is R134a and in lower temperatures R410A is considerable solution in the terms of energy efficiency. In the terms of the wellness of the environment and the regulation on refrigerants the carbon dioxide booster system is the best solution.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Granlund Tampere Oy:lle ja työn tarkastajana toimii dosentti Hannu Ahlstedt.

Tämä diplomityö on opettanut minulle paljon ja selventänyt minulle kylmätekniiikan käytännön ongelmien ratkaisutapoja sekä antanut kuvaa oikeista hankkeista. Teoreettisen kylmätekniiikan lisäksi olen oppinut paljon myös projektityöskentelystä.

Suuret kiitokset Granlund Tampere Oy:n Timo Heikkilälle ja muille kylmäosaston työtovereilleni Antti Hakalalle ja Henri Kärkkäiselle opastuksesta. Erityistä kiitosta haluan antaa myös opiskelutovereilleni Markus Laineelle ja Antti Isotalolle, jotka ovat auttaneet minua suuresti matkani loppusuoralla kohti diplomi-insinöörin tutkintoa. Lämpimät kiitokset myös perheelle, ystäville, koirille ja monneille, jotka työajan ulkopuolella ovat antaneet minulle jaksamista. Mainittakoon erityisesti kämppikseni Martti Laakso, joka on toiminut motivaationi luojaan päivästä toiseen niin arkisin kuin viikonloppuisinkin.

Tampereella, 23.2.2016

Eerik Karppinen

SISÄLLYSLUETTELO

| | | |
|-------|---|----|
| 1. | JOHDANTO | 1 |
| 2. | TAUSTA | 2 |
| 2.1 | Historia | 2 |
| 2.1.1 | Ensimmäinen kehitysvaihe | 3 |
| 2.1.2 | Toinen kehitysvaihe | 3 |
| 2.1.3 | Kolmas kehitysvaihe | 4 |
| 2.1.4 | Neljäs kehitysvaihe | 4 |
| 2.2 | Uudet asetukset | 5 |
| 2.2.1 | Vuototarkastusrajat | 5 |
| 2.2.2 | Markkinoille luovuttamisen vähentäminen | 6 |
| 2.2.3 | Markkinoille saattamista koskevat kiellot | 6 |
| 2.2.4 | Laitteiden huoltokielto | 7 |
| 2.2.5 | Kylmäaineiden turvallisuusluokitukset | 8 |
| 3. | KYLMÄAINETILANNE | 9 |
| 3.1 | Yleiset vaadittavat ominaisuudet | 9 |
| 3.1.1 | Termodynaamiset ominaisuudet | 9 |
| 3.1.2 | Kemialliset ominaisuudet | 10 |
| 3.1.3 | Fysiologiset ominaisuudet | 10 |
| 3.1.4 | Ympäristövaikutukset | 11 |
| 3.2 | Käytössä olevat kylmäaineet | 11 |
| 3.2.1 | R134a | 12 |
| 3.2.2 | R404A | 13 |
| 3.2.3 | R407C | 13 |
| 3.2.4 | R410A | 14 |
| 3.2.5 | R717 eli ammoniakki | 15 |
| 3.2.6 | R744 eli hiilidioksidi | 16 |
| 3.2.7 | R290 eli propaani | 18 |
| 3.2.8 | R600a eli isobutaani | 19 |
| 3.3 | Uudet ja kehitteillä olevat kylmäaineet | 19 |
| 3.3.1 | R407A ja R407F | 20 |
| 3.3.2 | R1234yf ja R1234ze | 21 |
| 4. | MARKETIN KYLMÄKONEISTOT | 23 |
| 4.1 | Välilliset omakoneelliset kylmäkalusteet | 23 |
| 4.1.1 | Toimintaperiaate | 23 |
| 4.1.2 | Ohjaus | 24 |
| 4.1.3 | Lämmöntalteenotto | 25 |
| 4.1.4 | Huolto | 26 |
| 4.1.5 | Laittevaihtoehtoja | 26 |
| 4.2 | Booster-koneisto | 28 |

| | | |
|-------|--|----|
| 4.2.1 | Toimintaperiaate | 28 |
| 4.2.2 | Lämmöntalteenotto | 29 |
| 4.2.3 | Ohjaus | 29 |
| 4.2.4 | Huolto..... | 30 |
| 5. | ENERGIALASKENTAOHJELMA | 32 |
| 5.1 | Alkutiedot..... | 32 |
| 5.2 | COP-sovitteet | 34 |
| 5.3 | Kylmä- ja pakkaskalusteet | 36 |
| 5.4 | Liuospiirin mitoitus | 39 |
| 5.5 | Lämmöntalteenotto..... | 43 |
| 5.6 | Kalusteiden energiankulutus | 44 |
| 6. | LASKENNAN TULOKSET..... | 46 |
| 6.1 | Omakoneellinen toteutus..... | 48 |
| 6.1.1 | R134a/R410A..... | 48 |
| 6.1.2 | R290/R410A | 51 |
| 6.2 | Booster-toteutus | 53 |
| 6.2.1 | Alikriittinen ajo | 54 |
| 6.2.2 | Transkriittinen ajo | 56 |
| 7. | VERTAILU..... | 59 |
| 7.1 | Sähkönkulutus | 59 |
| 7.2 | Lämmöntalteenotto..... | 60 |
| 7.3 | Muita toteutukseen vaikuttavia tekijöitä | 60 |
| 7.4 | Vertailun tulokset | 61 |
| 8. | YHTEENVETO | 63 |
| | LÄHTEET..... | 65 |

LIITE A: Omakoneellisen välillisen toteutuksen liuospiirin kytkentäkaavio

LYHENTEET JA MERKINNÄT

Lyhenteet

| | |
|--------------------|---|
| 2L | Pienemmän syttymisherkkyyden luokka (Mildly flammable) |
| AB | Alkyylibentseenipohjainen synteettinen öljy |
| ASHRAE | Kestävää kehitystä edistävä yhdistys (American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers) |
| CFC | Kloorifluorihiilivety |
| CH ₃ Cl | Metyylikloridi |
| CO ₂ | Hiilidioksidi |
| COP | Kylmäkoneen kylmäkerroin tai lämpöpumpun lämmönkerroin |
| GWP | Kylmäaineen ilmaston lämmitysvaikutus (Global warming potential) |
| HCFC | Halogenoitu kloorifluorihiilivety |
| HFC | Fluorihiilivety |
| HFO | Vety-fluori-olefiini |
| LTO | Lämmöntalteenotto |
| MO | Mineraaliöljy |
| NH ₃ | Ammoniakki |
| ODP | Kylmäaineen haitallinen vaikutus otsonille (Ozone depleting potential) |
| PAG | Polyalkyleeniglykolipohjainen synteettinen öljy |
| PAO | Polyalfaolefiinipohjainen synteettinen öljy |
| POE | Polyoliesteripohjainen synteettinen öljy |
| ppm | Pitoisuuden yksikkö (parts per million) |
| SO ₂ | Rikkidioksidi |
| 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 | Hiilidioksidiin verrattu ja kylmäaineen kasvihuonevaikutuksen huomioonottava kylmäainemäärä |
| COP-sovite | Kylmäaineelle ominainen kylmäkoneen kylmäkertoimen käyrä, joka seuraa lauhtumislämpötilaa |
| F-kaasuasetus | Euroopan Unionin F-kaasuja (N:o 517/2014) koskeva asetus |
| GWP-arvo | Yhden kasvihuonekaasukilogramman lämmitysvaikutus suhteessa hiilidioksidiin 100 vuoden ajanjaksolla |
| 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 vaakakselilla entalpia ja pystyakselilla logaritminen paine |

| | |
|---------------------------------|--|
| Lämmöntalteenottopotentialiaali | Ideaalinen lämmöntalteenoton määrä, joka ei ota kantaa lämmöntalteenoton hyötysuhteeseen |
| ODP-arvo | Kylmäaineen haitta otsonille 100 vuoden ajanjaksolla verrattuna R11-kylmäaineeseen |
| Omakoneellinen Plug-in | Oamalla kylmäpiirillä varustettu laite Liitetään suoraan sähköverkkoon ilman muita kytkentöjä |
| Regenerointi | Kylmäaineen suorituskyvyn palauttaminen |
| TEWI-indeksi | Laitoksen elinaikana tuottama kasvihuonehaitta kilogrammoina hiilidioksidia |
| Tulistuminen | Höyryn lämpötilan nousu yli kylläisen höyryn paineen edellyttämän lämpötilan |
| Transkriittinen | Kriittisen pisteen molemmin puolin tapahtuva prosessi |
| Trippelipiste | Aineen tilapiste, jossa on kolme faasia samanaikaisesti läsnä |
| Välillinen | Välillistä lauhtutusta käyttävä jäähdytysjärjestelmä |

Symbolit

| | |
|------------------|---|
| c_h | Vesihöyryn ominaislämpö vakiopaineessa |
| c_i | Ilman ominaislämpö vakiopaineessa |
| c_p | Ominaislämpökapasiteetti |
| d | Sisähalkaisija |
| h | Entalpia |
| h_k | Kylmäkalusteiden sisäisen ilman entalpia |
| h_p | Pakkaskalusteiden sisäisen ilman entalpia |
| I_{h0} | Veden höyrystymislämpö 0 °C:ssa |
| k | Käyttökerroin |
| k_o | Ovellisten kalusteiden kerroin |
| k_{ot} | Ovettomien kalusteiden kerroin |
| $k_{sulatus}$ | Sulatuksen käyttökerroin |
| L | Pituus |
| L_k | Kylmäkalustemetrinä |
| L_p | Pakkaskalustemetrinä |
| \dot{m} | Massavirta |
| P_k | Kompressorin ottoteho |
| P_p | Liuospumpun ottoteho |
| P_{reunal} | Reunalämmityksen vaatima sähköteho |
| $P_{reunal-tod}$ | Reunalämmityksen todellinen tunnitainen tehontarve |
| P_{sk} | Kylmäkalusteiden sulatuksen vaatima teho pituusyksikköä kohden |
| P_{sp} | Pakkaskalusteiden sulatuksen vaatima teho pituusyksikköä kohden |
| $P_{sulatus}$ | Sulatuksen tarvitsema sähköteho |
| Q_j | Kylmäkalusteiden jäähdytystehon tarve |
| Q_{jmk} | Kylmäkalusteiden mitoitusjäähdytystehon tarve yhteensä |
| Q_{jmp} | Pakkaskalusteiden mitoitusjäähdytystehon tarve yhteensä |

| | |
|------------------|---|
| Q_{jv} | Kylmäkalusteiden tunnittainen jäähdyttävä vaikutus |
| Q_l | Lauhdutusteho |
| Q_{LTO} | Lämmöntalteenoton teho |
| Re | Reynoldsin luku |
| T_A | Nestelauhduttimille menevän liuoksen lämpötilan asetettu minimiarvo |
| T_l | Lauhtumislämpötila |
| $T_{LTO-meno}$ | Lämmöntalteenottolaitteille menevän liuoksen lämpötila |
| T_u | Ulkolämpötila |
| T_s | Sisäilman lämpötila |
| v | Nopeus |
| \dot{V} | Tilavuusvirta |
| x | Ilman absoluuttinen kosteus |
| x_{max} | Ulkoilman absoluuttisen kosteuden maksimi |
| x_o | Ovituksen osuus |
| Δh_k | Kylmäkalusteen sisäilman entalpian ja mitoitusilanteen entalpian ero |
| Δh_p | Pakkaskalusteen sisäilman entalpian ja mitoitusilanteen entalpian ero |
| Δp | Putkiston painehäviö |
| ΔT_{LAN} | Liuoksen lämpötilannousu nestelauhduttimissa |
| ρ | Tiheys |
| ζ | Kertavastus |
| ξ | Kitkakerroin |
| μ | Hyötysuhde |
| ν_k | Kinemaattinen viskositeetti |

1. JOHDANTO

Euroopan Unionin F-kaasuasetuksen myötä kylmäainelainsäädäntö tiukentuu ja kylmäainetilanne heikkenee. Tämän vuoksi pienissä marketeissa, joissa kylmätuotto on nojannut HFC- eli fluorihilivetykylmäaineisiin, on suunnittelu- ja toteutuskonsepti laadittava uudelleen. Tällä hetkellä varteenotettavia toteutusvaihtoehtoja ovat hiilidioksidilla toimiva booster-koneisto tai välillinen omakoneellinen ratkaisu. Hiilidioksidi täyttää kaikki F-kaasuasetuksen vaatimukset, mutta omakoneellisten kalusteiden kylmäaineet vaativat vielä kehittämistä.

Käytännössä valitaan usein halvin ratkaisu. Booster-koneisto on investointikustannuksiltaan kallis ja sen vaatiman konehuoneen sijoittaminen tuottaa usein ongelmia pienissä marketeissa. Tämän vuoksi on syytä tarkastella kylmäaineiden ympäristöystävällisyyden lisäksi myös vaihtoehtojen energiatehokkuutta. Sähkönkulutus ja lämmöntalteenotto vaikuttavat suurelta osalta järjestelmien kannattavuuteen.

CO₂-booster-koneiston sähkönkulutukselle ja lämmöntalteenottopotentialille on energialaskentaohjelma. Kuitenkaan omakoneellisen välillisen toteutuksen energiatehokkuudesta ei ole tarkempaa tietoa. Tämän diplomityön tarkoituksena on luoda energialaskentaohjelma omakoneelliselle välillisellä toteutukselle ja verrata valitun mitoitustilanteen tuloksia samoissa olosuhteissa hiilidioksidilla saatuihin tuloksiin. Tuloksien avulla yritetään edesauttaa pienien markettien toteutuskonseptin löytämistä.

Energialaskentaohjelma pyritään toteuttamaan niin, että kylmäainetilanteen parantuessa uudet kylmäaineet pystytään ottamaan huomioon, jolloin vertailu ei rajoitu vain F-kaasuasetuksen luomaan murrostilanteeseen vaan pidemmälle aikajaksolle. Lisäksi, koska omakoneellinen välillinen ratkaisu on verrattain uusi toteutustapa, koneiston ohjauksessa on epäselvyyksiä ja optimoitavaa. Energialaskentaohjelma pyritään toteuttamaan myös niin, että hankkeiden myötä saatu empiirinen tieto voidaan hyödyntää tulevaisuudessa. Energialaskentaohjelmasta on tarkoitus saada käyttökelpoinen työkalu.

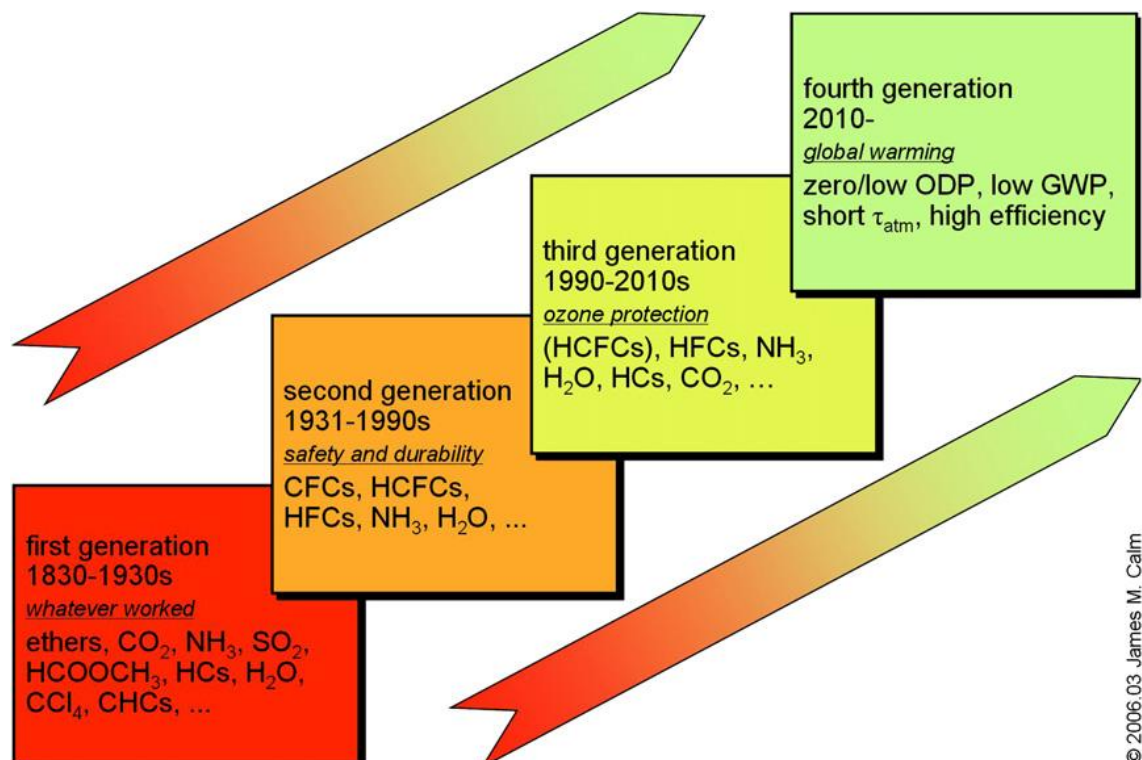
Tämä diplomityö painottuu energiatehokkuuteen, joten esimerkiksi investointikustannuksia ja muita hankkeen toteutustapaan vaikuttavia tekijöitä ei käsitellä tarkemmin. Niiden käsittely sivuutetaan myös sen vuoksi, että ne ovat hyvin hankekohtaisia ja tilaajan toiveet vaikuttavat niihin suuressa määrin. Sähkönkulutus ja lämmöntalteenotto ovat lähes suoraan verrannollisia hankkeen kokoon, minkä vuoksi niiden perusteella on mielekkäämpää ja totuudenmukaisempaa vertailla toteutustavan kannattavuutta.

2. TAUSTA

Kylmäaineiden kehitys on tapahtunut vaiheittain. Eri aikakausien kehityksen pääpaino on ollut kylmäjärjestelmän toimivuudessa, turvallisuudessa, otsonikerroksen suojelussa ja kasvihuonevaikutuksen vähentämisessä. Näiden päämäärien avulla on kylmäaineiden ominaisuuksille luotu standardeja, jotka muuttuvat jatkuvasti. Standardien muutoksen myötä tulee aiheelliseksi etsiä uusia kylmäaineita, jotka täyttävät ympäristö-, turvallisuus ja tehokkuusvaatimukset eri käyttökohteissa. Kuitenkin teknologian kehityksen avulla on voitu hyödyntää myös jo ennen käytössä olleita luonnollisia kylmäaineita. Lisäksi kylmäntuottoa on tärkeää tarkastella sen vuoksi, että elintarvike- ja juomateollisuus on liikevaihdoltaan suuri tehdasteollisuuden ala Euroopassa. Noin 75 % kaikesta teollisuuden jäähdytyksestä on asennettu elintarvikealalle. [28, s. 29]

2.1 Historia

1600- ja 1700-luvulla useissa maissa tutkijat perehtyivät aineiden olomuodonmuutoksiin fysiikkaan ja heidän löydöksensä loivat pohjan keinotekoiselle jäähdytykselle [11, s. 1124]. Modernien kylmäaineiden kehitys voidaan jakaa neljään kehitysvaiheeseen, jotka on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Modernien kylmäaineiden neljä kehitysvaihetta [11, s. 1124].

Koneellinen kylmäteknikka sai alkunsa 1830-luvulla, jolloin alkoi ensimmäinen neljästä kehitysvaiheesta. [16, s. 1] Uudet kylmäainesaadokset johtuvat kaikkien kehitysvaiheiden kumuloituneista tavoitteista. 2010-luvulla kasvihuonekaasupäästöjen minimoiminen ajaa kylmäaineuudistuksia eteenpäin.

2.1.1 Ensimmäinen kehitysvaihe

Ensimmäinen kehitysvaihe alkoi 1830-luvulla, jolloin yleisimpiä kylmäaineita olivat hiilidioksidi (CO_2), ammoniakki (NH_3), rikkidioksidi (SO_2) ja metyylikloridi (CH_3Cl). Lähes kaikki käytetyt kylmäaineet olivat palavia, myrkyllisiä tai molempia. Hiilidioksidi oli yksi poikkeuksista, mutta sen käyttöpaine aiheutti ongelmia tuotantotekniikoille ja materiaaleille [16, s. 1].

Lähtökohtana oli käyttää mitä tahansa kylmäainetta, joka vain toimi. Tämän lähtökohdan ja tietämättömyyden kylmäaineiden riskeistä vuoksi vaarallisia kylmäaineita käytettiin ja markkinoitiin kylmälaitteistoissa. Esimerkiksi propaania markkinoitiin hajuttomana, turvallisena ja neutraalina kylmäaineena, joka ei aiheuta korroosioita. Lisäksi mainittiin, että propaani ei ole haitallinen eikä ärsyttävä ja tarpeen vaatiessa sen höyryn läsnä ollessa voi työskennellä ilman haittaa ihmisen terveydelle. Ensimmäisessä kehitysvaiheessa onnettomuuden olivat yleisiä [12, s. 310].

2.1.2 Toinen kehitysvaihe

1920-luvun aikana kylmäteknikka yleistyi ja sitä myöten myös onnettomuuden lisääntyivät. Syntyi ajatus siitä, että kylmäteknikan kehitys vaatii uusia vaarattomia kylmäaineita. Thomas Midgley Jr. valittiin johtamaan kehitysryhmää ja hänen apunaan toimivat Albert L. Henne ja Robert R. McNary. Heidän tarkoituksenaan oli löytää turvallisia ja kestäviä kylmäainevaihtoehtoja.

He kävivät läpi taulukkoa kemikaalien ominaisuuksista löytääkseen aineet, joilla on sopivat höyrystymispisteet. Taulukosta he rajasivat tutkittavaksi aineet, joiden tiedettiin olevan stabiileja ja jotka eivät ole myrkyllisiä eivätkä palavia [11, s. 1125]. Kolmen päivän etsimisen jälkeen he löysivät CFC-yhdisteet eli kloorifluorihiiilivedyt, jotka tunnetaan myös nimellä freonit. Yhteensä CFC-yhdisteitä oli 15 ja ne sisälsivät hiiliatomin lisäksi eri määriä kloori, fluoria ja vetyä. [16, s. 1]

Vuonna 1931 alkoi R11-kylmäaineen kaupallinen tuotanto, mitä seurasi vuonna 1932 R12-kylmäaineen tuotannon käynnistys. CFC-yhdisteet ja myöhemmin HCFC-yhdisteet eli halogenoidut kloorifluorihiiilivedyt olivat hallitsevia kylmäaineita toisessa kehitysvaiheessa. Ammoniakki (R717) kuitenkin säilytti asemansa suurien teollisuuslaitosten kylmäaineena. [11, s. 1125]

2.1.3 Kolmas kehitysvaihe

Kolmannen kehitysvaiheen alun perustana olivat tutkimukset, joista huomattiin yhteys CFC-päästöjen ja otsonikadon välillä. Otsonikerroksen suojeleminen vaati sitä kuluttavien CFC-yhdisteiden poistamisen käytöstä. HCFC-yhdisteitä voitiin vielä käyttää väliaikaisesti, mutta pitkällä aikavälillä oli tarkoitus käyttää HFC-yhdisteitä. Lisäksi vaatimus uudisti kiinnostusta vanhoihin luonnollisiin kylmäaineisiin kuten hiilidioksidiin ja ammoniakkiin.

Vuonna 1985 laadittiin otsonikerroksen suojelua koskeva Wienin yleissopimus, jonka tavoitteena on tukea otsonikerroksen tilaa koskevaa tutkimustyötä, valvoa CFC-yhdisteiden tuotantoa ja edistää tiedonvaihtoa valtioiden välillä. Wienin yleissopimus johti kaksi vuotta myöhemmin 1987 Montrealin pöytäkirjaan, jossa sovittiin päästörajoituksista otsonikadon pysäyttämiseksi.

Kehittyneet valtiot lopettivat CFC-yhdisteiden käytön uusissa laitteissa vaiheittain vuoteen 1996 mennessä. HCFC-yhdisteiden käytön vaiheittainen lopetus tapahtuu Montrealin pöytäkirjan mukaan niin, että vuoden 1996 käyttömääristä vuoteen 2004 mennessä käytössä oli 65 %, vuoteen 2010 mennessä 25 %, vuoteen 2015 mennessä 10 %, vuoteen 2020 mennessä on 0,5 % ja täydellinen käytön lopetus tapahtuu vuoteen 2030 mennessä.

Eri maat vastasivat määräyksiin eri tavoin. Suuri osa länsimaista ja Keski-Euroopan maista kiihdyttivät HCFC-yhdisteiden poistamista käytöstä, kun taas suurin osa muista kehittyneistä valtioista päätyi vaiheittain poistamaan R22-kylmäaineen käytön ponnekaasuna ja puhallusaineena vuoteen 2010 mennessä. Vuoteen 2020 mennessä näiden muiden valtioiden on määrä lopettaa täysin HCFC-yhdisteiden käyttö. [11, s. 1125]

2.1.4 Neljäs kehitysvaihe

Neljännän kehitysvaiheen tavoite on pienentää kasvihuonekaasupäästöjä ja löytää kylmäainevaihtoehtoja, jotka täyttävät kaikkien kehitysvaiheiden tavoitteet. [16, s. 1] Kehitysvaihetta ohjaa F-kaasuasetus, joka on vähentämisohjelma, jonka tarkoituksena on rajoittaa kasvihuoneilmiötä edistävien HFC-yhdisteiden käyttöä. Monia yhdisteitä on tutkimuksen alla ja luonnonmukaisten kylmäaineiden käyttöä tullaan lisäämään niiden ympäristöystävällisyyden vuoksi. Kylmäaineuudistuksen myötä myös teknologian on kehityttävä niin, että tulevaisuuden kylmäaineilla laitteistot toimivat energiatehokkaasti. Koska neljäs kehitysvaihe on tällä hetkellä meneillään, käsitellään kylmäaineita ja laitteistoja myöhemmin tässä diplomityössä. Lisäksi F-kaasuasetusta ja neljättä kehitysvaihetta ohjaavia standardeja käsitellään seuraavassa kappaleessa.

2.2 Uudet asetukset

F-kaasuasetus tuo lukuisia uusia määräyksiä ja kieltoja. Sen tarkoitus on vähentää fluorattuja kasvihuonekaasupäästöjä. Asetus hyväksyttiin 14. huhtikuuta 2014 ja sen soveltaminen aloitettiin 1. tammikuuta 2015. [14, s. 195] Käytännössä monet asetuksen vaikutukset näkyvät vasta myöhemmin vuosina, koska kiellot ja rajoitukset tulevat voimaan portaittain. Kylmä- ja lämpöpumppualoille tulee eniten muutoksia. F-kaasuasetus ohjaa ottamaan vähitellen ja hallitusti käyttöön uutta teknologiaa, jolla on alhainen ilmaston lämmitysvaikutus niin, että kustannustehokkuus säilyy. [17, s. 7]

2.2.1 Vuototarkastusrajat

F-kaasuasetuksella pyritään estämään vuotoja määräyksillä vuototarkastuksista, vuotojen havaitsemisjärjestelmistä, kirjapidosta, fluorattujen yhdisteiden tuotannosta, tuottajavastuujärjestelmistä ja talteenotosta sekä asiaankuuluvien henkilöiden koulutuksesta ja pätevöinnistä. [14, s. 201-207] Asetuksen artikkelit selventävät tarkasti, ketä ja mitä laitteistoja vuotojen ehkäisemistoimenpiteet koskevat.

Laitteistojen huolto ja tarkastaminen on tärkeä osa vuotojen ehkäisemistä. F-kaasuasetuksen myötä täytösperusteiset tarkastusmäärävaatimukset vaihtuvat CO₂-ekvivalenttitonniperusteisiksi. CO₂-ekvivalenttitonnimäärä saadaan kertomalla kilogrammaperusteinen kylmäainemäärä kylmäaineen GWP-arvolla (Global Warming Potential). GWP-arvo tarkoittaa yhden kasvihuonekaasukilogramman lämmitysvaikutusta suhteessa hiilidioksidiin 100 vuoden ajanjaksolla. Aiemmin yhtä vuosittaista vuototarkastusta vaatinut alin kylmäainetäytösraja, kolme kilogrammaa, muuttuu viideksi CO₂-ekvivalenttitonniksi. Vastaavasti kahta vuosittaista tarkastusta vaatinut 30 kilogramman raja muuttuu 50 CO₂-ekvivalenttitonniksi ja neljää tarkastusta vaatinut 300 kilogramman raja 500 CO₂-ekvivalenttitonniksi. [17, s. 8] Jos laitteessa on vuotojen havaitsemisjärjestelmä, tarkastusaikavälin vähimmäisvaatimus kaksinkertaistuu. [14, s. 202] Taulukossa 1 on esitetty muutaman kylmäaineen täytösrajoja ja niitä vastaavia tarkastusmääriä.

Taulukko 1. Esimerkkejä eri kylmäaineiden täytösrajoista vuosittaisista tarkastusvaatimuksista. [19, s. 11]

| Kylmäaine | GWP | 5 t CO ₂ -ekv. | 50 t CO ₂ -ekv. | 500 t CO ₂ -ekv. |
|-----------|------|---------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| R-134a | 1430 | 3,5 kg | 35,0 kg | 349,7 kg |
| R-404A | 3922 | 1,3 kg | 12,7 kg | 127,5 kg |
| R-410A | 2088 | 2,4 kg | 23,9 kg | 239,5 kg |
| R-407A | 2107 | 2,4 kg | 23,7 kg | 237,3 kg |
| R-407C | 1777 | 2,8 kg | 28,1 kg | 281,4 kg |

Vuototarkistusmääräyksiin sisältyy poikkeus. Vuototarkastuksia ei 31. päivään joulukuuta 2016 saakka tarvitse suorittaa sellaisten laitteiden osalta, jotka sisältävät alle 3 kg fluorattuja kasvihuonekaasuja, tai ilmatiiviisti suljettujen laitteiden osalta, jotka on

asianmukaisesti merkitty sellaisiksi ja jotka sisältävät alle 6 kg fluorattuja kasvihuonekaasuja. [14, s. 202]

2.2.2 Markkinoille luovuttamisen vähentäminen

Asetuksen N:o 842/2006 kuudennen artiklan mukaisesti kylmäaineiden tuottajien ja maahantuojien on ollut määrä antaa tietoja markkinoille saattamistaan fluorihiihivety-määristä. Vuosien 2009-2012 välisen ajan vuotuinen keskiarvo fluorihiihivety-määrästä toimii tuottajien ja maahantuojien CO₂-ekvivalenttitonninmuotoisena viitearvona. [14, s. 211]

F-kaasujen markkinoille luovuttamisen vähentämisohjelman perustuu kiintiöjärjestelmään. Kylmäaineiden tuottajille ja maahantuojille jaetaan kiintiöt edellä mainitun viitearvon mukaan. Vuoden 2015 kiintiö vastaa tätä viitearvoa. Vuodesta 2015 lähtien kiintiötä lasketaan vertaamalla sitä viitearvoon taulukon 2 mukaisesti.

Taulukko 2. Yritysten kylmäainekiintiöt vuosien 2009-2012 keskiarvoon verrattuna. [14, liite V]

| Vuodet | Prosenttiluku, jolla lasketaan fluorihiihivetyjen markkinoille saattamista koskevat enimmäismäärät ja vastaavat kiintiöt |
|-----------|--|
| 2015 | 100 % |
| 2016-2017 | 93 % |
| 2018-2020 | 63 % |
| 2021-2023 | 45 % |
| 2024-2026 | 31 % |
| 2027-2029 | 24 % |
| 2030 | 21 % |

Osa kiintiöstä varataan mahdollisille uusille toimijoille. Lisäksi huomioitavaa on, että kaikki kylmäaineet ovat saatavilla vielä 2030, millä osaltaan varmistetaan vanhan laitekannan huollot. Uusissa kohteissa vaihtoehtoisin kylmäaineisiin on tarkoitus pyrkiä siirtymään nopeammin. [19, s. 11]

2.2.3 Markkinoille saattamista koskevat kiellot

F-kaasuasetus kieltää portaittain tuotteiden ja laitteiden saattamista markkinoille. Puolustukseen tarkoitettut tarvikkeet on kuitenkin rajattu kieltojen ulkopuolelle. Kylmäalan kannalta tärkeimpiä kielloja ja niiden kieltämispäivämääriä on esitetty taulukossa 3. Kiellot koskevat voimaantultuaan vain uusia laitteita. [14, liite III] Taulukon 3 kohdista 1-4 kohta 2 koskee pienen kokoluokan markettien kylmäntuottoa. Muut kohdat vaikuttavat kylmäaineiden saatavuuteen ja kehitykseen.

Taulukko 3. Uusia kylmälaitteita koskevia kieltoja. [14, liite III]

| Tuotteet ja laitteet | | Kiellon voimaantulo |
|---|---|---------------------|
| 1. Kaupalliseen käyttöön tarkoitettut jääkaapit ja pakastimet (ilmatiiviisti suljetut laitteet), | jotka sisältävät fluorihii- vetyjä, joiden GWP on vähintään 2 500 | 1. tammikuuta 2020 |
| | jotka sisältävät fluorihii- vetyjä, joiden GWP on vähintään 150 | 1. tammikuuta 2022 |
| 2. Kiinteät jäähdytyslaitteet, jotka sisältävät fluorihii- vetyjä tai joiden toiminta perustuu niihin ja, joiden GWP on vähintään 2 500, lukuun ottamatta laitteita, jotka on tarkoitettu sovelluksiin, joita käytetään tuotteiden jäähdyttämiseen alle -50 celsiusasteen lämpötiloihin | | 1. tammikuuta 2020 |
| 3. Kaupalliseen käyttöön tarkoitettut monikompressoriset keskusjääh- dytysjärjestelmät, joiden arvioitu kapasiteetti on vähintään 40 kW ja jotka sisältävät fluorattuja kasvihuonekaasuja tai joiden toiminta pe- rustuu niihin ja joiden GWP on vähintään 150, lukuun ottamatta kaskadijärjestelmien primääriä kylmäainepiiriä, jossa voidaan käyt- tää fluorattuja kasvihuonekaasuja, joiden GWP on alle 1 500 | | 1. tammikuuta 2022 |
| 4. Single split -ilmastointijärjestelmät, jotka sisältävät alle 3 kg fluorat- tujen kasvihuonekaasuja, joiden GWP on vähintään 750, tai joiden toiminta perustuu niihin | | 1. tammikuuta 2025 |

Taulukon 3 kohdan 3 kielto ohjaa isompia myymälöitä ottamaan käyttöön hiilidioksidijärjestelmiä. Pohjois-Euroopassa nämä järjestelmät ovat jo yleisiä. Suomessa on käytetty pääsääntöisesti ratkaisuna booster-laitoksia, jonka ainoa kylmäaine on hiilidioksidi. [18, s. 9]

2.2.4 Laitteiden huoltokielto

Kylmälaitteiden huoltoon liittyvä rajoitus kieltää fluorattujen kasvihuonekaasujen, joiden lämmitysvaikutus on vähintään 2 500, käytön sellaisten jäähdytyslaitteiden huollossa tai kunnossapidossa, joiden täytöskoko on vähintään 40 hiilidioksidiekvivalenttitonnia. Kielto astuu voimaan 1. päivä tammikuuta 2020. Poikkeuksena ovat puolustustarvikkeet ja laitteistot, joilla jäähdytetään tuotteita alle -50 °C lämpötilaan. [14, s. 209]

Vuoden 2030 alkuun asti voidaan kuitenkin käyttää kunnossapidossa ja huollossa regeneroituja ja kierrätettyjä fluorattuja kasvihuonekaasuja, vaikka niiden GWP-arvo olisikin suurempi kuin 2500. Regeneroidut kylmäaineet on varustettava merkinnällä regeneroinnista sekä tiedoilla erän numerosta ja regenerointilaitoksen nimestä ja osoitteesta. Kierrätettyjä kylmäaineita saadaan käyttää niillä ehdoilla, että ne on otettu talteen samanlaisesta kylmälaitteesta. Tällaisia kierrätettyjä kaasuja saavat käyttää vain yritykset, jotka ovat ottaneet ne talteen osana kunnossapitoa tai huoltoa, tai yritykset, joiden puolesta ne on otettu talteen osana kunnossapitoa tai huoltoa. [14, s. 209] Regeneroinnilla tarkoitetaan talteenotetun kylmäaineen uudelleenkäsittelyä, jonka tarkoituksena on

saada sen suorituskyky vastaamaan käyttämättömän aineen tasoa. Kierrätettyjä kylmäaineita voidaan uudelleenkäyttää peruspuhdistuksen jälkeen. [18, s. 8]

2.2.5 Kylmäaineiden turvallisuusluokitukset

Kylmäaineiden turvallisuusluokitukset perustuvat palavuuteen ja myrkyllisyyteen. Palavuus luokat ovat:

1. ilmassa palamattomat,
2. alempi syttymisraja ilmassa vähintään 3,5 til.-% ja
3. alempi syttymisraja ilmassa on alle 3,5 til.-%.

Myrkyllisyysluokat ovat:

- A. aineet, joiden sallittu työpaikkapitoisuus on yli 400 ppm ja
- B. aineet, joille sallitaan työpaikkapitoisuus enintään 400 ppm.

Jaottelu on eurooppalaisen normin (EN 378-1) mukainen. [8, s. 102] Uusia kylmäaineita tarkasteltaessa on kuitenkin tullut tarpeelliseksi tarkentaa palavuusluokkia. ASHRAE-luokituksissa ja kansainvälisessä ISO 817 -standardissa on palavuusluokka 2L (mildly flammable), joka tarkoittaa pienempää syttymisherkkyyttä. 2L-luokka sijoittuu turvallisuusluokituksissa taulukon 4 mukaisesti.

Taulukko 4. Kylmäaineiden turvallisuusluokat. [18, s. 9]

| Palavuusluokka | | Myrkyllisyysluokka | |
|----------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| | | A (terveydelle haitaton) | B (terveydelle haitallinen) |
| 1 | Palamaton | A1 | B1 |
| 2L | Pienempi syttymisherkyys | A2L | B2L |
| 2 | Syttymisherkkä | A2 | B2 |
| 3 | Suuri syttymisherkyys | A3 | B3 |

Luokkaan 2L sijoittuvat ne 2-luokan kylmäaineet, joiden palamisnopeus on pienempi kuin 10 cm/s. Eurooppalaisessa standardissa 2L-luokkaa ei vielä ole, mutta sen lisääminen on käsittelyssä. [18, s. 9]

3. KYLMÄAINETILANNE

Uusien asetusten vuoksi vanhojen korkean GWP-arvon kylmäaineiden on vähitellen poistuttava käytöstä. Kehitteillä on uusia kylmäaineita, mutta myös esimerkiksi vanhat luonnolliset kylmäaineet, kuten hiilidioksidi, ovat tuoneet teknologian kehityksen myötä vaihtoehtoisia ratkaisuja. Lisäksi pienen kylmäainetäytöksen laitteissa on voitu joustaa kylmäaineen myrkyllisyydessä ja paloherkkyudessa. Jokaiseen sovellukseen sopiva optimaalinen kylmäaine riippuu suuresti nykyajan vaatimuksista. [29, s. 81]

3.1 Yleiset vaadittavat ominaisuudet

Palamattomuuden, myrkyttömyyden ja ympäristöystävällisyyden lisäksi kylmäaineella tulee olla erilaisia muita ominaisuuksia, jotta se toimisi tehokkaasti laitteissa. Millään nykyisistä kylmäaineista ei ole täydellisen kylmäaineen ominaisuuksia, joten optimointia on tehtävä. Eri kylmäaineet toimivat eri olosuhteissa ja näin ollen eri sovelluksissa. Lisäksi on huomattava, että myös hinta vaikuttaa kylmäaineen valintaan.

3.1.1 Termodynaamiset ominaisuudet

Miten kylmäaine käyttäytyy kiertoprosessissa, määräytyy kylmäaineen termodynaamisten ominaisuuksien mukaan. Näitä ominaisuuksia ovat esimerkiksi höyrystymislämpö, höyrynpaine ja ominaislämmöt. Lisäksi painehäviöön ja lämmönsiirtoon vaikuttavat esimerkiksi kylmäaineen viskositeetti, tiheys, pintajännitys ja lämmönjohtavuus. Kylmäaineelle hyviä termodynaamisia ominaisuuksia ovat:

- hyvä lämmönjohtavuus, joka mahdollistaa laitteiston toiminnan pienillä lämpötilaeroilla tai pienillä lämmönsiirtopinnoilla,
- suuri höyrystymislämpö, jonka ansioista massavirta pienenee ja sen myötä myös putkiston ja kompressorin koko pienenee vähentäen investointikustannuksia,
- pieni painesuhde, jolloin puristustyö pienenee ja tulistuminen puristuksen aikana vähenee,
- pieni viskositeetti, jolloin kitkan aiheuttamat painehäviöt pienenevät,
- suuri tilavuustuotto, jolloin lämpöä sitoutuu kylmäaineen höyrystyessä enemmän ja kompressori voi olla kooltaan pienempi ja
- sopiva höyrynpainealue.

Kun lauhtumis- ja höyrystymislämpötilojen ero on suuri, on valittava mahdollisimman vähän tulistuva kylmäaine. Lämpötilaeron kasvaessa tulistuminen lisääntyy. Voimakkaasti tulistuvat kylmäaineet on puristettava kahdessa portaassa ja portaiden välille on

tehtävä välijäähdytys. Lisäksi, jos kylmäaineen kriittinen piste on liian matala, voi prosessi joutua liian lähelle sitä ja häviöt lisääntyvät. Häviöiden lisääntyminen johtuu pääosin tulistumisen ja kuristushäviöiden lisääntymisenä. Seurauksena on kylmäkertoimen huonontuminen. [8, s. 103]

3.1.2 Kemialliset ominaisuudet

Riittävä stabiilius käytettävien materiaalien kanssa on tärkeää noin 150-200 °C asti. Kylmäaine ei saa reagoida käytettävien metallien ja muiden laitteistojen materiaalien kanssa aiheuttaen korroosioita tai elastomeerien kohdalla turvotusta. Kylmäaineiden yhteensopivuutta materiaalien kanssa on testattava pitkään ja laitteiston materiaalit on valittava kylmäaineen mukaan. [8, s. 104] Myös palamattomuus on huomioitava.

Kylmäaineen yksi tärkeä ominaisuus on se, miten se käyttäytyy öljyn kanssa. Yleisesti öljy on haitta kierrossa huonontaan muun muassa kylmäaineeseen liuenneena lämmönsiirtoa. Vaikka kompressorin jälkeen olisi öljynerotus, kylmäaineen mukana pääsee aina ainakin vähän öljyä kiertoprosessiin. Täydellinen liukenemattomuuskin voi olla lämmönsiirron kannalta ongelma, koska öljy muodostaa kalvon pinnoille. Seoskylmäaineiden kohdalla eri komponenttien erilainen käyttäytyminen öljyn kanssa tuottaa yleensä ongelmia. Toivottavaa ovat ääripäät eli joko täydellinen kylmäaineen ja öljyn liukenevuus tai täydellinen liukenemattomuus. Pääasia on kuitenkin, että öljy saadaan palautettua takaisin kompressoriin. [8, s. 105]

Kylmäainekierrossa ei saisi olla vettä. Kuitenkin koneistoon joutuu aina jonkin verran vettä esimerkiksi öljyyn adsorboituneena ja osien pinnalle kertyneenä. Veden haitalliset vaikutukset koneistossa vakavoituvat sen liukenevuuden kylmäaineeseen vähentyessä. Useimpien kylmäaineiden kohdalla vesipitoisuuden tulee olla mahdollisimman pieni. Vesi aiheuttaa korroosioita, lisää öljysakan muodostumista sekä voimistaa öljyn ja kylmäaineen välisiä kemiallisia reaktioita. [8, s. 106]

3.1.3 Fysiologiset ominaisuudet

Kylmäaineet eivät saa päästä vaikuttamaan haitallisesti ihmiseen tai elintarvikkeisiin. Myrkyllisyys on epäsuotuisa ominaisuus ja myrkyllisten kylmäaineiden kohdalla valvonta on oltava varmaa ja luotettavaa. Hyödyllistä on, jos kylmäainevuodot on helppo havaita. Esimerkiksi ammoniakki on myrkyllistä, mutta sitä on käytetty jo kauan.

Yleisesti kylmäaineen haitallisuus ihmiselle näkyy hengityselimien ja limakalvojen ärsyyntymisenä. Ärsyttävyyden tulisi olla vähäistä. Lisäksi kylmäaine ei saa vuodon tapahtuessa pilata jäähdytettäviä elintarvikkeita. Elintarvikkeiden mukana kylmäaine voi päästä helposti ihmisen elimistöön ja aiheuttaa suurempia haittoja. [8, s. 104]

3.1.4 Ympäristövaikutukset

Kylmäaineiden tulisi olla haitattomia ilmakehälle, minkä takia otsonille haitallisista klooria ja bromia sisältävistä kylmäaineista on täytynyt vähitellen luopua. Haitallisuutta otsonille kuvataan ODP-arvolla (Otsone Depleting Potential), joka kuvaa haittaa 100 vuoden ajanjaksolla verrattuna R11-kylmäaineeseen. [8, s. 104]

Kylmäaineiden kasvihuonevaikutusta vertailtaessa on otettava huomioon sekä suorat että välilliset vaikutukset, jotka määräytyvät energiankulutuksen mukaan. Suoraa vaikutusta kuvaa GWP-arvo, mutta koska se ei anna välillisten vaikutusten puuttuessa todellista kuvaa kasvihuonehaitasta, on sen korvaajaksi ehdotettu TEWI-indeksiä (Total Equivalent Warming Impact), joka on laitoksen elinaikana tuottama kasvihuonehaitta kilogrammoina hiilidioksidia. Ajanjakso voi olla esimerkiksi 100 tai 500 vuotta. TEWI-indeksi lasketaan kaavalla:

$$TEWI = GWP * Ln + (GWP * m(1 - \alpha) + nE_a\beta), \quad (1)$$

jossa L on vuoto (kg/a), m täytös (kg), n käyttöikä (a), α talteenottokerroin purettaessa (0,5-0,75), E_a vuotuinen energian kulutus (kWh/a) ja β CO₂-emissio (kg/kWh), jonka eurooppalainen keskiarvo on 0,6. Huonoa TEWI-indeksissä on se, että siihen pyritään sisällyttämään monia epäselviä asioita, kuten esimerkiksi vuotojen suuruus. [8, s. 105]

3.2 Käytössä olevat kylmäaineet

Käytössä olevat kylmäaineet ovat pääsääntöisesti HFC-yhdisteitä ja luonnollisia kylmäaineita. Korkeiden GWP-arvojen vuoksi joudutaan HFC-yhdisteiden käytön tilalle keksimään tulevaisuudessa uusia vaihtoehtoja. F-kaasuasetus antaa kuitenkin siirtymäaikaa. Luonnolliset kylmäaineet todennäköisesti säilyttävät asemansa ja jopa vahvistavat sitä. Taulukossa 5 on esitetty käytössä olevien kylmäaineiden luokituksia ja GWP-arvoja.

Taulukko 5. Käytössä olevien kylmäaineiden luokituksia ja GWP-arvoja. [18, s. 9]

| Kylmäaine | Luokitus | Turvaluokitus | GWP |
|----------------------|-----------------|---------------|------|
| R134a | HFC | A1 | 1430 |
| R404A | HFC-seos | A1 | 3922 |
| R407C | HFC-seos | A1 | 1777 |
| R410A | HFC-seos | A1 | 2088 |
| R717 (ammoniakki) | Luonnonmukainen | B2 (B2L) | 0 |
| R744 (hiilidioksidi) | Luonnonmukainen | A1 | 1 |
| R290 (propani) | Luonnonmukainen | A3 | 3 |
| R600a (isobutaani) | Luonnonmukainen | A3 | 3 |

ODP-arvot ovat kaikilla taulukon 5 kylmäaineilla nolliä. Käytössä olevia kylmäaineita on monia, mutta tässä diplomityössä käsitellään niistä yleisimpiä. Näitä kylmäaineita käytetään eri sovelluksissa ja näin ollen kaikkia kylmäaineita ei käytetä marketeissa. Kuitenkin niiden tulevan korvaamisen myötä uusia kylmäaineita kehitellään ja on tärke-

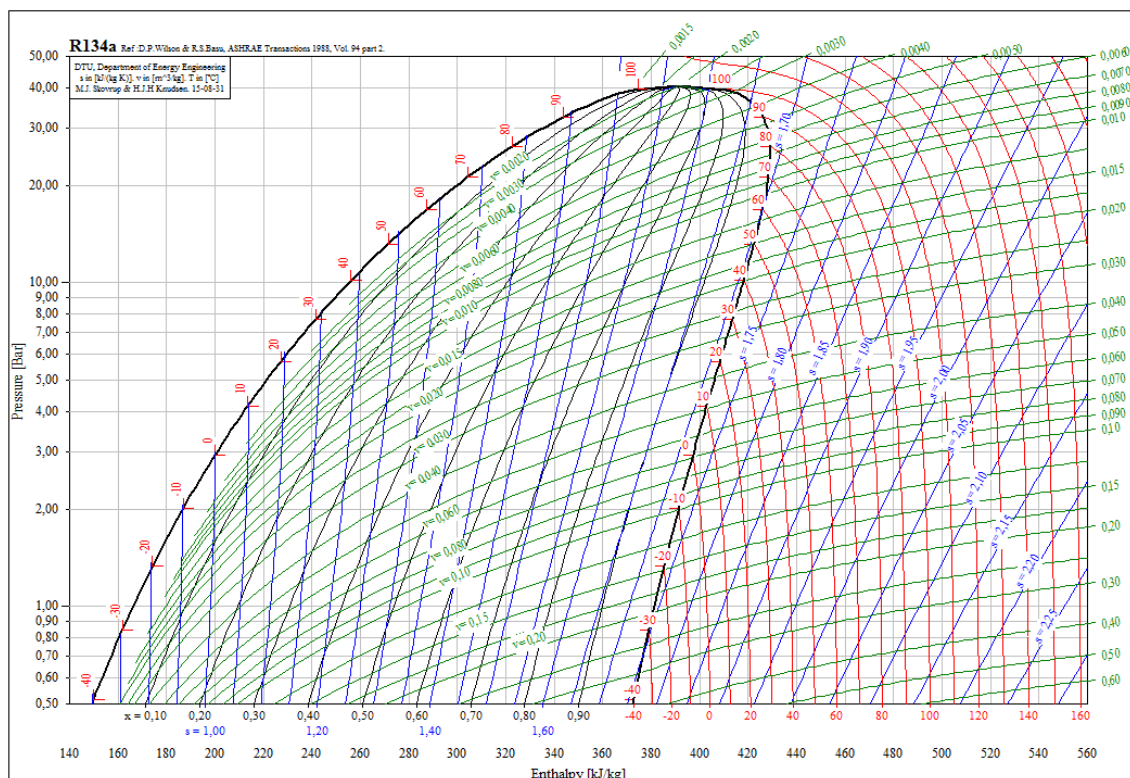
ää tietää myös näiden vanhojen kylmäaineiden ominaisuudet. Kappaleissa käytetyt lämpötila-alueet ovat keski- (0...-15 °C) ja matalalämpötila-alue (-15...-45 °C).

3.2.1 R134a

R134a on etaani johdannainen ja HFC-yhdiste. Se on ainoa käytössä oleva yksikomponenttinen eli puhdas kylmäaine, joten sillä ei ole lämpötilaliukumaa. Käyttökohteita ovat:

- pienet koti- ja laitostalouksien kylmälaitteet,
- henkilöautojen ja yleisten kulkuneuvojen ilmastoinnin jäähdytyslaitteet ja
- ruuvivedenjäähdytyskoneistot.

R134a sopii ilmastointi- ja keskilämpötila-alueille, mutta mataliin höyrystymislämpötiloihin se ei sovellu. [17, s. 24] Kuvassa 2 on esitetty R134a-kylmäaineen log(p),h-tilapiirros.



Kuva 2. R134a-kylmäaineen log(p),h-tilapiirros. [4]

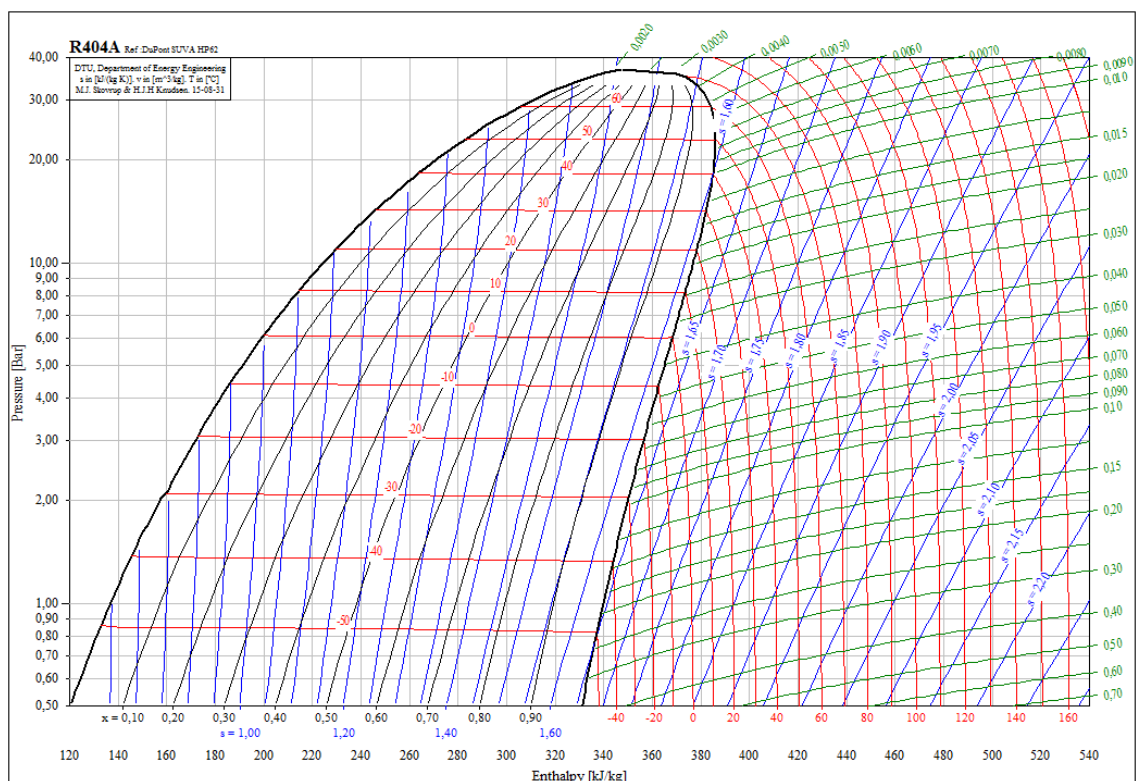
R134a:n tarkoituksena oli korvata etenkin R12. Se ei liukene tarpeeksi mineraaliöljyihin (MO). Riittävä kylmäaineen ja öljyn sekoittuvuus saavutetaan vain polyalkyleeniglykooleilla (PAG) ja estereillä. Veden liukenevuus on luokkaa 1-10 ppm ja se aiheuttaa muun muassa esteriöljyn kanssa haitallisia reaktioita. Veden pääsy on siis estettävä laitteistoon mahdollisimman hyvin. [8, s. 111]

3.2.2 R404A

R404A on HFC-seos, joka koostuu R125-, R134a- ja R143a-kylmäaineista suhteessa 44/4/52. Sen lämpötilaliukuma on vain noin 0,7 °C. Käyttökohteita ovat:

- kaupan kylmä- ja pakastelaitokset,
- kylmä- ja pakastehuoneiden sekä varastojen kylmäkoneistot,
- jäätäkoneistot ja
- kuljetuskorittilojen kylmälaitteet.

R404A sopii matala- ja keskilämpötila-alueelle. [17, s. 24] Kuvassa 3 on esitetty R404A-kylmäaineen log(p),h-tilapiirros.



Kuva 3. R404A-kylmäaineen log(p),h-tilapiirros. [4]

R404:n tarkoitus oli korvata R502 uusissa laitoksissa. Se ei liukene mineraaliöljyihin, joten sen kanssa käytetään esteriöljyä. [8, s. 113]

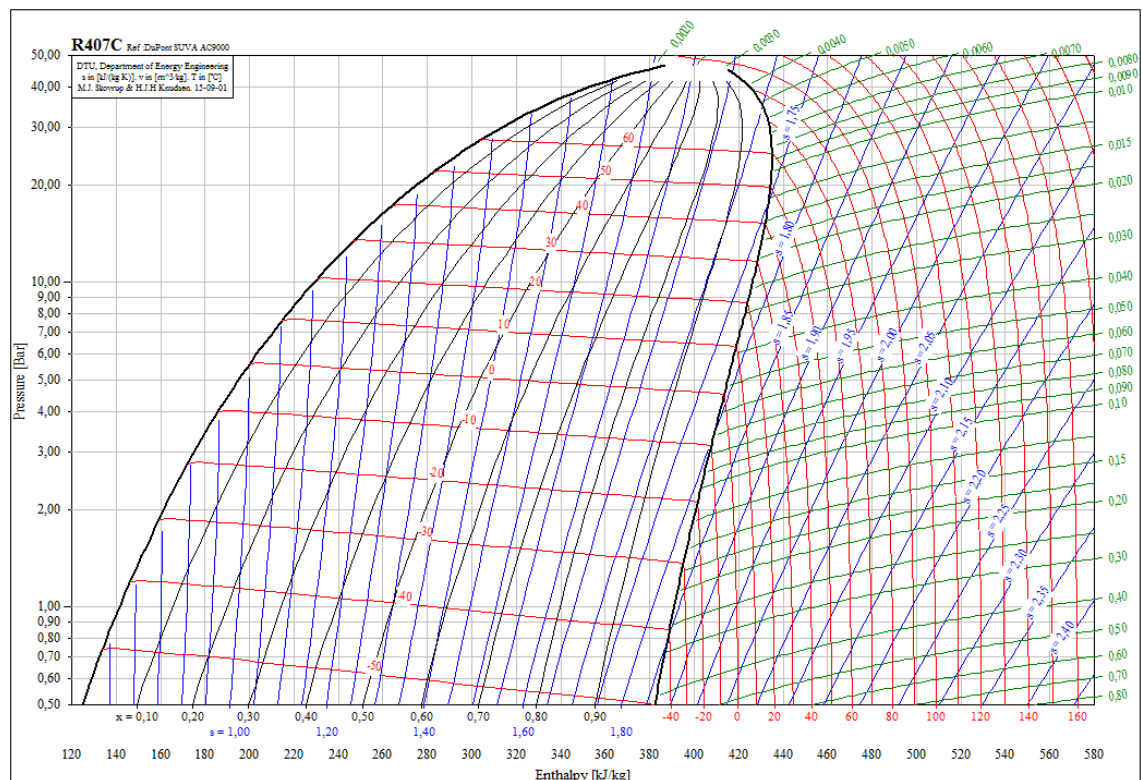
3.2.3 R407C

R407C on HFC-seos, joka koostuu R32-, R125- ja R134a-kylmäaineista suhteessa 23/25/52. Sen lämpötilaliukuma on suuri, noin 7 °C, mikä täytyy ottaa huomioon laitoksen suunnittelussa. Käyttökohteita ovat:

- ikkunakojeet ja huoneilmastointilaitteet,

- vedenjäähdytyskoneistot,
- kaappi- ja vakioilmastointikojeet,
- kompressorilauhduttimet ja
- lämpöpumput.

R407C sopii keskilämpötila-alueelle. [17, s. 24] Kuvassa 4 on esitetty R407C-kylmäaineen log(p),h-tilapiirros.



Kuva 4. R407C-kylmäaineen log(p),h-tilapiirros. [4]

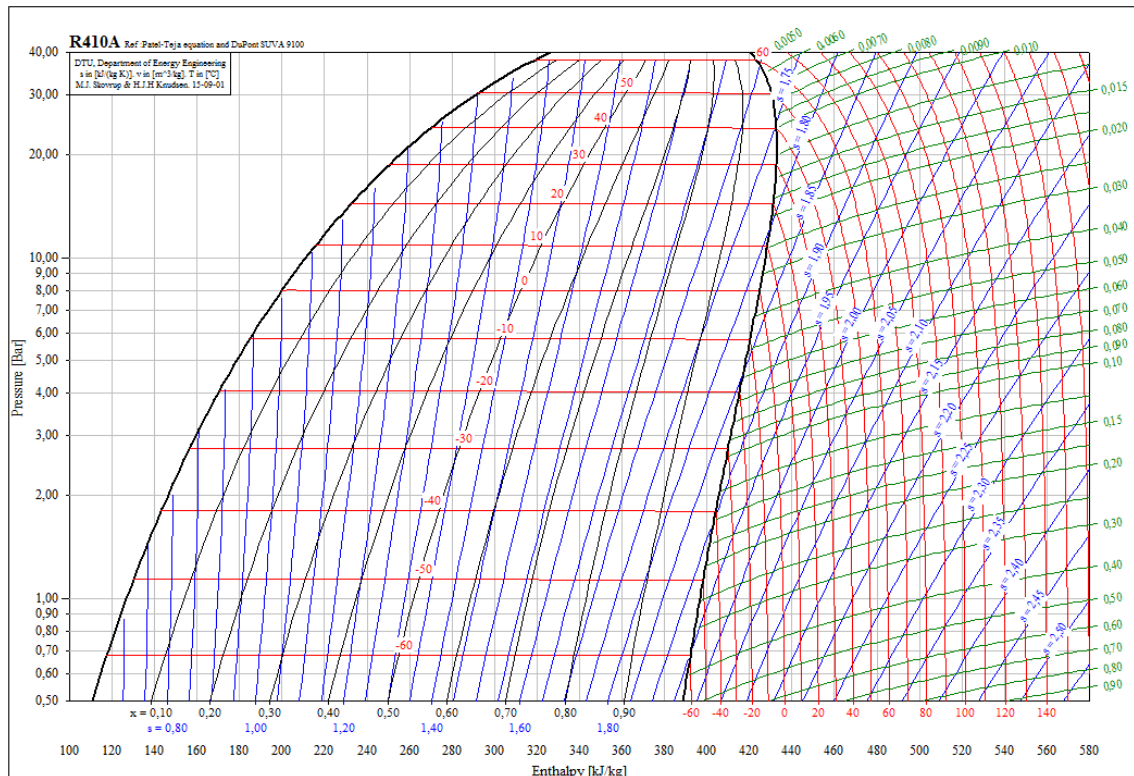
R407C:n tarkoituksena oli korvata R22 ilmastonin jäädytyksessä. Kaikki 407-seokset vaativat synteettisen esteröljyn. [8, s. 113]

3.2.4 R410A

R410A on HFC-seos, joka koostuu R32- ja R125-kylmäaineista suhteessa 50/50. Sen lämpötilaliukuma on vain noin 0,2 °C. Käyttökohteita ovat:

- huoneilmastointikojeet,
- vedenjäähdytyskoneistot ja
- ilmastonin jäädytys.

R410A sopii keskilämpötila-alueelle. [17, s. 24] Kuvassa 5 on esitetty R410A-kylmäaineen log(p),h-tilapiirros.



Kuva 5. R410A-kylmäaineen $\log(p),h$ -tilapiirros. [4]

R410A:n tarkoituksena oli korvata R22 ilmastonin jäädytyksessä. R410A vaatii öljyksi polyoliesteriöljyn (POE).

3.2.5 R717 eli ammoniakki

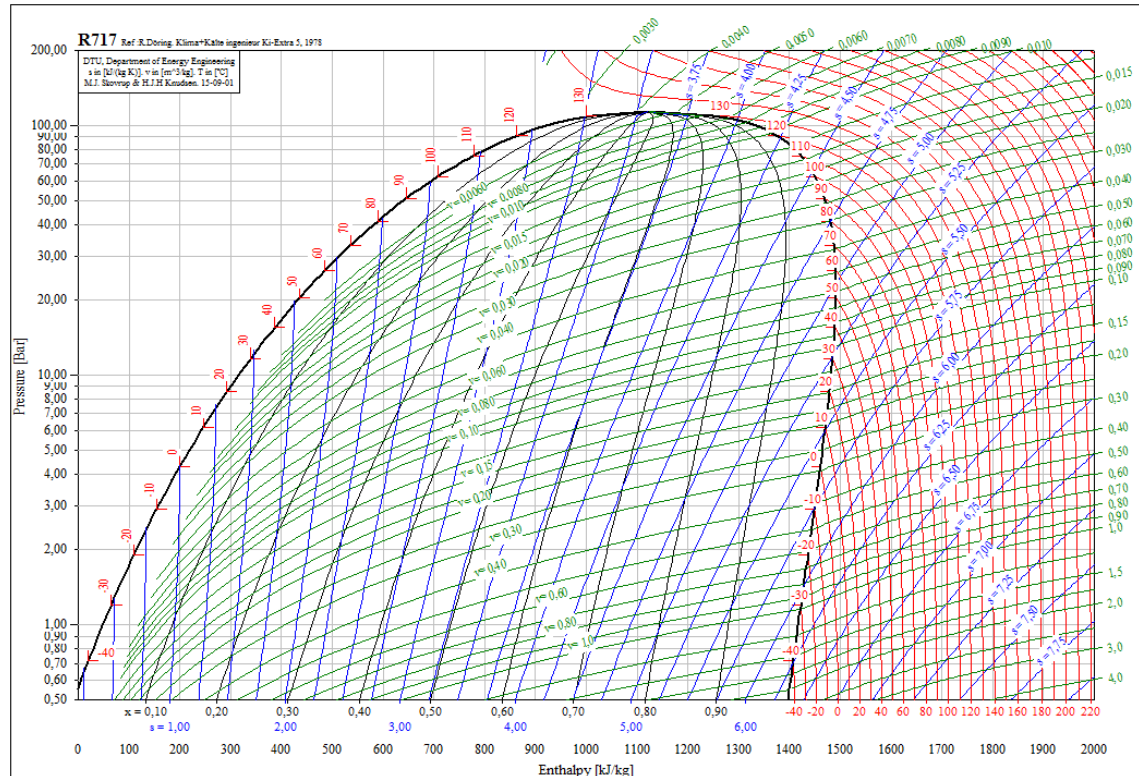
R717 eli ammoniakki on luonnollinen kylmäaine, jonka etuja ovat:

- suuri höyrystymislämpö,
- alhainen viskositeetti,
- suuri tilavuustuotto,
- vuodot on helppo havaita hajun perusteella,
- hyvät lämmönsiirto-ominaisuudet ja
- halpa hinta.

Ammoniakin haittapuolia myrkyllisyyden lisäksi ovat:

- korkea paine lauhduttimessa,
- pienen molekyylin ja pienen ominaislämmön vuoksi tulistuminen on voimakasta puristuksessa,
- vesiliukoisuus on suuri, mutta vesiliuos syövyttää kuparia jo pieninä pitoisuuksina ja
- voi muodostaa ilman kanssa räjähtävän seoksen pitoisuuksilla 13,1-26,8 til.-%.

Ammoniakkia on käytetty paljon suurissa teollisissa kylmälaitoksissa ja kemianteollisuudessa. [8, s. 116-117] Muita ammoniakkin käyttökohteita ovat kaupankylmän ja varastojäähdytyksen välillisen jäähdytyksen koneistot. [17, s. 27] Kuvassa 6 on esitetty ammoniakkin log(p),h-tilapiirros.



Kuva 6. Ammoniakin log(p),h-tilapiirros. [4]

Mineraaliöljyt liukenevat ammoniakkiin luokkaa 1 ppm eli hyvin vähän. Liukenemattoman öljyn tilalle voidaan valita liukeneva syntetttinen PAG-öljy. [8, s. 118]

3.2.6 R744 eli hiilidioksidi

R744 eli hiilidioksidi on luonnollinen kylmäaine, jonka etuja ovat:

- haitattomuus, myrkyttömyys sekä palamattomuus,
- suuri tilavuustuotto,
- suuri höyrystymislämpö,
- erittäin hyvä lämmönsiirto,
- yhteensopivuus kaikkien metallien ja useimpien muovien kanssa ja
- halpa hinta.

Hiilidioksidin haittapuolia ovat:

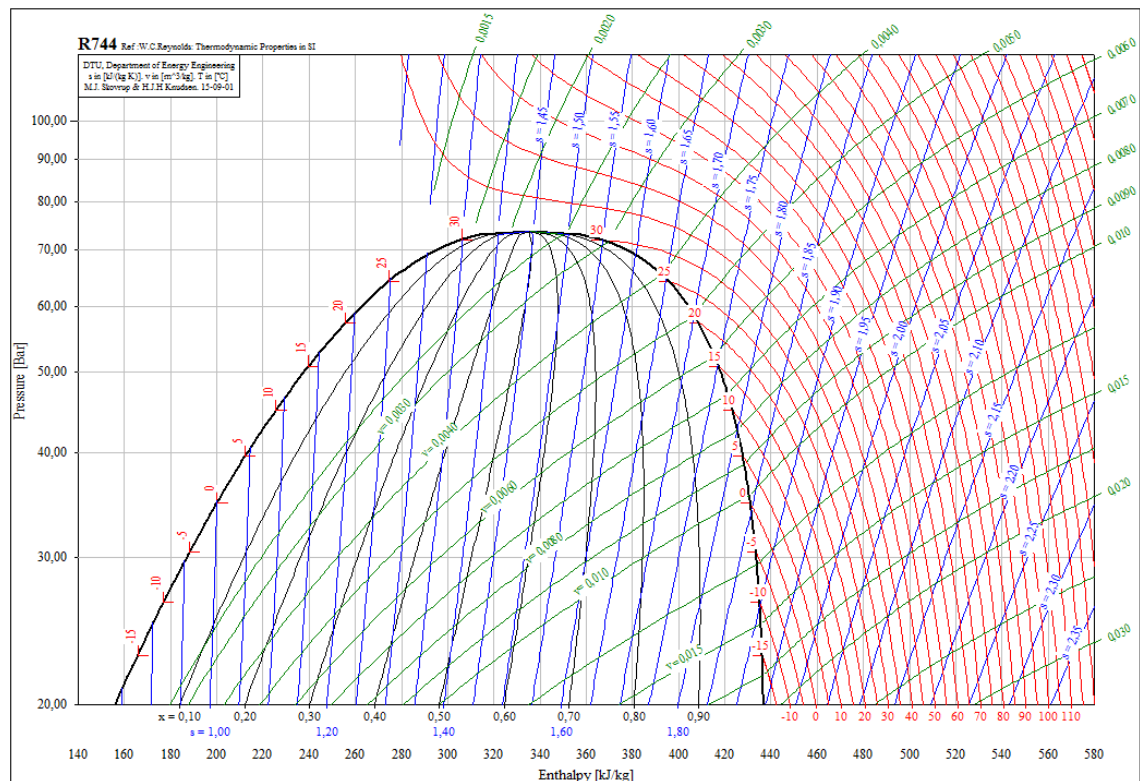
- korkea paine ja alhainen kriittinen piste,
- vuodot vaikea havaita mauttomuuden ja hajuttomuuden vuoksi ja

- alhainen kriittinen lämpötila, minkä vuoksi kylmäkerroin on huono korkealla lämpötila-alueella.

Lisäksi on huomioitava hiilidioksidin trippelipisteen korkea paine. Kun mennään alle noin 5,2 barin, hiilidioksidi muuttuu kiinteäksi ja voi tukkia putket. [8, s. 121-122] Hiilidioksidia käytetään kylmäaineena pääasiassa:

- transkriittisissä kompressoriprosesseissa, jossa lauhtuminen tapahtuu kriittisen pisteen yläpuolella. Prosesseihin kuuluvat lämpöpumput, ajoneuvoilmastointi ja kauppan kylmälaitteet.
- Alikriittisissä kompressoriprosesseissa, jossa lauhtuminen tapahtuu kriittisen pisteen alapuolella. Prosesseihin kuuluvat pakaste- ja pakastuslaitosten kaskadijärjestelmien matalalämpötilapiirit.
- Välillisten järjestelmien liuoksena. [17, s. 27]

Kuvassa 7 on esitetty hiilidioksidin log(p),h-tilapiirros.



Kuva 7. Hiilidioksidin log(p),h-tilapiirros. [4]

Hiilidioksidin kanssa sopivat käytettäväksi mineraaliöljyt, PAG-öljyt, POE-öljyt, alkylibentseenipohjaiset synteettiset öljyt (AB) ja polyalfaolefiinipohjaiset synteettiset öljyt (PAO). [25, s. 14]

3.2.7 R290 eli propaani

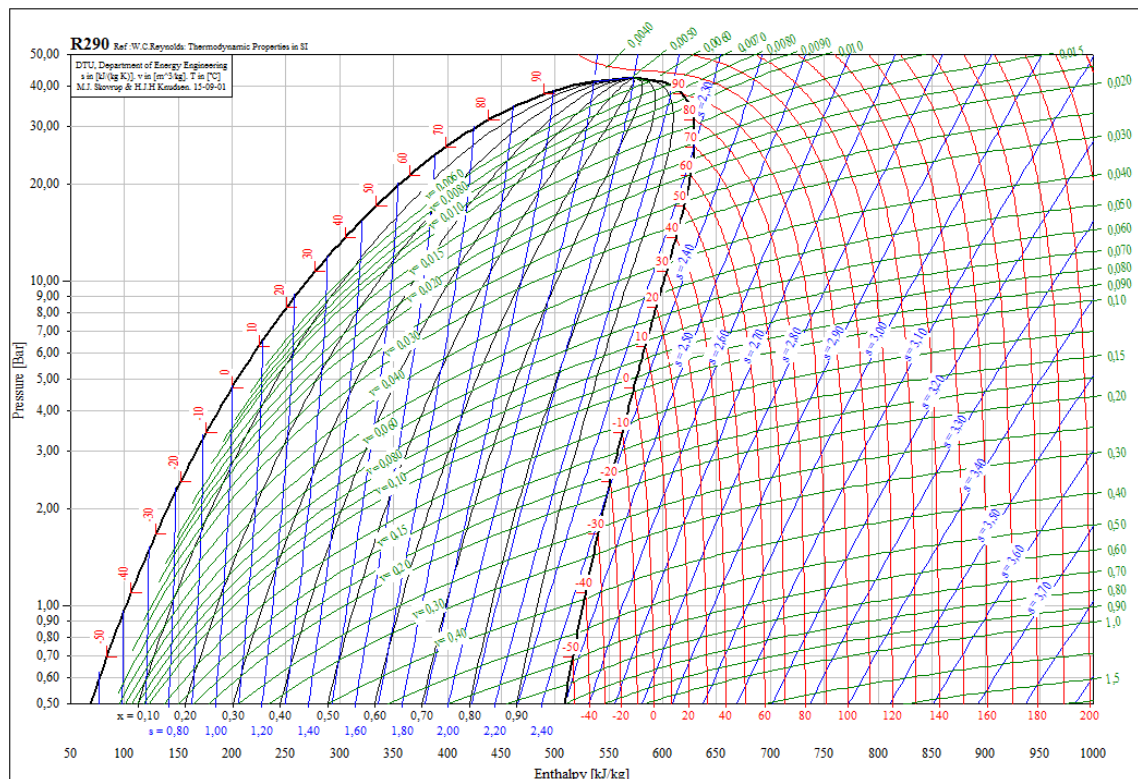
R290 eli propaani on luonnollinen kylmäaine, jonka etuja ovat:

- kemiallinen stabiilius,
- parempi lämmönsiirto kuin halogeenihiilivedyillä,
- myrkyttömyys,
- halpa hinta ja
- höyrynpaine ja jäähdytysteho samaa luokkaa kuin R22-kylmäaineella, mutta massavirta on 55-60 % pienempi, joten kylmäainetäyttö on oleellisesti pienempi.

Propaanin haittapuolia ovat:

- palavuus ja
- erikoishuonetilojen tarve.

Propaania käytetään pienissä kotitalouksien kylmlaitteissa, kaupan kylmän välillisissä järjestelmissä, pienissä vedenjäähdyttimissä ja pienissä ilmastoinnin jäähdytyslaitteissa. [8, s. 120] Kuvassa 8 on esitetty propaanin $\log(p),h$ -tilapiirros.



Kuva 8. Propaanin $\log(p),h$ -tilapiirros. [4]

Voiteluöljynä propaanin kanssa voidaan käyttää mineraaliöljyjä. [17, s. 26]

3.2.8 R600a eli isobutaani

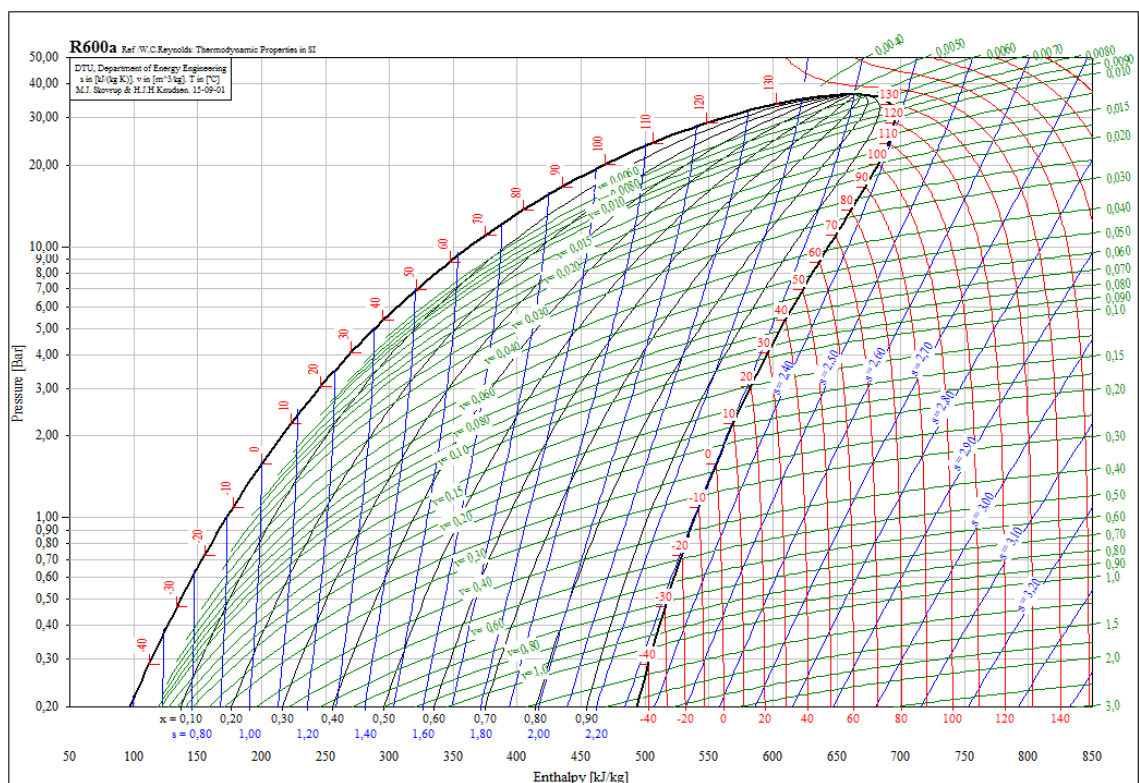
R600a eli isobutaani on luonnollinen kylmäaine, jonka etuja ovat:

- kemiallinen stabiilius,
- hyvä kylmäkerroin ja
- matala puristuslämpötila.

Isobutaanin haittoja ovat:

- palavuus,
- erikoistilojen tarve ja
- pieni tilavuustuotto.

Isobutaania käytetään kotitalouksien kylmlaitteissa, joissa se on Euroopassa syrjäyttänyt lähes täysin R134a-kylmäaineen. Kuvassa 9 on esitetty isobutaanin log(p),h-tilapiirros.



Kuva 9. Isobutaanin log(p),h-tilapiirros. [4]

Voiteluöljynä isobutaanin kanssa voidaan käyttää mineraaliöljyjä. [17, s. 26]

3.3 Uudet ja kehitteillä olevat kylmäaineet

Uusia HFC-kylmäaineita saadaan sekoittamalla HFC-yhdisteitä eri suhteissa keskenään. Näin on mahdollista laskea uusien kylmäaineiden GWP-arvoja, mutta muut ominaisu-

det voivat kärsiä. Potentiaalinen ryhmä aineita ovat vety-fluori-olefiinit (HFO). HFO-yhdisteet ovat halogeenihiilivetyjä, joilla on kaksoissidokset. [8, s. 115] Taulukossa 6 on esitetty uusien ja kehitteillä olevien kylmäaineiden luokituksia ja GWP-arvoja.

Taulukko 6. Uusien ja kehitteillä olevien kylmäaineiden luokituksia ja GWP-arvoja. [18, s. 9]

| Kylmäaine | Luokitus | Turvaluokitus | GWP |
|-----------|----------|---------------|------|
| R407A | HFC-seos | A1 | 2107 |
| R407F | HFC-seos | A1 | 1825 |
| R1234yf | HFO | A2 (A2L) | 4 |
| R1234ze | HFO | A2 (A2L) | 7 |

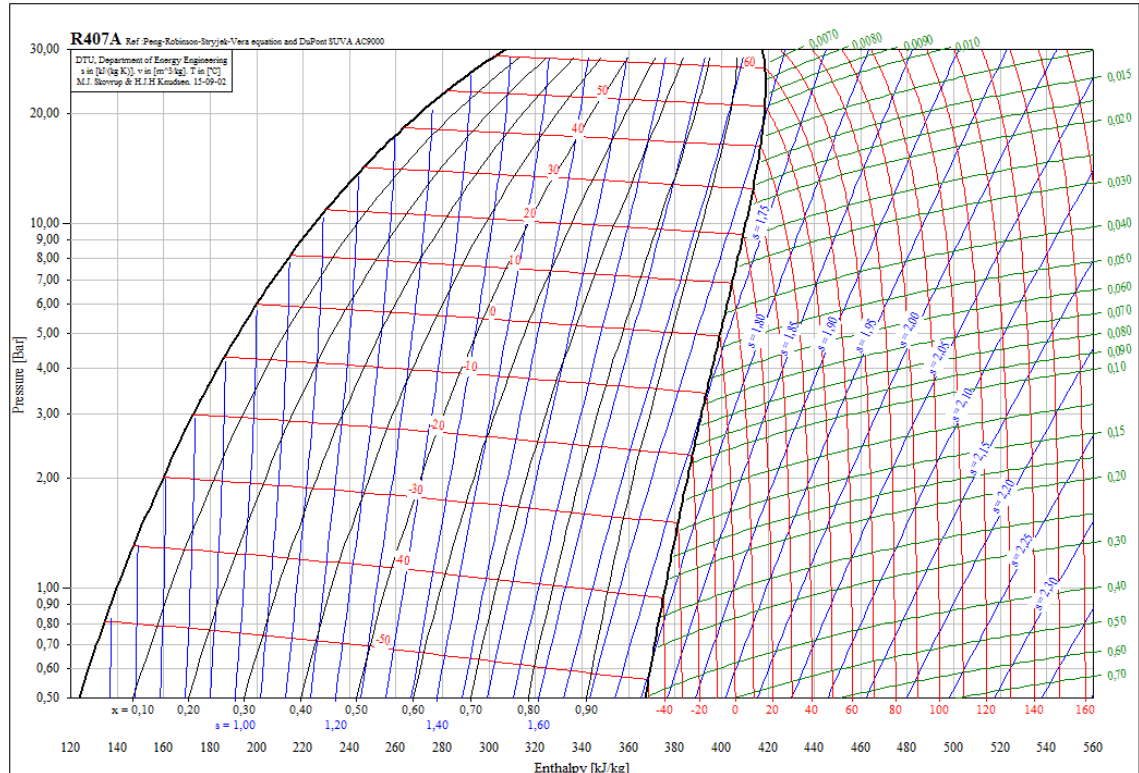
Kehitteillä olevien HFO-yhdisteiden kohdalla on kuitenkin vielä epävarmuutta turvallisuuden osalta. Kuten taulukosta 6 nähdään, ne ovat turvaluokitukseltaan vielä syttymisherkkiä.

3.3.1 R407A ja R407F

R407A ja R407F ovat samankaltaisia kylmäaineita. Ne ovat HFC-seoksia, jotka koostuvat R32-, R125- ja R134a-kylmäaineista. R407A koostuu suhteessa 20/40/40 ja R407F suhteessa 30/30/40. Molemmilla lämpötilaliukumat ovat noin 6 °C. Niiden käyttökohteita ovat:

- kaupan kylmä- ja pakastelaitokset,
- kylmä- ja pakastehuoneiden kylmäkoneistot ja
- varastojen kylmäkoneistot.

R407A ja R407F sopivat keski- ja matalalämpötila-alueille. Kuvassa 10 on esitetty R407A:n log(p),h-tilapiirros, joka on lähes samanlainen kuin R407F:llä.



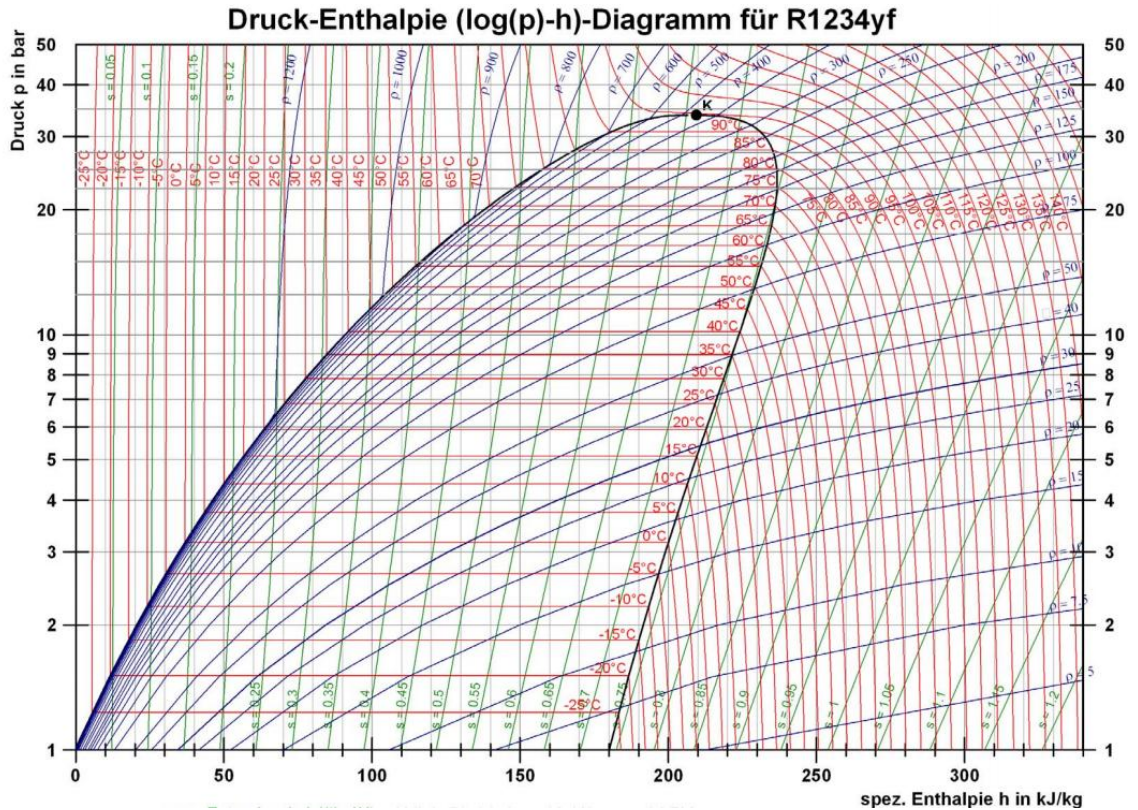
Kuva 10. R407A-kylmäaineen $\log(p),h$ -tilapiirros. [4]

R407A:lla ja R407F:llä voidaan korvata R404A-kylmäaine. Niiden GWP-arvot ovat noin puolet R404A:n GWP-arvosta. Kuten R407C, R407A- ja R407F-laitteistot vaativat toimiakseen synteettisen esteröljyn. [8, s. 113]

3.3.2 R1234yf ja R1234ze

R1234yf ja R1234ze ovat HFO-yhdisteitä, joiden tarkoituksena on korvata R134a-kylmäaine [27, s. 11]. Nämä yhdisteet on tunnettu jo yli 50 vuotta, mutta vasta nyt niiden ominaisuuksia on alettu tutkimaan syvemmin. [24] Tarkoituksena olisi saada nämä uudet kylmäaineet toimimaan vanhoissa laitteistoissa.

Yhdysvalloissa R1234yf on jo hyväksytty autojen ilmastoinnin kylmäaineeksi. Lisäksi sitä voidaan käyttää ilmastoinnin kylmäaineena. [6] R1234yf on turvallinen ympäristölle mutta vaarallinen ihmisille pienen syttymisherkkyytensä vuoksi. Lisäksi palaessaan R1234yf synnyttää vetyfluoridia, joka on vaarallista ihmisen terveydelle. [24] R1234yf:n kanssa voidaan käyttää PAG-öljyjä [6]. Kuvassa 11 on esitetty R1234yf-kylmäaineen $\log(p),h$ -tilapiirros.



Kuva 11. R1234yf-kylmäaineen $\log(p),h$ -tilapiirros. [13]

R1234ze:llä on kaksi eri isomeeriä, R1234ze(E) ja R1234ze(Z). R1234ze(Z):lla on korkea kiehumispiste (9,8 °C). R1234ze(Z):n kriittinen piste on 153,7 °C, mikä on selvästi korkeampi kuin R1234ze(E):llä (109,4 °C). Lisäksi R1234ze(Z):n tilavuustuotto on noin 50 % pienempi. Näiden ominaisuuksien vuoksi R1234ze(Z):n käyttökohteena voisivat olla korkean lämpötilan lämpöpumput, kun taas R1234ze(E):n käyttökohteet ovat enemmän linjassa R134a-kylmäaineen käyttökohteiden kanssa. [23] Taulukossa 7 on verrattu R1234ze(E):n arvoja R134a:han.

Taulukko 7. R1234ze(E)- ja R134a-kylmäaineen ominaisuuksia.[23]

| Ominaisuus | R1234ze(E) | R134a |
|------------------------------|------------|--------|
| Moolimassa (kg/mol) | 114 | 102 |
| Kiehumispiste 1 barissa (°C) | -18,95 | -26,06 |
| Kriittinen lämpötila (°C) | 109,4 | 101,1 |
| Kriittinen paine (bar) | 36,4 | 40,6 |

Höyrynpaineet ovat R1234ze(E):llä pienemmät kuin R134a:lla, mikä on yksi syistä, minkä vuoksi R1234ze(E) ei pysty suoraan korvaamaan R134a-kylmäainetta. Muutoksia laitteistoihin on siis tehtävä. [23] R1234ze(E):n kanssa voidaan käyttää POE-öljyjä [6].

4. MARKETIN KYLMÄKONEISTOT

Suomessa isommat marketit toteutetaan pääasiassa booster-koneistoilla, joissa hiilidioksidi kulkee kylmä- ja pakkaskalusteissa keskuskoneellisesti. [20] Pienemmissä marketeissa voi olla kuitenkin kustannustehokkaampaa toteuttaa jäähdytys omakoneellisilla kylmäkalusteilla, joista lauhdelämpö johdetaan ulos välillisesti liuospiirin avulla. On mahdollista, että pakastealtaat ovat plug-in -toimintaisia ja ne lauhtuvat sisäilmaan.

Kylmä- ja pakkaskalusteita on monta eri tyyppiä. Näitä ovat muun muassa:

- kylmäkaappi,
- pakastekaappi,
- kylmäallas,
- pakasteallas,
- rullakkohyllykkö,
- herätekaluste,
- heräteallas ja
- palvelulasikko.

Esimerkiksi kylmäkaapit voivat olla 3- tai 5- hyllyisiä ovilla tai ilman. Pienemmät laitteet kuten herätealtaat toimivat plug-in -periaatteella. Lisäksi on olennaista, mitä kalusteissa säilytetään. Esimerkiksi lihaa säilytetään 0-2 °C kun taas eineksiä ja juustoja 2-4 °C.

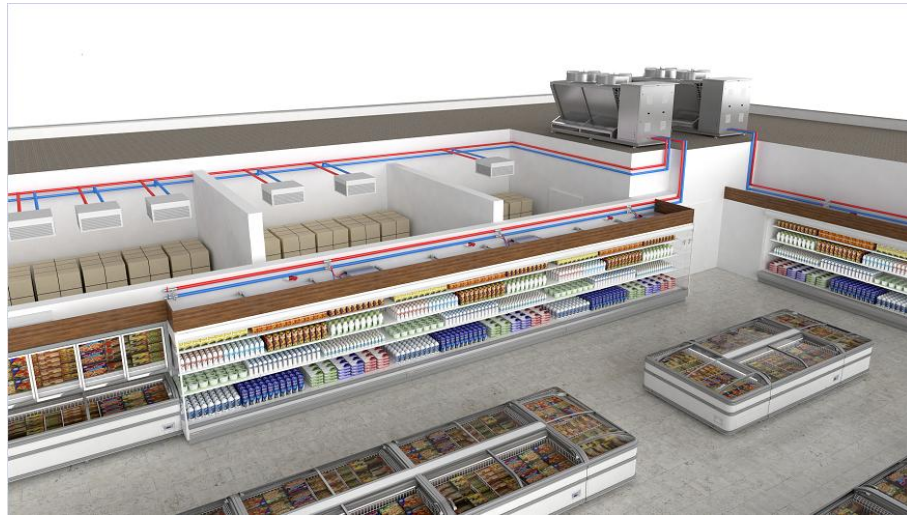
4.1 Välilliset omakoneelliset kylmäkalusteet

Omakoneellisilla kylmäkalusteilla tarkoitetaan kylmälaitteita, jotka sisältävät oman sisäisen kylmäainepiirin ja koneiston. Kylmäaine kiertää ainoastaan kylmälaiteessa, mikä mahdollistaa pienen kylmäainetäytöksen ja näin ollen myös palavien kylmäaineiden, kuten propanin käytön. Välillisessä jäähdytyksessä lämpö siirtyy lämmönsiirtimen kautta väliaineeseen ja sitten höyrystimen kautta kylmäaineeseen. Vastaavasti välillisessä lauhdutuksessa kylmäaineesta johdetaan lämpö lauhduttimen kautta väliaineeseen. [17, s. 51]

4.1.1 Toimintaperiaate

Marketin välillisissä omakoneellisissa kylmäkoneistoissa käytetään välillistä lauhdutusta. Höyrystys toteutetaan suorana, jolloin lämpö siirtyy kylmälaiteelta suoraan höyrystimen kautta kylmäaineeseen. Lauhdelämpö johdetaan liuospiirin avulla nestejäähdytti-

melle. Kuvassa 12 havainnollistetaan marketin välillisen omakoneellisen laitteiston lauhdelämmön poistoa.



Kuva 12. Marketin kylmäntuotto AHT:n välillisillä omakoneellisilla järjestelmillä [26]

Kuvassa 12 omakoneelliset kylmähyllyt on linkitetty vierekkäin ja rinnankytketty liuospiiriin. Kuvassa 12 näkyy myös hybrid-mallinen kylmähyllä, joka lauhtuu liuospiirin lisäksi myös puhaltimien avulla marketin sisäilmaan. Kylmäkalusteilla voidaan vaikuttaa hallitusti sisäilmasto-olosuhteisiin. Omakoneellisen kylmäkalusteen ei kuitenkaan tulisi lauhduttaa suoraan sisäilmaan, vaan lauhdutusenergian lämpö tulisi ohjata markettiin termostaatin avulla. [32]

4.1.2 Ohjaus

Omakoneellisten välillisten kylmäkalusteiden lauhtumislämpötilaa voidaan ohjata ulkolämpötilan mukaan. Liuospiirin pumpun pyörimisnopeutta säätämällä taataan liuokselle sopiva massavirta ja näin ollen kylmäkalusteille sopiva lauhdusteho. Pumput on sijoitettu ennen nestejäähdyttimiä. Liitteessä A on esitetty mahdollinen liuospiirin kytkentäkaavio.

Kolmitieventtiilillä taataan, että kylmäkalusteille tuleva liuos on sopivassa lämpötilassa. Sen tarkoituksena on päästää lämmintä liuosta nestejäähdyttimien ohi. Kolmitieventtiili on sijoitettu liuospiirissä nestejäähdyttimien jälkeen. Lämpötila-anturi mittaa kolmitieventtiilin jälkeistä nesteen lämpötilaa ja ohjaa venttiilin asentoa niin, että liuoksen lämpötila pysyy asetusarvossa.

Lisäksi on mahdollista, että kolmitieventtiilin jälkeen on myös hätälauhdutus, jonka tarkoituksena on säätää liuoksen lämpötilaa vikatilanteessa. Tällainen vikatilanne voi olla esimerkiksi nestejäähdyttimen puhaltimien rikkoutuminen. Hätälauhdutus toteutetaan kylmään käyttöveteen lämmönsiirtimen avulla. Lämpötila-anturi mittaa lämmönsiirtimen jälkeistä liuoksen lämpötilaa ja vikatilanteessa ohjaa kylmävesivirtaa lämmön-

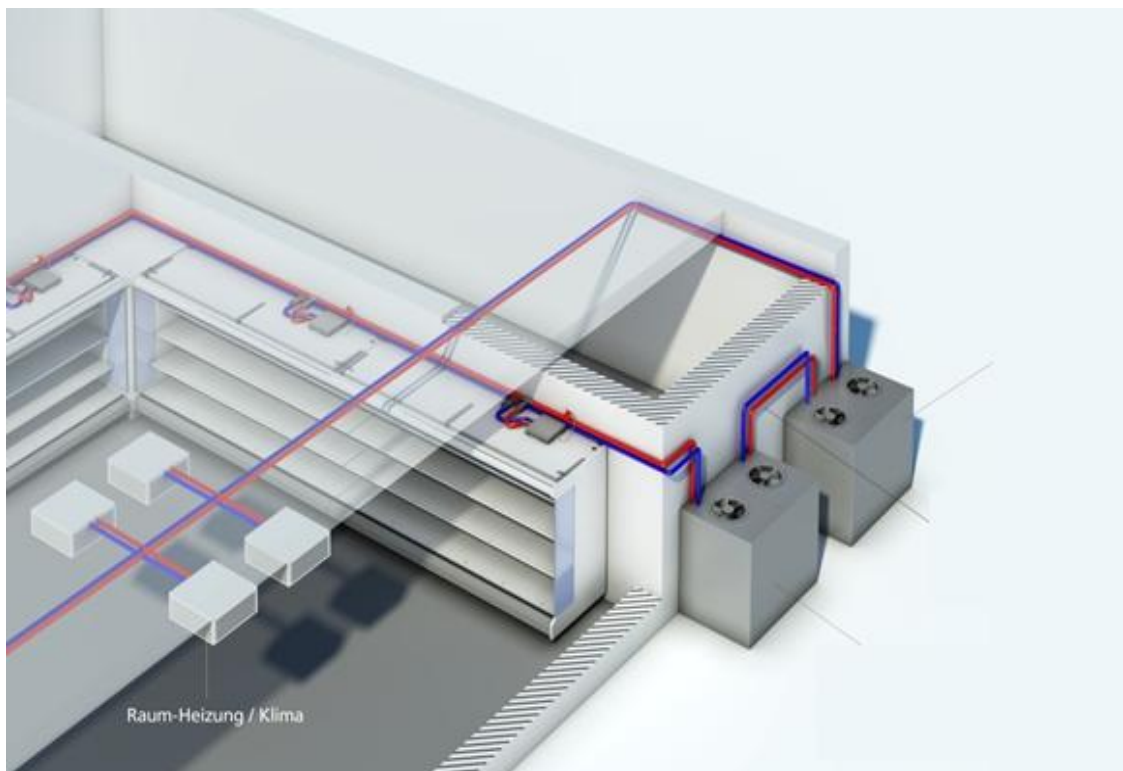
siirtimeen niin, että liuoksen lämpötila pysyy asetusarvossa. Lämmönsiirtimen jälkeen lämmennyt kylmävesivirta johdetaan viemäriin.

Kylmäkalusteet on kytketty rinnan liuospiiriin. Niille johdetaan oikeanlaiset liuosvirrat kertasäätö- ja mahdollisesti magneettiventtiilien avulla. Magneettiventtiileitä voidaan käyttää sen takia, että, jos yksi tai useampi kylmäkaluste on poissa käytöstä, ei muiden kylmäkalusteiden toiminta häiriinny.

Liuospiirin pumppujen ja nestejäähdyttimen puhaltimien pyörimisnopeutta voidaan ohjata taajuusmuuttajilla. Ohjaus riippuu kuitenkin systeemin toteutuksesta. Esimerkiksi nestejäähdyttimen puhaltimet voidaan lauhdutustarpeen mukaan ajaa ylös tai alas yksittellen taajuusmuuttajaohjauksen sijaan. Pumput voivat pyöriä vakionopeudella, jolloin liuoksen lämpötila riippuu nestejäähdyttimen tehosta ja kolmitieventtiiliohjauksesta. [20]

4.1.3 Lämmöntalteenotto

Kuvassa 12 lauhde-energia on johdettu suoraan katolla sijaitsevalle nestejäähdyttimelle, mutta ennen nestejäähdytintä liuospiiristä voidaan ottaa lämpöpumpulla tai suoraan lämmönsiirtimellä lämpöä talteen. Talteen otettu lämpö käytetään ensisijaisesti marketin lämmittämiseen. [32] Kuvassa 13 on esitetty esimerkki omakoneellisten välillisten kylmäkalusteiden lämmöntalteenoton hyödyntämisestä marketin sisäilman lämmityksessä puhallinkonvektoreilla.



Kuva 13. Talteenotetun lämmön hyödyntäminen puhallinkonvektoreilla. [26]

Pienen marketin energiankulutus on alhainen, minkä vuoksi lämmöntalteenotosta saata-va hyöty ei välttämättä kata lämmöntalteenottolaitteiston investointikustannuksia. [32]

4.1.4 Huolto

Huolto voidaan toteuttaa niin, että kalusteen toimittaja vie rikkoutuneen kalusteen pois ja toimittaa uuden tilalle. Pienissä marketeissa kalusteiden poistaminen rakennuksesta ei kuitenkaan välttämättä onnistu, koska sisäänkäynnit ovat liian ahtaita. Tämän vuoksi omakoneellisten kylmäkalusteiden huolto ja komponenttien vaihto tapahtuu useimmiten paikanpäällä osien rikkoutuessa. Komponentteihin pääsee esimerkiksi AHT:n kalusteissa käsiksi poistamalla laitteen takaseinä edestäpäin, jolloin komponentin huolto ja vaihto mahdollistuu.

Kaluste on luonnollisesti poissa käytöstä huollon ajan. Esimerkiksi on mahdollista, että kompressorin rikkoutuessa se täytyy vaihtaa tietyn ajan sisällä, jotta kylmäkaluste ei vaurioidu enempää. Tästä johtuen huolto voidaan joutua suorittamaan marketin au-kiolon aikana. Onkin tärkeää, että omakoneellisissa kylmäkalusteissa panostetaan siihen, että huolto ja vaihto voidaan suorittaa helposti ja nopeasti. [32]

4.1.5 Laittevaihtoehtoja

Omakoneellisia kylmä- ja pakkaskalusteita on markkinoilla paljon. Kuitenkin välillisiä ratkaisuja on paljon vähemmän. Omakoneellisia välillisiä kylmäkalusteita toimittavat muun muassa yritykset AHT, CoolFors, Epta ja Huurre. Kylmäaineina toimii vielä usein R134a ja R404A, joten GWP-arvoa katsottaessa hiilidioksiditoteutukset ovat ympäristöystävällisempiä.

Propaanilla toimivia omakoneellisia välillisiä kalusteita on kuitenkin jo markkinoilla ja niiden kehittäminen on tulevaisuudessa F-kaasusetuksen valossa kannattavaa. Esimerkiksi CoolForsin toteuttama Sale Pännäinen on Suomen ensimmäinen päivittäistavara-kauppa, joka toimii pelkästään R290-kylmäaineella eli propaanilla. Kohteen oli määrä valmistua vuoden 2015 loppupuolella. [10]

Kuvassa 14 on AHT:n R134a-kylmäaineella toimiva omakoneellinen Vento Hybrid -kylmähylykkömalli, joka on liitettävissä välilliseen järjestelmään.



Kuva 14. AHT:n toimittama Vento Hybrid -kylmähyllykkö. [7]

Vento Hybridissa on mahdollisuus lauhduttaa liuospiirin lisäksi myös marketin sisäilmaan. AHT:lta löytyy myös malli, jossa tätä mahdollisuutta ei ole. CoolFors puolestaan on lanseerannut CoolFlow-kylmäjärjestelmän, joka toimii omakoneellisilla välillisillä kylmäkalusteilla. Kuvassa 15 on CoolForsin toimittava Freor Jupiter Scroll -kylmähyllykkö.



Kuva 15. CoolForsin toimittama Freor Jupiter Scroll -kylmähyllykkö. [5]

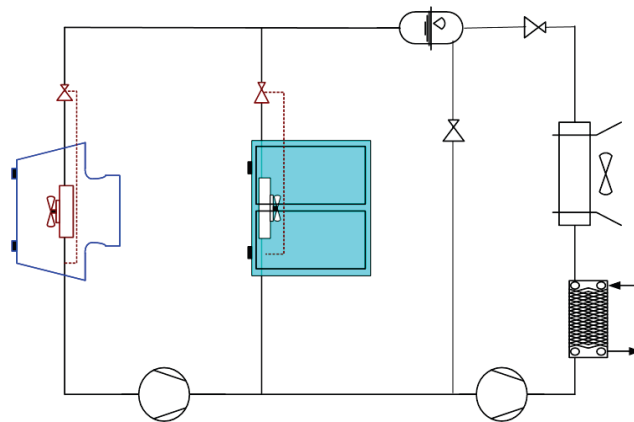
Freor Jupiter Scroll -kylmähyllykkö toimii Vento Hybridin tapaan R134a-kylmäaineella. CoolFors räätälöi kokonaisen järjestelmän tilaajan tarpeen mukaan ja liittää omakoneelliset kylmäkalusteet CoolFlow-järjestelmään.

4.2 Booster-koneisto

Booster-järjestelmän kylmäaineena toimii ainoastaan hiilidioksidi. Matalapaineosan kylmä- ja pakkaspuolella sekä korkeapaineosassa kulkee sama hiilidioksidi. Hiilidioksidi puristetaan kahdessa portaassa. Koneiston nimi tulee matalapaineekompressorista, jota kutsutaan booster-kompressoriksi. [8, s. 280] Booster-koneisto on suora järjestelmä eli siinä ei ole erillistä lämmönsiirrintä eri lämpötilatasojen välillä. Tämän vuoksi kylmäainemäärä ja putkistopituudet kasvavat, mikä ei kuitenkaan ole ongelma hiilidioksidin pienien painehäviöiden vuoksi. Hiilidioksidi on luonnollinen kylmäaine, joten ympäristövaatimukset täyttyvät.

4.2.1 Toimintaperiaate

Booster-koneistossa kaasunjäähdyttimestä tuleva kaasu kuristetaan säiliöön, jossa vallitsee välipaine. Kuristuksessa muodostuu kaasua, joka ohjataan korkeapaineekompressorin imuun. Ainoastaan neste johdetaan välisäiliöstä kylmä- ja pakkaskalusteiden höyrystimille. Kuvassa 16 on esitetty yksinkertainen booster-kytkentä. Kylmä- ja pakkaspuoli toimivat yhden säätöjärjestelmän alla, mikä vähentää investointikustannuksia verrattuna erillisjärjestelmiin. [8, s. 281]



Kuva 16. Yksinkertainen booster-kytkentä kaasun väliotolla. [22, s. 9]

Korkealämpötilaosa voi toimia alikriittisenä tai transkriittisenä, mistä riippuu onko koneistossa toiminnallisesti lauhdutin vai kaasunjäähdytin. Transkriittisessä tilanteessa kaasunjäähdyttimen ja välisäiliön paineella on optimiarvot. Kaasunjäähdyttimen painetta säädetään sen ja välisäiliön välissä sijaitsevalla paisuntaventtiilillä. Välisäiliön paine säädetään matalalämpötilaosan ohittavaan putkeen sijoitetulla paisuntaventtiilillä. Alikriittisen prosessin kylmäkerroin on parempi kuin transkriittisen, joten kaasunjäähdyttimen paine pyritään saamaan mahdollisimman pieneksi. [8, s. 281]

Kuvan 16 kytkennässä pakkaspuolen höyrystimen jälkeinen hiilidioksidi puristetaan matalalämpötilaosan kompressorilla eli booster-kompressorilla kylmäpuolen höyrysti-

mien vaatimalle paine- ja lämpötilatasolle. Korkeapainekompressoria ennen booster-kompressorilta ja kylmäpuolen höyrystimiltä tulevat hiilidioksidivirrat yhdistyvät. Virtojen yhdistymisen jälkeen korkeapainekompressori puristaa hiilidioksidin lauhduttimen tai kaasunjäähdyttimen vaatimalle painetasolle. Lauhduttimen tai kaasunjäähdyttimen jälkeen paisuntaventtiilit alentavat hiilidioksidin paineen koneiston laitteiden vaatimalle lämpötilatasolle. Transkriittisessä tilanteessa kaasunjäähdyttimen jälkeisessä kuristuksessa syntyy paisuntahöyryä, jolloin välisäiliössä hiilidioksidi on kahdessa faasissa. Hiilidioksidikaasu ohjataan välisäiliöstä paisuntaventtiilin kautta korkeapainekompressorin imupuolelle. Välisäiliön neste jaetaan sen alaosaan kylmä- ja pakkaspuolen kalusteille [8, s. 82]

4.2.2 Lämmöntalteenotto

Booster-koneistossa voidaan ottaa talteen lauhtumislämpö ja tulistuslämpö. Lämmöntalteenoton kohdalla hiilidioksidijärjestelmille on erityistä, että höyry on korkealla lämpötilatasolla ja alikriittisessä prosessissa tulistuksella on suuri osuus. [8, s. 212] Ne voidaan ottaa talteen samanaikaisesti. Lämmöntalteenotto voidaan toteuttaa kaasunjäähdyttimeltä tai lauhduttimelta suoraan tai välillisesti. Lämpö voidaan ohjata suoraan esimerkiksi vesikiertoiseen lämmitysjärjestelmään tai välillisesti liuospiiriin. Suoraa lämmöntalteenottoa ei kuitenkaan saa soveltaa käyttöveden lämmitykseen turvallisuussyistä [17, s. 218]. Välillisen lämmöntalteenoton haittapuolena on ylimääräisen lämmönsiirtimen tarve.

Booster-toteutuksella on etuja lämmöntalteenotossa verrattuna omakoneelliseen toteutukseen. Lämpö otetaan talteen kylmäainepiiristä eikä välillisestä lauhdutuspiiristä, kuten omakoneellisessa toteutuksessa. Välilliset toteutukset heikentävät lämmön hyödynnettävyyttä ylimääräisien lämpötilaerojen vuoksi. Lisäksi tulistuksen lämpöä ei saada talteen, jos kylmäntuotto toteutetaan omakoneellisilla kalusteilla. Kuvan 16 järjestelmässä on kytkennän osana tulistuslämmönsiirrin.

Lauhtumislämpötilaa voidaan nostaa, jotta lauhtumislämpöä voitaisiin hyödyntää paremmin lämmöntalteenotossa. Kaasunjäähdyttimen paineen nostolla on kuitenkin suuri vaikutus kylmäkertoimeen. Kylmäkerroin heikkenee suuresti paineen kasvaessa. Kylmälaitoksen tärkein tehtävä on jäähdyttäminen, eikä se saa häiriintyä lauhtumislämpötilan nostamisesta. Varsinkaan kesäaikana ei ole järkevää nostaa lauhtumislämpötilaa tarpeettomasti. Lisäksi myös talviaikana kannattavuus on tarkistettava. [8, s. 210]

4.2.3 Ohjaus

Booster-koneistossa käytetään kelluvaa lauhtumislämpötilaa, mikä tarkoittaa sitä, että lauhtumislämpötila muuttuu ulkolämpötilan mukaan. Lauhtumislämpötila pyritään pitämään mahdollisimman alhaisena, jotta kylmäkerroin olisi mahdollisimman hyvä. Booster-koneistossa minimilauhtumislämpötila on yleensä 10 °C. On myös mahdollista

käyttää kelluvaa höyrystyslämpötilaa, milloin ohjausautomaatti hakee koneiston imupaineeksi höyrystyslämpötilan, joka juuri riittää kalusteen toimintaan. [17, s. 252]

Jos booster-koneistoa ajetaan kylmän ehdoin, voidaan lauhtumislämpötila asettaa niin, että lauhtumislämpötila on minimissään 10 °C. Ulkolämpötilan ylittäessä 6 °C, lauhtumislämpötila määräytyy yksinkertaisesti kaavalla:

$$T_l = T_u + 4 \text{ °C}, \quad (2)$$

jossa T_l on lauhtumislämpötila ja T_u ulkolämpötila. [20] Hiilidioksidille 4 astetta ulkolämpötilaa suurempi lauhtumislämpötila on sopiva. Tällöin kuvasta 7 nähdään, että booster-koneisto toimii alikriittisellä alueella. Talvikuukausina, jolloin lämmöntarve on suurimmillaan, tulistustehosta ei saada otettua talteen paljoa lämpöä mutta prosessin kylmäkerroin on mahdollisimman suuri.

Jos kuitenkin halutaan, että lämmityskaudella saataisiin enemmän lämpöä talteen, voidaan lauhtumislämpötilaa nostaa niin, että koneisto toimii transkriittisellä alueella. Tällöin lauhtumislämpötilalle voidaan asettaa maksimitaso, mikä voi olla esimerkiksi 32 °C, jolloin kuvasta 7 nähdään, että paine kaasunjäähdyttimellä on tällöin noin 75 baria. Lämmityskaudella lauhtumislämpötila pidetään tällä maksimitasolla, jolloin tulislämmönsiirtimellä saadaan alikriittiseen toimintaan verrattuna huomattavasti enemmän lämpöä kiinteistön lämmitykseen. Kompressorin nostaessa paineen korkeammalle tasolle prosessin kylmäkerroin on huonompi, joten kannattavuustarkastelun suorittaminen on tarpeellista. Lämmityskauden ulkopuolella lämmöntalteenotolle ei ole yhtä suurta tarvetta, joten lauhtumislämpötila noudattaa kaavaa (2). Koska hiilidioksidi on ulkolämpötilasta riippumatta pakotettu korkealle lämpötilatasolle, on se syytä alijäähdyttää kalusteiden toiminnan kannalta katsottuna. Kaasunjäähdyttimen jälkeinen hiilidioksidin lämpötila laskee 10 °C lämpötilaan, mikä on lauhtumislämpötilan minimiarvo. [20]

4.2.4 Huolto

Booster-koneiston huollossa ei ole suuria eroja verrattuna muihin keskuskoneellisiin järjestelmiin. Huollossa on noudatettava hyvää toteutustapaa. Vuosihuollon tarkoituksena on tehdä perusteellinen jäähdytyslaitoksen tarkastus, huolto ja koekäyttö. Vuosihuollon lisäksi tehdään erillisiä määräaikaishuoltoja ja varolaitteiden tarkastuksia.

Tarkistettavia komponentteja ovat kompressorit, kompressorien varolaitteet, lauhduttimet tai kaasunjäähdyttimet, höyrystimet, sulatuslaitteet sekä putkisto ja putkistovarus- teet. Huollossa tarkistetaan muun muassa seuraavanlaisia asioita. Kompressorin toiminta tarkastetaan aistinvaraisesti. Laakerien tai männän pitämä voimakas ääni on merkki siitä, että kompressorit tulee korjata tai vaihtaa. Lauhdutin on tarkastuksen yhteydessä myös tarvittaessa puhdistettava. Kylmäkalusteiden puhaltimien, reunalämmitysvastus-

ten ja sulatusvesijärjestelmien toiminta tarkastetaan. Tarkastukseen kuuluu myös lukuisia muita kohtia. [21, s. 186-188]

Useimmat vikojen aiheuttamat käyttökatkokset voidaan välttää perusteellisilla vuosi-
huolloilla ja käytön seurannalla. Todellinen hyöty saadaan, kun perusteellinen vuosi-
huolto suoritetaan keväällä ja sen lisäksi ennen talven tuloa tehdään erillinen huolto-
käynti. Tarkastuskäyntejä voidaan laitteistosta riippuen tehdä useampia. [21, s. 189]

5. ENERGIALASKENTAOHJELMA

Tarkoituksena on luoda omakoneelliselle välilliselle kalusteratkaisulle excel-ohjelmalla energialaskentaohjelma, jolla voidaan arvioida vuosittaista energiankulutusta. Energialaskentaohjelman tuloksia vertaillaan booster-laitteiston energialaskentaohjelmaan. Ohjelmien alkutiedot ja oletuskertoimet määritellään samoiksi, jotta tulokset olisivat mahdollisimman vertailukelpoisia.

Energialaskentaohjelma laskee vain energiankulutusta eikä ota kantaa muihin kustannuksiin kuten esimerkiksi investointikustannuksiin. Laskenta tehdään tuntiperusteisesti koko vuodelle. Apuna käytetään Danfossin ja Bitzerin valintaohjelmia. Energialaskenta tehdään mitoitusohjelmien avulla kahdelle eri kylmäpuolen kylmäaineelle ja yhdelle pakkaspuolen kylmäaineelle laitevalmistajien antamien tietojen mukaan, mutta energialaskentaohjelma voi laskea tulokset myös useammalle kylmäaineelle. Laskelmiin on yhdistetty lämmöntalteenotto, mutta koska talteenotetun lämmön käyttötapoihin ei oteta tarkemmin kantaa, tulokset näyttävät vain lämmöntalteenoton potentiaalin.

5.1 Alkutiedot

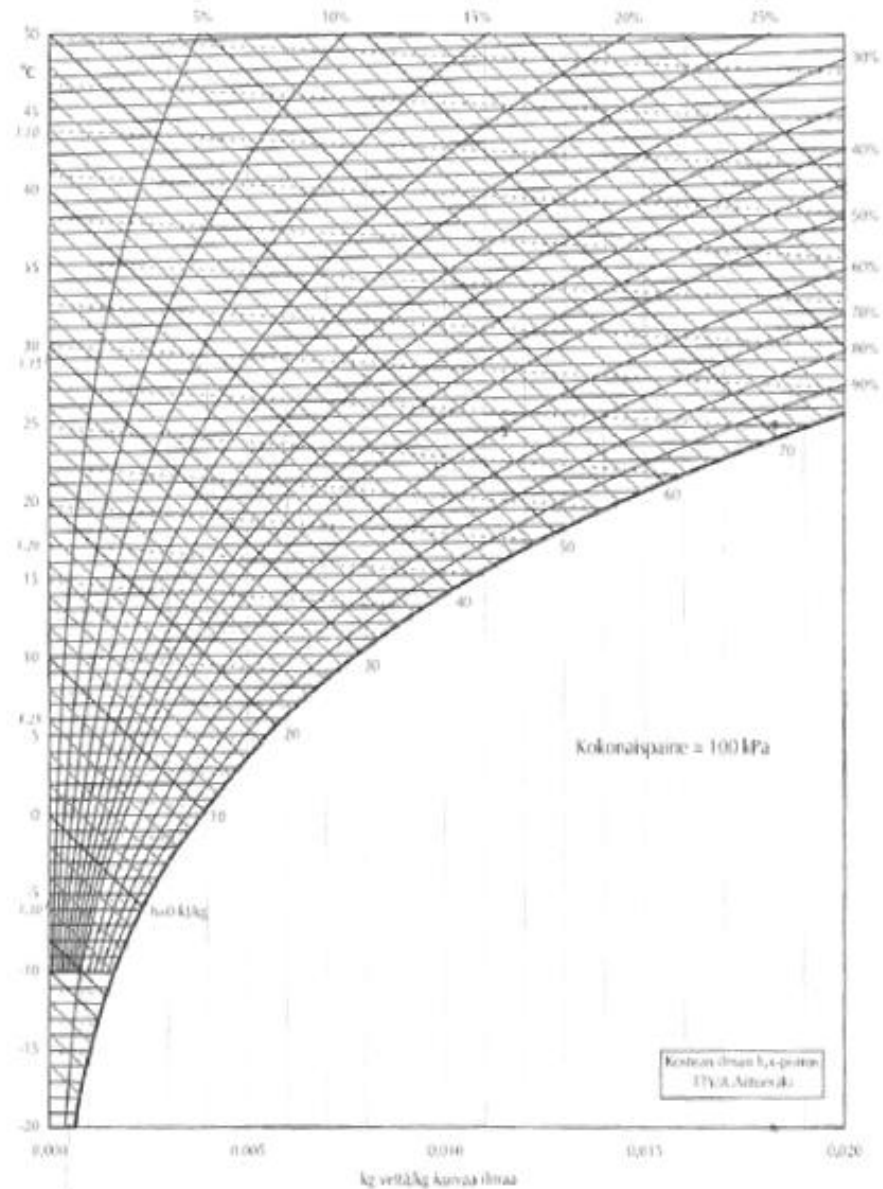
Energialaskentaohjelmassa oletetaan, että lämmityskaudella marketin sisätiloissa pidetään 18 °C lämpötilaa ja lämmityskauden ulkopuolella sisälämpötila on 20 °C. Lämmityskauden ulkopuolisiin kuukausiin kuuluvat kuukaudet toukokuusta syyskuuhun. Alkutietoihin on merkitty tuntikohtaisesti marketin sisälämpötilat.

Alkutiedoissa määritellään tuntikohtaiset ulkolämpötilat koko vuodelle. Ulkolämpötilat ovat keskimääräiset arvot Jyväskylässä. Ulkolämpötilat vaihtelevat -35 °C ja 27,8 °C välillä. Lisäksi tuntikohtaisesti on merkitty ulkolämpötilojen rinnalle ulkoilman keskimääräiset absoluuttiset kosteudet. Ulkoilman absoluuttisen kosteuden maksimi on kuitenkin rajattu arvoon 10 g/kg, jotta mitoitusta saadaan optimoitua.

Kun nollapisteeksi valitaan 0 °C ja vesi on nesteenä, kostean sisäilman entalpiat saadaan sisäilman lämpötilan ja ulkoilman absoluuttisen kosteuden avulla kaavalla:

$$h = c_i T_s + x c_h T_s + x I_{h0}, \quad (3)$$

jossa c_i ilman ominaislämpö vakiopaineessa (1,01 kJ/kgK), T_s sisäilman lämpötila, x ulkoilman absoluuttinen kosteus, c_h vesihöyryn ominaislämpö vakiopaineessa (1,85 J/kgK) ja I_{h0} veden höyrystymislämpö 0 °C:ssa (2501 kJ/kg). [8, s. 27] Kuvassa 17 on esitetty Mollier-diagrammi eli niin sanottu h,x-piirros.



Kuva 17. Mollier-diagrammi. [8, s. 30]

Kuvan 17 Mollier-diagrammin avulla voidaan arvioida kylmä- ja pakkaskalusteiden sisäisen ilman entalpiaero verrattuna marketin sisäilmaan. Kylmäkalusteiden sisälämpötila on noin $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja pakkaskalusteiden sisälämpötila noin $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Koska kylmä- ja pakkaskalusteiden sisällä kostea ilma on sisäilman jäähtymisen takia kylläistä, saadaan Mollier-diagrammin mukaan kylmäkalusteiden sisäisen ilman entalpiaksi (h_k) noin 0 kJ/kg ja pakkaskalusteiden sisäisen ilman entalpiaksi (h_p) noin -20 kJ/kg . Näin ollen kylmäkalusteiden sisäilman entalpiaero saadaan vähentämällä kaavan (3) tuntikohtaisista tuloksista h_k -arvo ja vastaavasti pakkaskalusteiden kohdalla vähentämällä h_p -arvo.

5.2 COP-sovitteet

Kylmä- ja pakkaskalusteiden COP-arvot seuraavat lauhtumislämpötilaa. Kun höyrystymislämpötiloiksi valitaan kylmäkalusteille vakio -8 °C ja pakkaskalusteille -30 °C , saadaan Danfossin ja Bitzerin valintaohjelmien avulla muodostettua sovitteet COP-arvoille. Eri kylmäaineilla on omat COP-sovitteensa. Kuvassa 18 on esitetty kompressorin mitoitusperusteita Danfossin Coolselector2-mitoitusohjelmalla.

Kuva 18. Kompressorin mitoitusperiaatteita. [1]

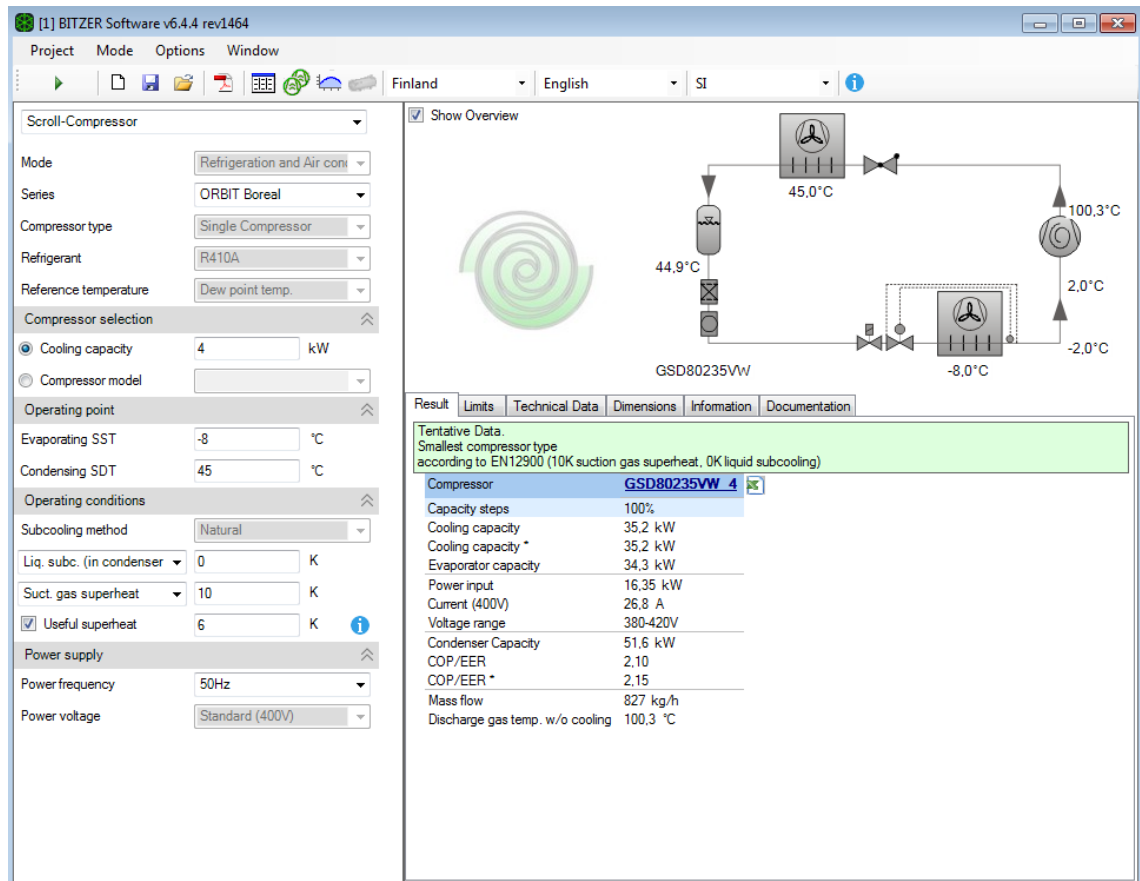
Kuvasta 18 nähdään, että kompressorin mitoitusstilanteessa kylmäkalusteen jäähdytystehon tarve on 4 kW. Tulistus on 10 K, josta 6 K on hyödyllistä. Lauhtumislämpötila on 45 °C . Alijäähdytystä ei mitoituksessa ole. Kuvassa 19 on esitetty tulokset kuvan 18 mitoitusstilanteessa R134a-kylmäaineella.

Selection: MLZ030T4, R134a

| Sel | Model | Technology | Configuration | Refrigerant | Capacity control | Speed [rpm] | Cooling | COP cooling | Heating | COP heating | Power | Current | Frequency | Power supply | Mass | Match |
|----------------------------------|----------|---------------|---------------|-------------|------------------|-------------|---------|-------------|---------|-------------|-------|---------|-----------|---------------|------|-------|
| <input type="radio"/> | MTZ056-6 | Reciprocating | Single | R134a | Fixed speed | 2900 | 3,896 | 1,84 | 6,109 | 2,89 | 2,112 | 9,985 | 50 | 230 V 3 ph | 104 | 97% |
| <input type="radio"/> | MTZ056-7 | Reciprocating | Single | R134a | Fixed speed | 2900 | 3,896 | 1,84 | 6,109 | 2,89 | 2,112 | 4,593 | 50 | 500 V 3 ph* | 104 | 97% |
| <input checked="" type="radio"/> | VTZ054-G | Reciprocating | Single | R134a | Variable speed | 4876 | 4,000 | 1,88 | 6,231 | 2,93 | 2,128 | 4,447 | 81 | 380 - 400 V | 107 | 100% |
| <input checked="" type="radio"/> | MLZ030T4 | Scroll | Single | R134a | Fixed speed | 2900 | 4,307 | 2,22 | 6,357 | 3,28 | 1,939 | 4,422 | 50 | 380 - 400 V | 115 | 108% |
| <input type="radio"/> | MLZ030T2 | Scroll | Single | R134a | Fixed speed | 2900 | 4,307 | 2,22 | 6,357 | 3,28 | 1,939 | 7,462 | 50 | 200 - 220 V 3 | 115 | 108% |

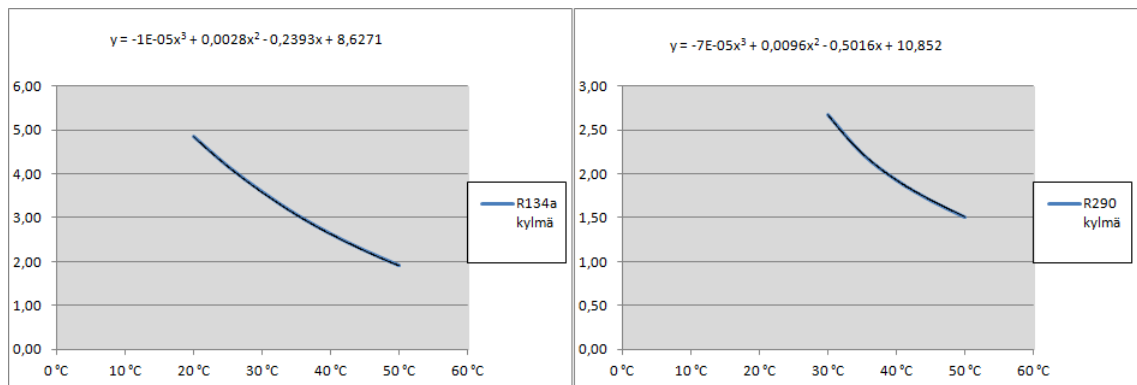
Kuva 19. Kompressorijon tulokset, Danfoss Coolselector2 [1]

Tuloksista valitaan kompressori, jolla on paras jäähdytyksen COP-arvo mitoitusstilanteessa. Kompressorin valinnan jälkeen muutetaan kuvassa 18 esitettyä lauhtumislämpötilaa, jolloin höyrystymislämpötilan ja muiden arvojen pysyessä vakioina COP-arvo muuttuu lauhtumislämpötilan funktiona luoden COP-sovitteen. Koska Danfossin valintaohjelma ei pidä sisällään kaikkia kylmäaineita, on käytettävä apuna myös Bitzerin valintaohjelmaa. Kuvassa 20 on esitetty kompressorin valinta Bitzerin valintaohjelmalla R410A-kylmäaineella.



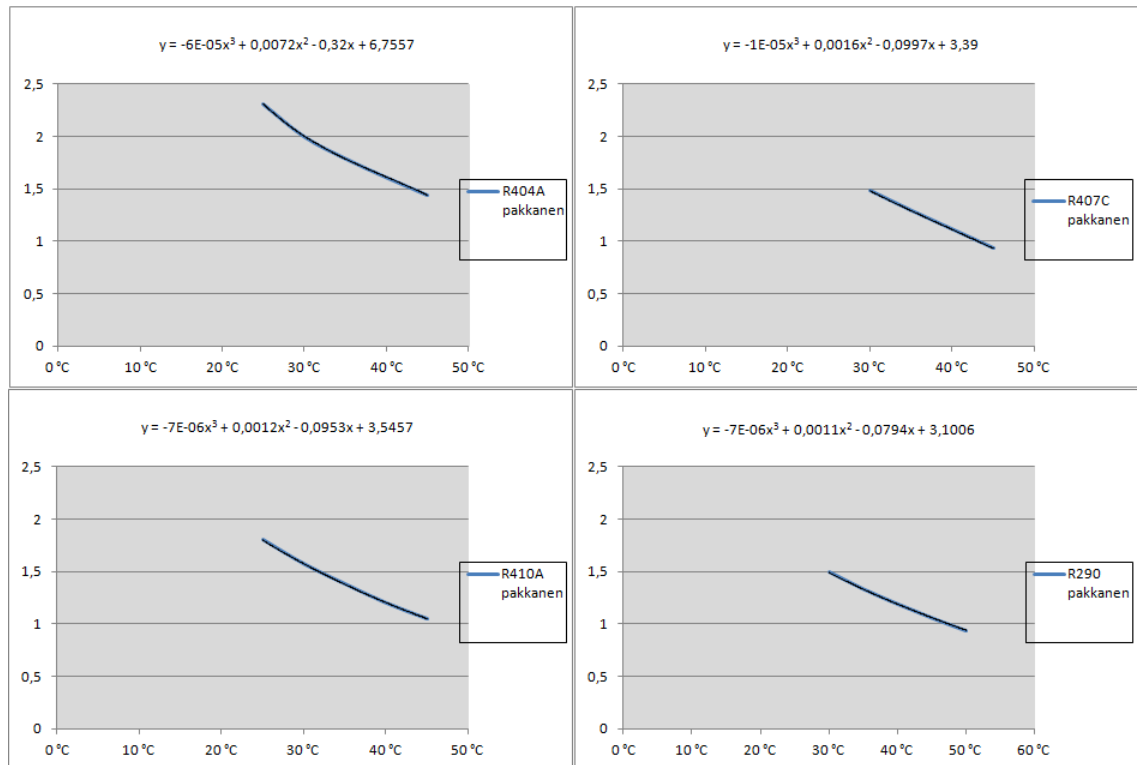
Kuva 20. Kompessorin valinta, Bitzer Software. [2]

COP-sovitteen luonti Bitzerin valintaohjelman avulla tapahtuu samaan tapaan kuin Danfossin valintaohjelmalla. Koska COP-sovitteet voidaan luoda tällä tavalla vain laitevalmistajien käyttämille kylmäaineille, uudempien kylmäaineiden kohdalla joudutaan odottamaan valintaohjelmien ohjelmistopäivityksiä. Laitevalmistajilta tulevat myös kompressorityypit, minkä vuoksi COP-sovitteiden määrittämisessä on käytetty mahdollisuuksien mukaan kierukka- eli scroll-kompressoreita. Valintaohjelmien avulla saadaan kylmäkalusteille kuvan 21 mukaiset COP-sovitteet.



Kuva 21. Kylmäkalusteiden COP-sovitteet.

Kylmäpuolen kylmäaineina ovat R134a ja R290 eli propaani. Pakkaspuolelle on vaikea löytää uusia toimivia kylmäaineita. Ongelmana on esimerkiksi se, että matalissa lämpötiloissa kylmäaineen paine voi mennä alle ilmanpaineen, mikä tarkoittaa sitä, että vuodon sattuessa kylmälaitteisto imee ilmaa sisäänsä. Kuvassa 22 on esitetty pakkaspuolen kylmäaineiden COP-sovitteet.



Kuva 22. Pakkaskalusteiden COP-sovitteet.

Pakkaskalusteiden kylmäaineina ovat R404A, R407C, R290 ja R410A. Kuvien 21 ja 22 x-akselilla on lauhtumislämpötila ja y-akselilla COP-arvo.

5.3 Kylmä- ja pakkaskalusteet

Energialaskentaohjelmaan voidaan syöttää erilaisten kylmä- ja pakkaskalusteiden pituudet, joiden avulla vaadittava jäähdytystehontarve määrittyy. Kuvassa 23 on esitetty esimerkki energialaskentaohjelman pakkaskalusteiden jäähdytystehon määrittämisestä.

| Muokkaa | Kylmäkaluste | Tuote | Jäähdytystehon tarve (kW/m) | | Määrä oveton (m) | Määrä ovellinen (m) | Oveton Jtehon tarve (kW) | Ovellinen Jtehon tarve (kW) | Yhteensä Jtehon tarve (kW) |
|---------|--------------------------|-------|-----------------------------|------------------|------------------|---------------------|--------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| | | | Oveton | Ovellinen | | | | | |
| | Pakasteallas | | 0,70 | 0,55 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | Pakasteallas,päätty | | 0,50 | 0,40 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | Pakastekombikaluste | | 1,20 | 1,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | Pakasteakaappi | | | 0,60 | | 3,12 | 0,00 | 1,87 | 1,87 |
| | Pakasteakaappi,seläkkäin | | | 0,90 | | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | | | | Yhteensä: | 0,00 | 3,12 | 0,00 | 1,87 | 1,87 kW |

Kuva 23. Pakkaskalusteiden jäähdytystehontarpeen laskenta.

Kylmäkalusteille laskenta tapahtuu vastaavanlaisesti, mutta jäähdytettävät tuotteet vaikuttavat jäähdytystehon tarpeeseen pituusyksikköä kohti. Metrimääräiset jäähdytystehontarpeet pituusyksikköä kohti on annettu taulukossa 8.

Taulukko 8. Kylmä- ja pakkaskalusteiden ominaisuuksia. [17, s. 50]

| Kalustetyyppi | Tuote | Lämpötila | Jäähdytystehontarve | | Valot, puhallimet, reunavastukset kW/m | Sulatusvastukset kW/m |
|---------------------|--------------------|-----------|---------------------|-----------------------------|--|-----------------------|
| | | | kW/m -10 °C | kW/m -10 °C ovet tai kannet | | |
| Palvelulasikko | | +2-4 °C | 0,35 | | 0,1 | 0,5 |
| 2-taso, 3-taso | Liha | +0-2 °C | 1,0-1,3 | | 0,15 | 0,4 |
| 2-taso, 3-taso | Eines, juusto | +2-4 °C | 0,8-1,0 | | 0,15 | 0,4 |
| Monitoimihylly | Lihajaloste | +0-2 °C | 1,8-2,0 | 1,2 | 0,2 | 0,4 |
| Monitoimihylly | Eines, juusto | +2-4 °C | 1,8 | 1,1 | 0,2 | 0,4 |
| Monitoimihylly | Hevi | +6-8 °C | 1,2 | 0,7 | 0,2 | |
| Konttikaluste | Maitotuotteet | +4-6 °C | 1,6 | | 0,2 | 0,4 |
| Konttikaluste | Maito, takaa täyt. | +4-6 °C | 1,8-2,0 | | 0,2 | 0,4 |
| Konttikaluste | Hevi | +6-10 °C | 1,4 | | 0,2 | |
| Konttikaluste | Juoma | +8-10 °C | 1,2 | | 0,2 | |
| Kylmäallas | Leveys 1900mm | +2-4 °C | 0,6 | 0,4 | 0,1 | 0,8 |
| Kylmäallas | Leveys 1500mm | +2-4 °C | 0,5 | 0,3 | 0,1 | 0,7 |
| Kylmäallas | Leveys 1100mm | +2-4 °C | 0,4 | 0,25 | 0,1 | 0,4 |
| Pakasteallas | Leveys 1900mm | -21-23 °C | 1,0 | 0,7 | 0,1 | 2,0 |
| Pakasteallas | Leveys 1500mm | -21-23 °C | 0,8 | 0,6 | 0,1 | 2,0 |
| Pakasteallas | Leveys 1100mm | -21-23 °C | 0,5 | 0,4 | 0,1 | 1,1 |
| Pakastekombikaluste | Kaappi ja allas | -21-23 °C | 1,2 | 1,0 | 0,6 | 1,7 |
| Pakastekaappi | | -21-23 °C | | 0,9 | 0,5 | 1,0 |

Taulukon 8 tiedot toimivat alustavina tietoina ja niitä on osiksi muokattu kokemuseräisen tiedon mukaan. Jäähdytystehon tarpeet pituusyksikköä kohti voivat olla pienempiä kuin taulukossa 8 esitetään. Koska vertailu kuitenkin tehdään tässä diplomityössä kuvitteelliselle marketille, eivät kalusteiden lukumäärät ja pituudet ole tällöin olennaisia. Ainoastaan jäähdytystehontarve määrää energiankulutuksen. Tämän vuoksi kylmä- ja pakkaskalusteille määritellään erikseen arviolta sopivat jäähdytystehon tarpeet ja tehdään vertailu niiden perusteella. Kylmäkalusteiden jäähdytystehoksi arvioidaan 30 kW ja pakkaskalusteiden jäähdytystehoksi 5 kW.

Koska sisäilma on lämpötilaltaan noin 20 °C, on kuvan 17 Mollier-diagrammin mukaan kostean ja kylläisen sisäilman entalpia noin 50 kJ/kg. Tällöin tunnitainen kylmä- ja pakkaskalusteiden jäähdytystehon tarve voidaan laskea edellä mainitun mitoitusilan-

teen entalpiain ja kalusteen sisäilman entalpiain avulla. Lisäksi yöaikainen lasku jäädytystehon tarpeessa on otettu huomioon käyttökertoimella. Käyttökertoimen on arvioitu olevan 0,7 kaupan aukioloaikojen ulkopuolella eli ilta kymmenestä aamu kahdeksaan. Muina aikoina käyttökerroin on 1. Tunnittainen kalusteen jäädytystehon tarve voidaan laskea kylmäkalusteelle kaavalla:

$$Q_j = Q_{jmk} k \frac{h_s - h_k}{\Delta h_k}, \quad (4)$$

jossa Q_{jmk} on kaikkien kylmäkalusteiden mitoitusjäädytystehon tarve yhteensä, k käyttökerroin, h_k kylmäkalusteen sisäilman entalpia (0 kJ/kg), h_s marketin sisäilman entalpia ja Δh_k kylmäkalusteen sisäilman entalpiain ja mitoitusilanteen entalpiain ero (50 kJ/kg – 0 kJ/kg = 50 kJ/kg). Marketin sisäilman entalpia voidaan laskea kaavalla (3). Pakkaskalusteille laskenta tapahtuu vastaavasti mutta kylmäkalusteiden mitoitusjäädytystehon tarpeen sijasta käytetään pakkaskalusteiden vastaavaa arvoa (Q_{jmp}) ja koska h_p :n arvo on -20 kJ/kg, saadaan entalpiaeroksi (Δh_p) 70 kJ/kg.

Kylmä- ja pakkaskalusteilla on jäädyttävä vaikutus sisäilmaan. Jäädyttävä vaikutus riippuu oleellisesti kalusteiden ovituksesta ja yöverhouksesta. Kuvassa 24 on esitetty esimerkki siitä, kuinka energialaskentaohjelma laskee kuvassa 23 esitetyn ohjelman osan avulla kylmäkalusteiden ovituksen osuuden.

Kylmäkalusteiden ovitus

| | |
|-----------------------|-------|
| Ovellisten osuus (%): | 0,0 |
| Osuus: | 0,100 |
| Kerroin oveton: | 0,3 |
| Kerroin ovellinen: | 0,2 |

Kuva 24. Kylmäkalusteiden ovituksen osuuden laskenta.

Kuvassa 24 mainittu ovellisten osuus on laskettu osuutena jäädytystehon tarpeesta. Kertoimilla arvioidaan, kuinka suuri osa kaavan (4) tunnittaisesta jäädytystehon tarpeesta on marketin sisäilman jäädytystä. Kaupan aukioloaikojen ulkopuolella ovettomissa kalusteissa on yleensä yöverhous, jolloin kaikkien kalusteiden kerroin on 0,2. Kaupan ollessa auki voidaan kylmäkalusteiden tunnittainen jäädyttävä vaikutus laskea kaavalla:

$$Q_{jv} = x_o k_o Q_j + (1 - x_o) k_{ot} Q_j, \quad (5)$$

jossa x_o on kuvassa 24 esitetty osuus, k_o ovellisten kerroin, Q_j tunnittainen kylmäkalusteiden jäädytystehon tarve ja k_{ot} ovettomien kerroin. Pakkaskalusteilla laskenta toimii vastaavasti, mutta pakkaskalusteet ovat useimmiten kaikki ovitettuja varsinkin pienemmän kokoluokan marketeissa, joten niiden kohdalla laskenta toimii useimmiten kokonaan kertoimella 0,2.

Kalusteiden lauhtumislämpötila on kelluva ja seuraa ulkolämpötilaa. Lauhtumislämpötilan minimi on asetettu 20 °C lämpötilaan kompressorien toiminnan takaamiseksi. Kun ulkolämpötila ylittää 5 °C lasketaan lauhtumislämpötila kaavalla:

$$T_l = T_u + 15 \text{ °C}, \quad (6)$$

jossa T_u on ulkolämpötila. [20] Alle 5 °C ulkolämpötiloissa lauhtumislämpötila on minimissä. Energialaskentaohjelmassa voi tarvittaessa helposti muuttaa minimilauhtumislämpötilan arvoa, kuten myös muita arvoja. COP-sovitteet seuraavat lauhtumislämpötilaa ja riippuen kylmäaineesta energialaskentaohjelmaan on asetettu oikea COP-sovite. Esimerkiksi kuvasta 21 nähdään, että kylmäkalusteiden COP-arvo R134a-kylmäaineella voidaan laskea kaavalla:

$$COP = -1 * 10^{-5} * T_l^3 + 0,0028 * T_l^2 - 0,2393 * T_l + 8,6271, \quad (7)$$

jossa T_l on lauhtumislämpötila. Kuten kaikki laskettavat arvot, on lauhtumislämpötila esitetty energialaskentaohjelmassa tunneittain. Tämän vuoksi myös COP-arvot saadaan tunnin tarkkuudella.

Jotta välillisessä järjestelmässä voidaan laskea liuospiirin ominaisuuksia, on tarve laskea lauhtumisteho. Kylmäkertoimen määritelmän mukaan voidaan tunnittaisen jäähdytystehon ja COP-arvon avulla laskea tunnittainen lauhtumisteho kaavalla:

$$Q_l = Q_j + \frac{Q_j}{COP}, \quad (8)$$

jossa Q_j on tunnittainen jäähdytysteho. [17, s. 10] Lisäksi kompressorin ottoteho voidaan laskea kaavalla:

$$P_k = \frac{Q_j}{COP}, \quad (9)$$

jossa Q_j on tunnittainen jäähdytysteho. Kun tunnittaiset kompressorin ottotehot lasketaan yhteen, saadaan kompressorien vuoden sähkönkulutus kilowattitunteina.

5.4 Liuospiirin mitoitus

Liuospiirin mitoituksen perusteena on se, että pumppujen yli oleva painehäviö pidetään vakiona. Putkiston painehäviö voidaan laskea kaavalla:

$$\Delta p = \sum(\xi \frac{L}{d} + \sum \zeta) \frac{1}{2} \rho v^2, \quad (10)$$

jossa L on putken pituus, d putken sisähalkaisija, ρ virtausaineen tiheys, v virtausaineen nopeus, ξ kitkakerroin ja ζ kertavastus. [9, s. 31] Tällöin kaavan (10) mukaan painehäviön ollessa vakio liuoksen nopeus ja edelleen tilavuusvirta ovat vakioita. Energialaskentaohjelma on toteutettu niin, että tilavuusvirran putkistossa voi määrittää, jolloin painehäviö

määrittäyty sen mukaan. Tavoitteena putkiston painehäviölle on noin 100 Pa/m. Tilavuusvirran ja tiheyden avulla saadaan massavirta kaavalla:

$$\dot{m} = \frac{\dot{V}}{\rho}, \quad (11)$$

jossa \dot{V} on tilavuusvirta ja ρ tiheys.

Ominaisuudet, kuten tiheys, riippuvat liuoksesta. Energialaskentaohjelma määrää ominaisuudet valitun liuoksen mukaisesti. Ominaisuudet on esitetty energialaskentaohjelmassa taulukon 9 mukaisesti.

Taulukko 9. Nesteiden ja liuosten ominaisuuksia. [9, s. 151]

| Lämpötila: Nestevaihtoehdot: | 5 vesi5 | 20 vesi20 | 20 g30% | 20 g40% | °C |
|--|-------------------|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Ominaislämpökapasiteetti: | 4,19 | 4,19 | 3,73 | 3,49 | kJ/kgK |
| Liuoksen tiheys: | 1000 | 999 | 1039 | 1054 | kg/m ³ |
| Dynaaminen viskositeetti: | 0,00150 | 0,00100 | 0,00219 | 0,00291 | Pa*s |
| Kinemaattinen viskositeetti: | 1,5000E-06 | 1,0110E-06 | 2,1078E-06 | 2,7609E-06 | m ² /s |

Taulukossa 9 esimerkiksi vesi5 tarkoittaa 5 °C lämpöistä vettä ja g40% tarkoittaa veden ja etyleeniglykolin sekoitusta niin, että etyleeniglykolia on 40 % liuoksesta. [9, s. 151] Laskennassa on käytetty 40 % etyleeniglykolia. Liuoksen ominaisuuksien ja massavirran avulla saadaan virtausnopeus kaavalla:

$$v = \frac{4\dot{m}}{\pi\rho d^2}. \quad (12)$$

Koska putken halkaisijaa ei tiedetä, on putken pituus laskettava ja sen jälkeen putken 100 Pa/m -painehäviötavoitteen avulla arvioitava putken sisähalkaisija. Nyt putken pituudeksi on arvioitu 80 m.

Painehäviö putkistossa lasketaan kaavalla (10). Kaavan (10) kitkakerroin voidaan arvioida turbulentilla virtauksella kaavalla:

$$\xi = (1,84 \log(Re) - 1,64)^{-0,2}, \quad (13)$$

jossa Re on Reynoldsin luku. Laminaarissa tapauksessa kitkakerroin voidaan arvioida kaavalla:

$$\xi = 64/Re, \quad (14)$$

jota käytetään, kun Reynoldsin luku on alle 2300. [9, s. 31] Lämmönsiirto huonontuu, kun virtaus muuttuu laminaariksi, joten Reynoldsin luku pyritään saamaan turbulentin virtauksen puolelle. Reynoldsin luku voidaan laskea kaavalla:

$$Re = \frac{vd}{\nu_k}, \quad (15)$$

jossa ν_k on kinemaattinen viskositeetti, joka saadaan taulukosta 9. [31, s. 18] Putken painehäviö pituusyksikköä kohden saadaan, kun jaetaan kaavan (10) painehäviö putken pituudella. Jotta näin voidaan tavoitella noin 100 Pa/m painehäviötä, on ensin putken halkaisijalle annettava alkuarvo. Lisäksi tässä tapauksessa kaavan (10) kertavastuksia ei oteta huomioon, koska ilman tarkkaa laitteistotietoa niiden suuruutta on vaikea arvioida.

Putken halkaisijan alkuarvo ja muut mahdolliset arvot saadaan teräsputkien standardista. SFS 3312 -standardin mukaiset teräsputken koot on esitetty taulukossa 10.

Taulukko 10. Teräsputken standardikokoja.

| Teräsputket | | | | | | | | | | | | | |
|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|
| Sisähalkaisija | 8 | 100 | 15 | 20 | 25 | 32 | 40 | 50 | 65 | 80 | 100 | 125 | 150 |
| Ulkohalkaisija | 13,7 | 17,2 | 21,3 | 26,9 | 33,7 | 42,4 | 48,3 | 60,3 | 76,1 | 88,9 | 114,3 | 139,7 | 168,3 |

Taulukon 10 arvoista valitaan sellainen sisähalkaisijan arvo, että putken painehäviö on mahdollisimman lähellä arvoa 100 Pa/m. Tämän sisähalkaisijan mukaan määräytyvät myös liuoksen virtausnopeus ja Reynoldsin luku.

Koska massavirta on vakio ja lauhdutusteho vaihtelee tunneittain, muuttuu nestelauhduttimissa eli kylmä- ja pakkaskalusteissa tapahtuva liuoksen lämpötilan nousu myös tunneittain. Liuoksen lämpötilan nousu voidaan laskea kaavalla:

$$\Delta T_{LAN} = \frac{Q_l}{\dot{m}c_p}, \quad (16)$$

jossa Q_l on kylmä- ja pakkaskalusteiden tunnittaisten lauhdutustehojen summa, \dot{m} massavirta ja c_p ominaislämpökapasiteetti, joka saadaan taulukosta 9. [9, s. 31]

Putkiston lisäksi painehäviötä aiheuttavat kiertoon liitetyt laitteet ja komponentit. Painehäviöiden arviointi ja laskenta tapahtuu taulukon 11 mukaisesti.

Taulukko 11. Liuospiirin laitteiden painehäviöitä. [20]

| Komponentti | Painehäviö [kPa] | Määrä | Yht. [kPa] |
|-----------------------|------------------|-------|------------|
| Nestejäähdytin: | 50 | 1 | 50 |
| Nestelauhdutin: | 50 | 1 | 50 |
| Kolmitieventtiili: | 25 | 1 | 25 |
| LTO-piirin venttiili: | 15 | 1 | 15 |
| LTO-laite: | 35 | 1 | 35 |

Laitteiden painehäviöt voivat vaihdella, mutta laskennan yksinkertaistamiseksi ei painehäviöitä lasketa erikseen. Lämmöntalteenoton ollessa pois käytöstä on myös LTO-piirin laitteet rajattu ulos laskennasta.

Kun painehäviöt on saatu laskettua, voidaan laskea energiankulutukseen vaikuttava liuospumppun ottoteho. Kun pumppun hyötysuhteeksi on oletettu 0,7, saadaan liuospumppun ottoteho kaavalla:

$$P_p = \frac{\Delta p \dot{m}}{\rho \mu}, \quad (17)$$

jossa Δp on putkiston ja laitteiden yhteenlaskettu painehäviö ja μ liuospumppun hyötysuhde. Lisäksi nestejäähdyttimen kuluttama sähkö saadaan kuvan 25 FincoilSelect-ohjelman avulla.

Mitoitustiedot:

Haluttu jäähdytysteho: 30 kW

Ilma:

Lämpötila, sisään: 27,0 °C

Suhteellinen kosteus: 70 %

Jäähdytettävä neste:

Etyleeniglykoli-vesi 40 %

Lämpötila, sisään: 42,0 °C

Lämpötila, ulos: 36,0 °C

Painehäviö (maksimi): 100,0 kPa

Suurin sallittu äänen painetaso Lp:

Äänitaso (maks.): 80 dB(A) Nimellispisteessä (10 m) Muu havaintopiste...

Vaihtoehdot:

| Laite | 21/21 | (Reitti-lkm) | Kokonais-teho [kW] | Ulos [°C] | Neste Virta [l/s] | Δp [kPa] | Äänitaso [dB(A)] | Hinta [EUR] |
|----------------|-------|--------------|--------------------|-----------|-------------------|----------|------------------|-------------|
| SCAG-112-09-16 | (29) | | 30,0 | 35,9 | 1,31 | 1,90 | 33 | 7355 |
| SCAG-112-09-16 | (44) | | 29,9 | 37,4 | 1,72 | 0,90 | 33 | 7355 |
| SEpG-112-09-16 | (17) | | 29,9 | 34,6 | 1,08 | 7,16 | 33 | 8018 |
| SEpG-112-09-16 | (22) | | 29,9 | 35,4 | 1,20 | 3,97 | 33 | 8018 |
| SEpG-112-09-16 | (29) | | 30,1 | 36,4 | 1,43 | 2,36 | 33 | 8018 |

Erikoisrakenne
Sähköverkko

Lajittelu
Näytä
Simuloi

Kuva 25. Nestejäähdytin ajo, FincoilSelect. [3]

Alfa Lavalin FincoilSelectillä voidaan valita sopiva nestejäähdytin vallitseviin olosuhteisiin. Koska energialaskentaohjelmassa ei ole järkevää tehdä valinta-ajoa jokaiselle vuoden tunnille, yksinkertaistetaan laskentaa siten, että oletetaan nestejäähdyttimen kuluttamaksi sähköenergiaksi noin keskiarvo erilaisista olosuhteista. Valinta-ajojen jälkeen arvioidaan, että tunnittainen nestejäähdyttimen sähkönkulutus on noin 4-6 % tunnittaisesta lauhdutustehosta. Laskennassa käytetään arvoa 5 %.

5.5 Lämmöntalteenotto

Energialaskentaohjelmassa lämmöntalteenotto voidaan ottaa huomioon tai poistaa käytöstä. Energialaskentaohjelma laskee lämmöntalteenotolla saadun energian lämmityskaudella ja lisäksi lämmityskauden ulkopuolella lämmöntalteenotolla kompensoidaan kylmä- ja pakkaskalusteiden aiheuttama jäähdyttävä vaikutus.

LTO:n ollessa käytössä kylmä- ja pakkaskalusteiden lauhtumislämpötilan minimiä voidaan lämmityskaudella nostaa niin, että lämmöntalteenottolaitteistolle saadaan tarpeeksi lämmintä liuosta. Energialaskentaohjelmassa tämä toteutetaan niin, että kylmä- ja pakkaskalusteille menevän liuoksen minimi asetetaan tiettyyn lämpötilaan (T_A), mikä samalla rajaa lämmöntalteenoton jälkeisen liuoksen lämpötilan minimin samaan arvoon, koska LTO:n jälkeen liuospiirissä on vain nestejäähdytin eli lämpöä ei enää saada liuospiiriin. Samalla lämmityskauden minimilauhtumislämpötila nousee 3 °C korkeammaksi kuin liuoksen minimilämpötila.

Lämmöntalteenottolaitteille lämmityskaudella menevän liuoksen lämpötila lasketaan kaavalla:

$$T_{LTO-meno} = T_A + \Delta T_{LAN}, \quad (18)$$

jossa T_A on kylmä- ja pakkaskalusteille eli nestelauhduttimille menevän liuoksen lämpötilan asetettu minimiarvo ja ΔT_{LAN} kaavan (16) nestelauhduttimissa tapahtuva liuoksen tunnitainen lämpötilan nousu. Koska laskennoissa lämmöntalteenotto maksimoidaan, on LTO:lta tulevan liuoksen lämpötila aina minimiarvossa (T_A). Tällöin liuos ei kulje nestejäähdyttimen kautta, vaan ohittaa sen kolmitieventtiilillä. Käytännössä nestejäähdytintä joudutaan kuitenkin käyttämään, mutta sitä ei tässä oteta huomioon. [20]

Lämmöntalteenoton teho voidaan lämmityskaudella laskea kaavalla [9, s. 31]:

$$Q_{LTO} = \dot{m}c_p\Delta T_{LAN}. \quad (19)$$

Koska lasketaan potentiaalista lämmöntalteenottoa, kaavassa (19) oletetaan, että kaava (18) pitää lämmityskaudella aina paikkansa.

Lämmityskauden ulkopuolella kylmäkoneistoa ajetaan kylmän ehdoin. Lauhtumislämpötila seuraa ulkolämpötilaa ja nestelauhduttimille menevän liuoksen lämpötilan minimi putoaa takaisin 17 °C:seen. Lämmöntalteenotolla liuksesta otetaan sen verran lämpöä talteen, että nestelauhduttimien jäähdyttävä vaikutus saadaan kompensoitua. Lisäksi, jos ulkolämpötila ylittää 20 °C, lämmöntalteenotto ei ole päällä. Loput liuoksen jäähdytyksestä toteutetaan nestejäähdyttimellä.

5.6 Kalusteiden energiankulutus

Kylmä- ja pakkaskalusteet tarvitsevat sähköä myös valaistukseen, puhaltimiin, reunalämmitykseen ja sähkösulatukseen. Nämä arvot oletetaan samoiksi hiilidioksiditoteutuksessa ja omakoneellisessa toteutuksessa, joten ne eivät vaikuta vertailuun vaan energiankulutukseen. Kalusteiden sähkötehon kulutus lasketaan Norpen kylmä- ja pakkaskalusteiden keskimääräisten tehojen mukaan, jotka ovat esitetty taulukossa 12. Kalusteiden keskimääräiset tehot ovat jokseenkin korkeat mutta se ei vaikuta oleellisesti vertailuun.

Taulukko 12. Norpen kalusteiden keskimääräinen sähkötehon kulutus.[30]

| | [W/m] | | %jakauma | |
|-------------------------|-------|----------|----------|----------|
| | Kylmä | Pakkanen | Kylmä | Pakkanen |
| Sulatukset | 320 | 550 | 67 | 70 |
| Puhaltimet | 30 | 11 | 6 | 2 |
| Valot | 130 | 125 | 27 | 16 |
| Reunalämmitykset | 0 | 90 | 0 | 12 |
| Yht. | | | 100 | 100 |

Kylmäkalusteiden sulatuksen vaatima teho saadaan kun lasketaan kylmäkalusteiden pituudet yhteen ja kerrotaan sulatukseen tarvittavalla teholla pituusyksikköä kohden. Koska sulatuksen käyttökertoimen oletetaan olevan 1/24, koko sulatuksen vaatima sähköteho voidaan laskea kaavalla:

$$P_{sulatus} = k_{sulatus}(L_k P_{sk} + L_p P_{sp}), \quad (20)$$

jossa $k_{sulatus}$ on sulatuksen käyttökerroin, L_k kylmäkalusteiden pituus, P_{sk} kylmäkalusteiden sulatuksen vaatima teho pituusyksikköä kohden, L_p pakkaskalusteiden pituudet ja P_{sp} pakkaskalusteiden sulatuksen vaatima teho pituusyksikköä kohden. Näin laskettuna sulatuksen sähköteho jakaantuu tasan vuoden jokaiselle tunnille.

Kylmä- ja pakkaskalusteiden puhaltimien vaatima sähköteho lasketaan samaan tapaan kuin kaavalla (20) sähkösulatuksen vaatima sähköteho. Kalusteiden pituudet pysyvät samoina, mutta taulukosta 12 valitaan puhaltimien kohdalta oikeat tehot pituusyksikköä kohden. Lisäksi puhaltimien käyttökertoimen oletetaan olevan 20/24.

Kylmä- ja pakkaskalusteiden valaistuksen vaatima sähköteho lasketaan muuten samalla tavalla kuin sulatuksen ja puhaltimien vaatima sähköteho, mutta käyttökerroin poistetaan kaavasta (20) eli toisin sanoen käyttökerroin on 1. Kuitenkin oletetaan, että kalusteiden valaistus ei ole päällä kaupan aukioloaikojen ulkopuolella. Näinä tunteina valaistuksen sähköteho on 0 kW.

Reunalämmitystä ei käytetä kylmäkalusteissa, joten reunalämmityksen vaatimaa sähkötehoa laskettaessa kaavasta 20 voidaan kylmäkalusteiden vaikutus poistaa. Lisäksi reunalämmityksen käyttökerroin on valaistuksen tapaan 1. Reunalämmityksen tarkoitukse-

na on estää ilman vesihöyryn kondensoitumista ja jäätymistä pakkaskalusteiden reunoille. Koska kesällä ilman absoluuttinen kosteus on suurempi, tarvitsee reunalämmitys suuremman sähkötehon kosteuden poistamiseen. Reunalämmityksen todellinen tunnitainen tehontarve on arvioitu kaavalla:

$$P_{reunal-tod} = \frac{x}{x_{max}} P_{reunal}, \quad (21)$$

jossa x on alkutiedoista saatu ilman tunnitainen absoluuttinen kosteus, x_{max} alkutiedoista saatu ilman absoluuttisen kosteuden maksimi ja P_{reunal} kaavaa (20) soveltaen saatu reunalämmityksen vaatima sähköteho. Reunalämmityksen vaatima sähköteho on kuitenkin rajattu niin, että se on minimissään 30 % kaavan (20) arvosta.

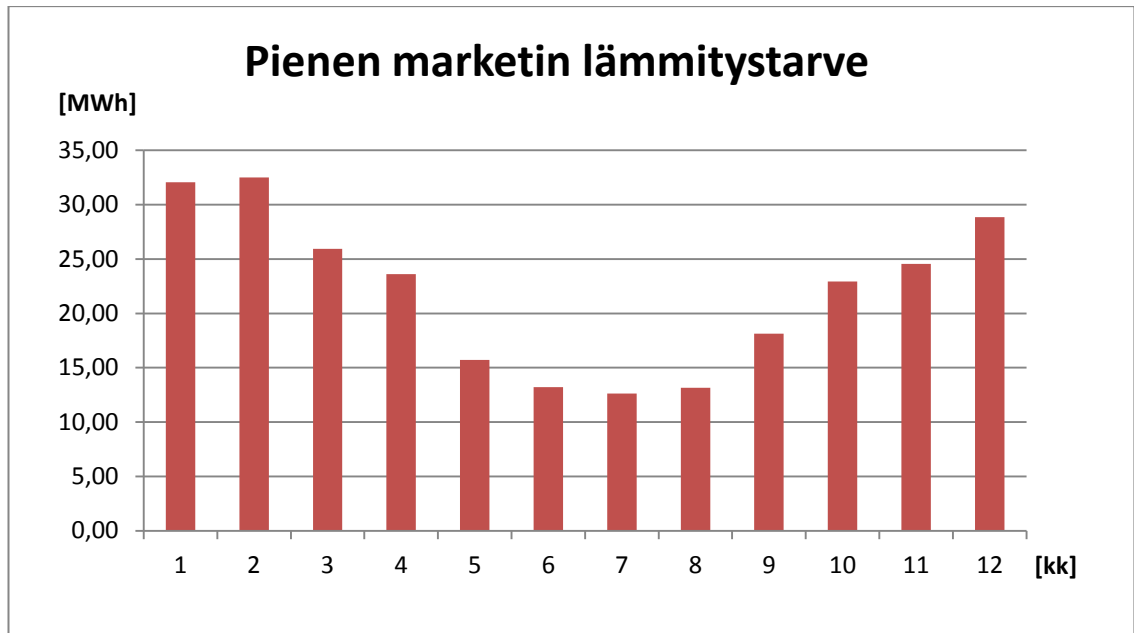
6. LASKENNAN TULOKSET

Laskennan tarkoituksena on saada pienen marketin eri kylmäntuoton vaihtoehtojen sähkönkulutus ja mahdollisen lämmöntalteenoton määrä. Jotta omakoneellisten välillisten kalusteiden energialaskentaohjelman ja booster-koneiston energialaskentaohjelman tulokset olisivat mahdollisimman vertailukelpoisia, on monia olosuhteiden arvoja oletettu samoiksi. Arvoja on koottu taulukkoon 13.

Taulukko 13. Laskennan oletusarvoja.

| | Oletusarvo |
|---|------------|
| Sisälämpötila lämmityskaudella | 18 °C |
| Sisälämpötila lämmityskauden ulkopuolella | 20 °C |
| Mitoitus kylmäteho | 30 kW |
| Mitoitus pakkasteho | 5 kW |
| Höyrystymislämpötila kylmä | -8 °C |
| Höyrystymislämpötila pakkanen | -30 °C |
| Kylmäkalusteiden ovitus | 10 % |
| Pakkaskalusteiden ovitus | 100 % |

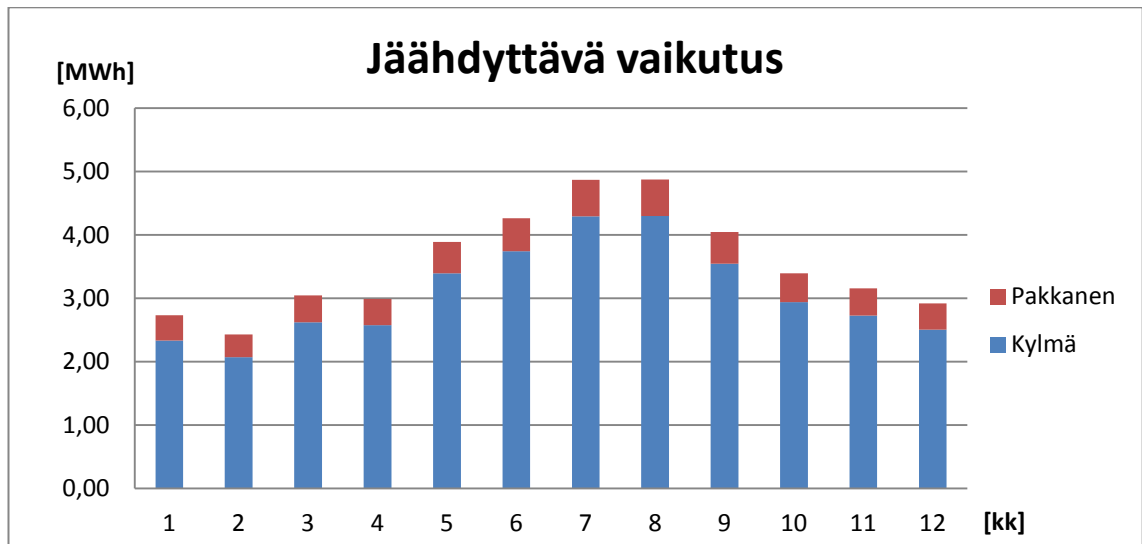
Pienen marketin lämmitystarvetta ei suoraan tarvita potentiaalisen lämmöntalteenoton laskemiseen, koska kesäaikana lämmöntalteenotto on rajattu ja lämmityskaudella lämmöntalteenoton energiamäärä ei riitä marketin lämmittämiseen kokonaan. Kuitenkin lämmitystarpeen avulla voidaan havainnollistaa lämmöntalteenoton hyödyllisyyttä. Pienen marketin lämmöntarvetta on arvioitu 1000 m² supermarketin lämmöntarpeen avulla. Oletetaan, että lämmöntarve on suoraan suhteessa pinta-alaan, jolloin 350 m² marketin lämmöntarve saadaan laskettua supermarketin lämmöntarpeesta. Kuvassa 26 on esitetty pylväsdiagrammilla 350 m² marketin kuukausittainen lämmöntarve.



Kuva 26. 350 m² marketin arvioitu lämmitystarve.

Laskentaan on otettu toteutusvaihtoehdot, joita on markkinoilla ja jotka ovat tällä hetkellä pienissä market-kohteissa kaikkein potentiaalisimpia vaihtoehtoja. Näin saadaan kohteiden kannalta näkemystä toteutustavan valintaan.

Jäähdyttävä vaikutus ei riipu COP-arvosta, joten kylmäkalusteille se on sama riippumatta siitä, mitä kylmäainetta käytetään. Kuvassa 27 on esitetty kylmä- ja pakkaskalusteiden jäähdyttävä vaikutus.



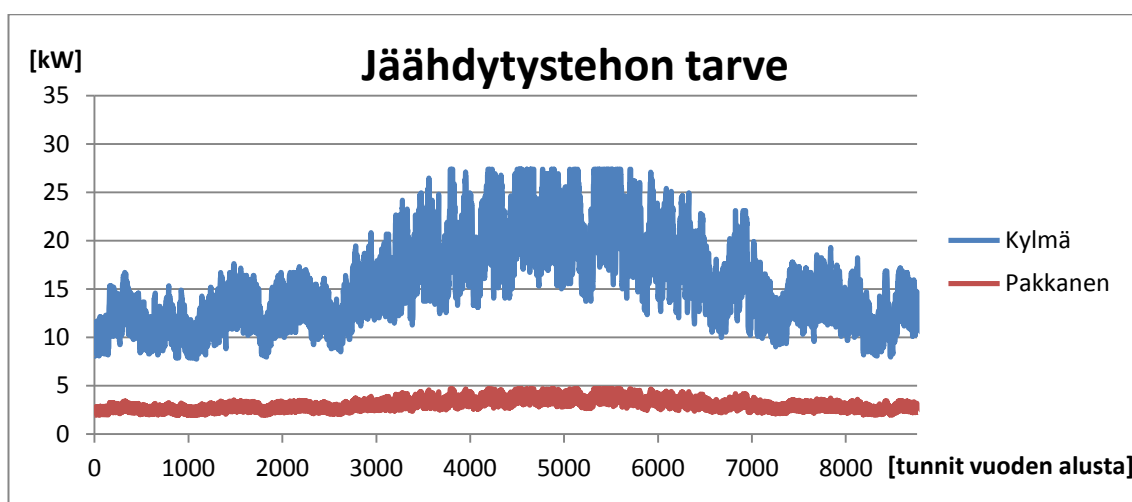
Kuva 27. Kylmä- ja pakkaskalusteiden jäähdyttävä vaikutus.

Lämmityskauden ulkopuolella pyritään lämmöntalteenotolla kompensoimaan kylmä- ja pakkaskalusteiden jäähdyttävä vaikutus. Jäähdyttävä vaikutus riippuu kalusteiden ovi-
tuksen lisäksi jäähdytystehosta. Jäähdytystehon tarve ei ole sama omakoneellisessa ja booster-toteutuksessa.

6.1 Omakoneellinen toteutus

Omakoneellisille pakkaskalusteille kylmäaineeksi on valittu R410A, koska F-kaasuasetuksen myötä R404A poistuu nopeasti käytöstä. Kylmäkalusteille valitaan kaksi eri vaihtoehtoa. R134a toimii väliaikaisena ratkaisuna, koska markkinoilla on useita laitteita, jotka toimivat sillä. R134a:n lisäksi kylmäkalusteille otetaan kylmäaineeksi R290 eli propaani. Propaani on ympäristöystävällinen ja täyttää F-kaasuasetuksen vaatimukset. Propaanilla toimivia omakoneellisia laitteita on jo markkinoilla.

Jäähdytystehon tarve vaihtelee energialaskentaohjelman mukaan tunneittain ja yöllä jäähdytystehon tarve on vähäisempää. Kuvassa 28 on esitetty tunnittaiset kylmä- ja pakkaskalusteiden jäähdytystehon tarpeet.

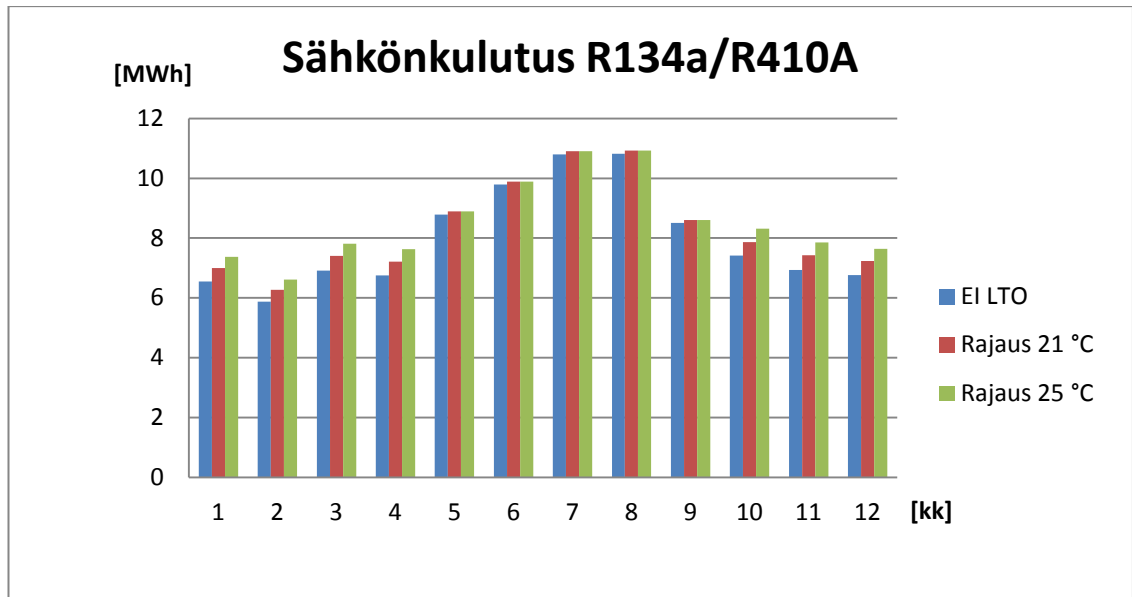


Kuva 28. Kylmä- ja pakkaskalusteiden jäähdytystehon tarve omakoneellisella toteutustavalla.

Kuvan 28 jäähdytystehon tarpeen piikit tasoittuvat, koska ulkoilman absoluuttista kosteutta on laskennassa rajattu. Sähkönkulutus määräytyy COP-arvojen ja lämmöntalteenoton ohjauksen myötä. Koska energialaskentaohjelmassa eri kylmäaineilla toimivien laitteiden COP-arvot eivät ole samat, on sähkönkulutus laskettava niille erikseen. Sähkönkulutus lasketaan kolmella tapaa: lämmöntalteenotto ei ole käytössä, kylmä- ja pakkaskalusteille menevä liuoksen minimilämpötila on rajattu 21 °C:seen tai rajausta on 25 °C.

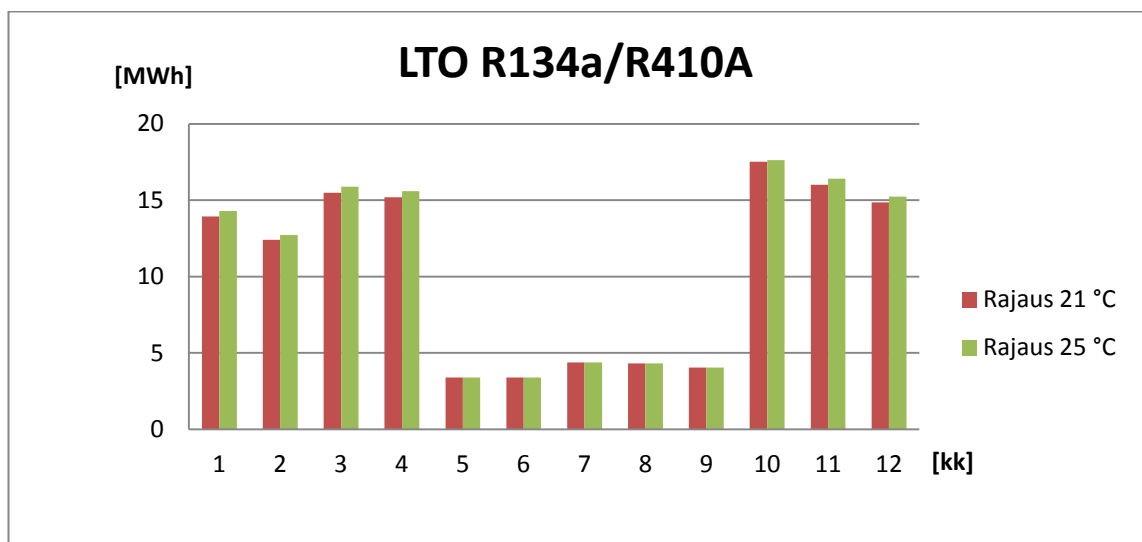
6.1.1 R134a/R410A

Ensimmäinen laskenta suoritetaan omakoneelliselle toteutukselle, jossa kylmäkalusteiden kylmäaineena on R134a ja pakkaskalusteiden kylmäaineena R410A. Kuvassa 29 on verrattu sähkönkulutusta ilman lämmöntalteenottoa, lämmöntalteenotolla niin, että nestelauhduttimille menevä liuoksen lämpötila on lämmityskaudella vähintään 21 °C sekä niin, että sama liuoksen lämpötila lämmityskaudella on minimissään 25 °C.



Kuva 29. Markettin sähkönkulutus eri lämmöntalteenoton ohjausvaihtoehdoilla. Kylmäkalusteiden kylmäaine on R134a.

Kuvasta 29 nähdään, että lämmityskauden ulkopuolella sähkönkulutuksessa ei ole suuria eroja. Tämä johtuu siitä, että lämmityskauden ulkopuolella rajaukset eivät ole voimassa vaan koneistoa ajetaan kylmän ehdoin. Lämmöntalteenottoa käytetään tuolloin vain jäädyttävän vaikutuksen kompensointiin. Sähkönkulutuksessa on pieni säästö lämmityskauden ulkopuolella, kun lämmöntalteenotto on poissa käytöstä. Tämä johtuu siitä, että LTO-laitteisto ohitetaan liuospiirissä, jolloin LTO-laitteiston osat eivät lisää painehäviötä. Säästö tulee liuospumun sähkönkulutuksesta. Lämmöntalteenotolla saatu potentiaalinen lämpöenergia on esitetty kuvassa 30.



Kuva 30. Potentiaalinen lämmöntalteenotto. Kylmäkalusteiden kylmäaine on R134a.

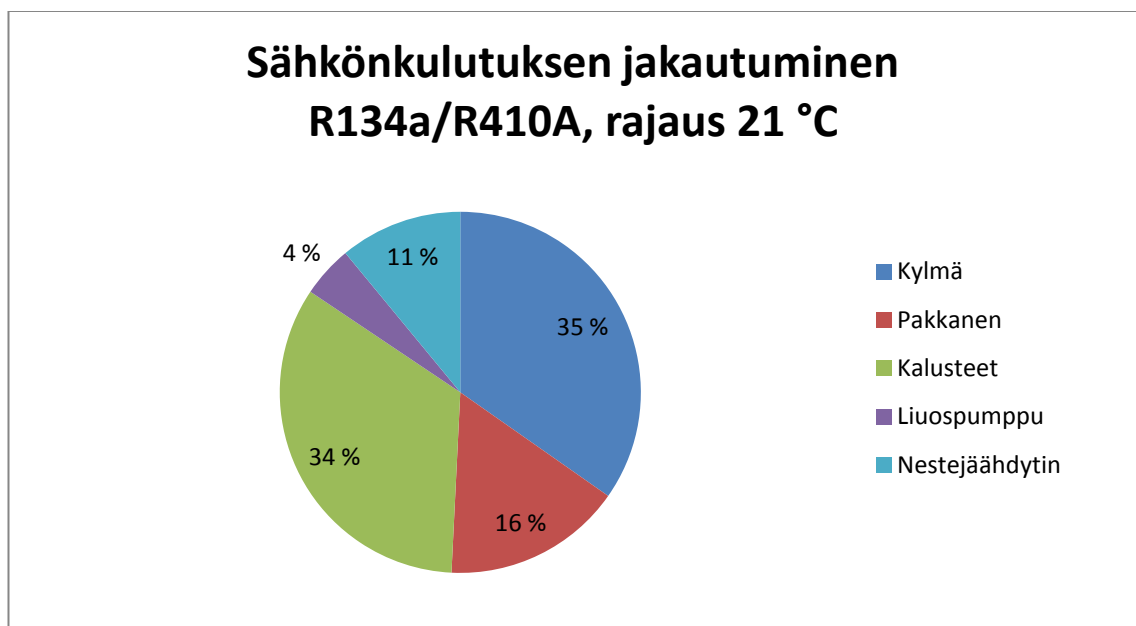
Kuvasta 30 nähdään, että nestelauhduttimille menevän liuoksen lämpötilan rajaus ei suuresti vaikuta lämmöntalteenottoon. Tämä johtuu siitä, että lämmityskaudella LTO-laitteistolta tulevan liuoksen lämpötila on rajattava minimissään samaan arvoon kuin

nestelauhduttimille menevän liuoksen lämpötila, koska liuospiirissä ei ole LTO-laitteiston jälkeen kuin nestejäähdytin, joka ei pysty lämmittämään liuosta asetusarvoon. Taulukkoon 14 on koottu sähkönkulutuksen ja potentiaalisen lämmöntalteenoton arvot vuositasolla.

Taulukko 14. Sähkönkulutuksen ja lämmöntalteenoton arvot vuositasolla. Kylmäkalusteiden kylmäaine on R134a.

| LTO ohjaus | Sähkö (MWh) | LTO (MWh) |
|--------------|-------------|-----------|
| Ei LTO | 95,90 | 0 |
| Rajaus 21 °C | 99,64 | 124,93 |
| Rajaus 25 °C | 102,46 | 127,30 |

Taulukosta 14 nähdään, että lämmöntalteenotolla hävitään sähköenergiankulutuksessa suurin piirtein saman verran, mitä lämpöenergian keräyksellä voitetaan. Tässä tilanteessa lämmöntalteenotolla saadaan kuitenkin noin 125 MWh lämpöenergiaa, mikä on hie-man vajaa puolet arvioidusta vuotuisesta lämmitystarpeesta (263 MWh). Kuvassa 31 on esimerkkinä sähkönkulutuksen jakautuminen tapauksessa, jossa kylmä- ja pakkaskalusteille menevän liuoksen lämpötila on rajattu 21 °C eli lämmöntalteenotto on käytössä.



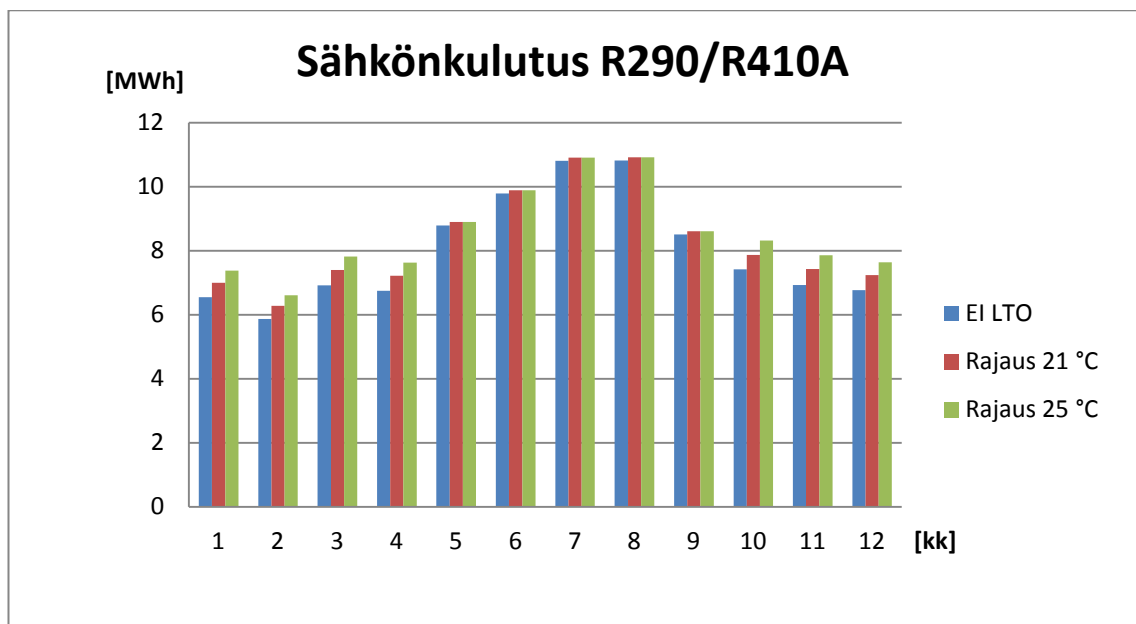
Kuva 31. Sähkönkulutuksen jakautuminen. Kylmäkalusteiden kylmäaineena on R134a.

Kalusteet-osio käsittää kylmä- ja pakkaskalusteiden sähkösulatuksen, puhaltimet, valot ja reunalämmityksen. Kuvasta 31 nähdään, että kylmä- ja pakkaskalusteiden kompressorit vievät noin puolet sähkönkulutuksesta, joten niiden toiminnan optimointi on sähkönkulutuksen kannalta oleellista. Kuitenkin noin kolmasosa sähkönkulutuksesta menee kalusteiden välttämättömiin lisätoimintoihin, joihin ei suuressa määrin voida vaikuttaa. Kalusteiden lisälaitteiden sähkönkulutus pienenee kehityksen myötä, joten kalusteiden kokonaissähkönkulutus pienenee myös.

6.1.2 R290/R410A

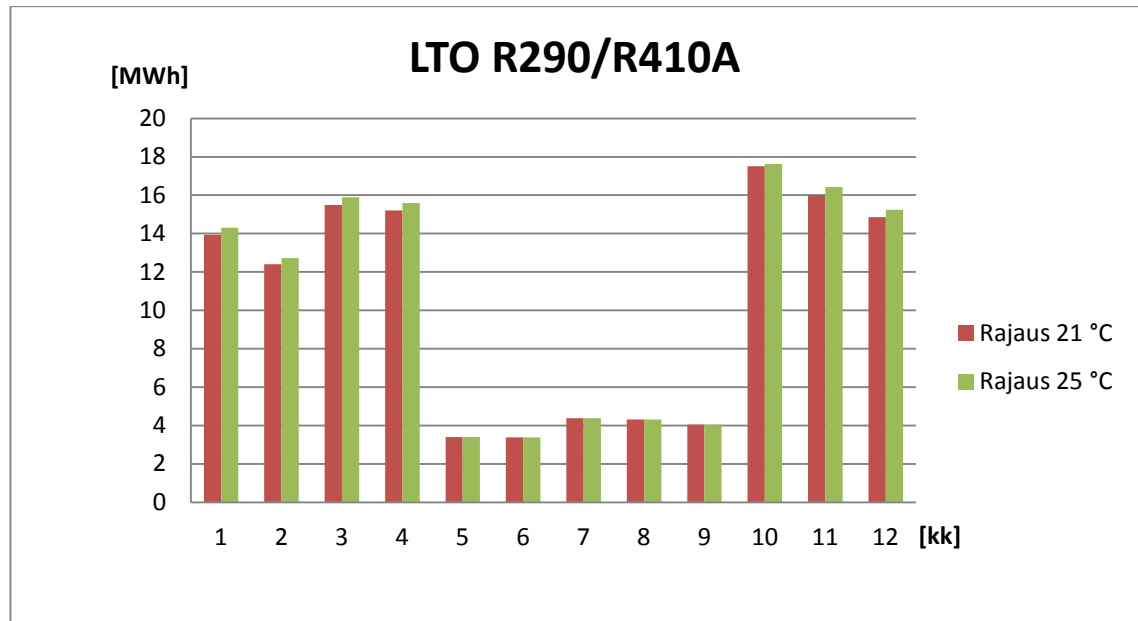
Toisessa laskettavassa omakoneellisessa toteutuksessa kylmäpuolella R134a-kylmäaine on korvattu R290-kylmäaineella eli propaanilla. Propaanin ja R134a:n log(p),h-tilapiirroksia vertailtaessa nähdään, että R134a:lla saadaan haluttu lauhtumislämpötila aikaan pienemmässä paineessa kuin propaanilla ja lisäksi pienemmällä paineenkorotuksella höyrystymislämpötilasta. Tämän vuoksi R134a:lla on paremmat tunneittaiset COP-arvot. R290 log(p),h-tilapiirros on esitetty kuvassa 8 ja R134a:n kuvassa 2.

Energialaskenta toteutetaan samalla tavalla kuin kohdassa 6.1.1. Kuvassa 32 on verrattu sähkönkulutusta eri LTO-ohjauksilla. Kylmäkalusteet toimivat propaanilla ja pakkaskalusteet R410A-kylmäaineella.



Kuva 32. Marketin sähkönkulutus eri lämmöntalteenoton ohjausvaihtoehdoilla. Kylmäkalusteiden kylmäaine on R290.

Kuvan 32 sähkönkulutuksen profiili on samanlainen kuin kuvassa 29. Arvot ovat hieman suuremmat kuvassa 32, koska propaanin COP-arvot ovat hieman huonommat. Kuukausittainen ero ei ole kovin suuri, koska kuvan 31 esimerkistä nähdään, että kylmäkalusteiden kompressorien osuus on noin kolmannes koko sähkönkulutuksessa. Loput sähkönkulutuksesta pysyy vakiona verrattuna kohdan 6.1.1 tilanteeseen pois lukien lauhtutustehon noususta johtuva pieni nousu nestejäähdyttimen sähkönkulutuksessa. Potentiaalinen lämmöntalteenotto on laskettu samaan tapaan kuin kohdassa 6.1.1 ja se on esitetty kuvassa 33.



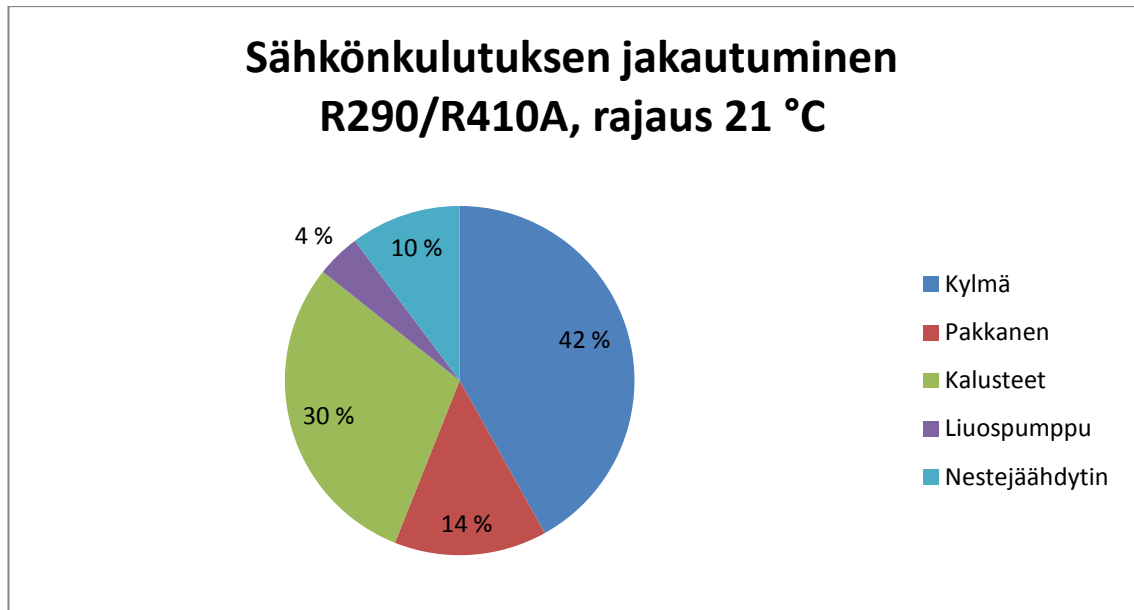
Kuva 33. *Potentiaalinen lämmöntalteenotto. Kylmäkalusteiden kylmäaine on R290.*

Kuvan 33 kuukausittaiset potentiaalisen lämmöntalteenoton arvot ovat profiililtaan samanlaiset kuin kuvassa 30, mutta propaanilla arvot ovat hieman suuremmat. Tämä johtuu siitä, että lauhtustehon tarpeen noustessa ja liuospiirin liuoksen massavirran ollessa vakio liuoksen lämpötilan nousu on hieman suurempi. Lämpötilan nousu on hyödynnettävissä LTO-laitteistolla. Taulukkoon 15 on koottu sähkönkulutuksen ja potentiaalisen lämmöntalteenoton arvot vuositasolla, kun kylmäpuolen kylmäaineena on propaani.

Taulukko 15. *Sähkönkulutuksen ja lämmöntalteenoton arvot vuositasolla. Kylmäkalusteiden kylmäaine on R290.*

| LTO ohjaus | Sähkö (MWh) | LTO (MWh) |
|--------------|-------------|-----------|
| Ei LTO | 107,39 | 0 |
| Rajaus 21 °C | 113,04 | 129,44 |
| Rajaus 25 °C | 118,28 | 134,12 |

Taulukosta 15 nähdään, että kun kylmäkalusteiden kylmäaineena on propaani, sähkönkulutus on vuositasolla noin 13 MWh enemmän verrattuna taulukon 14 R134a-kylmäaineen arvoihin. Potentiaalisen lämmöntalteenoton nousu verrattuna R134a toteutukseen on kuitenkin vain noin 6 MWh, joten propaanilla sähkönkulutuksen ja lämmöntalteenoton suhde on huonompi. Tämä johtuu siitä, että propaanin COP-arvo laskee jyrkemmin lauhtumislämpötilan noustessa koneiston toiminta-alueella. Kylmäkalusteiden COP-sovitteet on esitetty kuvassa 21. Kuvassa 34 on esitetty sähkönkulutuksen jakautuminen, kun kylmäkalusteiden kylmäaineena toimii propaani ja kalusteille menevän liuoksen lämpötilan minimi on rajattu 21 °C.



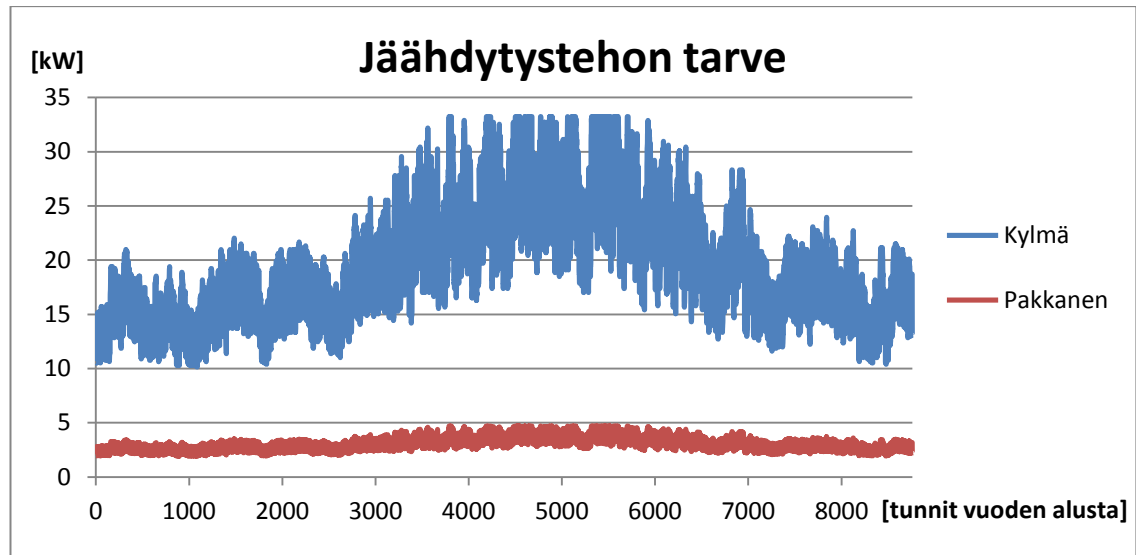
Kuva 34. Sähkönkulutuksen jakautuminen. Kylmäkalusteiden kylmäaineena on R290.

Kun kuvaa 34 verrataan kuvaan 31, huomataan, että kylmäkalusteiden kompressorien sähkönkulutuksen osuus kokonaiskulutuksesta nousee 7 prosenttiyksikköä. Kylmäkalusteilla on siis suurempi vaikutus kokonaisenergiankulutukseen kuin tilanteessa, jossa kylmäpuolen kylmäaineena on R134a.

6.2 Booster-toteutus

Koska CO₂-booster-koneiston toiminta on erilaista kuin omakoneellisessa välillisessä toteutuksessa, energialaskennassa on eroja. Lämmöntalteenotossa käytetään hyväksi tulitustehoa, koska kylmä- ja pakkaskalusteet on kytketty suoraan kylmäainepiiriin. Lisäksi lämpöä on mahdollista ottaa talteen tulituksen lisäksi lämpöpumpulla. Lämpöpumppu sijoittuu kuvassa 16 laskennallisesti kaasunjäähdyttimen tai lauhduttimen tilalle ja ottaa talteen muuten hukkaan menevän lämmön. Sähkönkulutusta laskettaessa erona on se, että booster-koneistossa ei ole liuospumppua. Jos lämpöpumppu on käytössä, sen sähkönkulutus otetaan huomioon. Lisäksi, jos lämpöpumppu on käytössä, sillä otetaan lämpöä talteen niin paljon, että lauhduttimen tai kaasunjäähdyttimen ei tarvitse olla päällä. Tällöin lauhdutin tai kaasunjäähdytin ei kuluta sähköä. Riippuen ajetaanko koneistoa ali- vai transkriittisenä, on käytössä lauhdutin tai kaasunjäähdytin.

Booster-koneistossa kompressorit on sijoitettu erilalla verrattuna omakoneelliseen toteutukseen. Tämän vuoksi kylmäpuolen jäähdytystehon tarvetta laskettaessa on ennen korkeapainekompressoria kylmäpuolen jäähdytystehoon laskennallisesti lisättävä pakkaspuolen lauhdutusteho. Jäähdytystehon tarve on esitetty kuvassa 35.

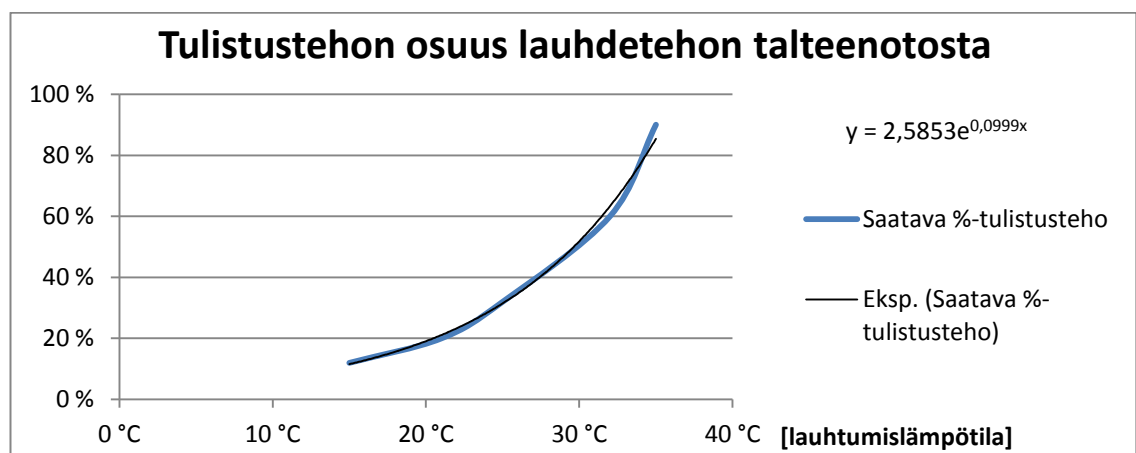


Kuva 35. Kylmä- ja pakkaskalusteiden jäähdytystehon tarve CO₂-booster-toteutustavalla.

Energialaskentaohjelman vakio-olosuhteissa kylmäpuolen jäähdytystehon tarve on siis pakkaspuolen lauhdutustehon verran suurempi kuin omakoneellisessa toteutuksessa. Jäähdytystehon tarpeen profiili on samankaltainen kuin kuvassa 28 omakoneellisilla kalusteilla mutta kylmäpuolen jäähdytystehon tarve on siirtynyt tehoakselilla ylöspäin.

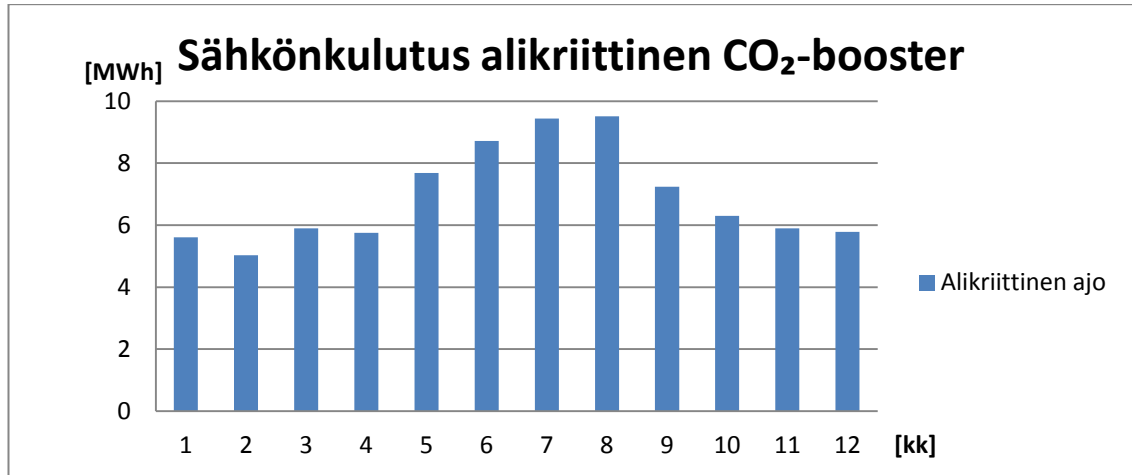
6.2.1 Alikriittinen ajo

Alikriittisellä ajolla tarkoitetaan, että prosessi ei ylitä kriittistä pistettä, mikä tarkoittaa kuvan 7 mukaan, että hiilidioksidin lämpötila ei nouse kuin hieman yli 30 °C. Tällöin koneistoa ajetaan kylmän ehdoilla. Lämmöntalteenotto toteutetaan tulistuslämmönsiirtimellä. Lämpöpumppu ei ole käytössä. Tulistuslämmönsiirrin ottaa talteen tietyn osuuden kylmäpuolen lauhdetehosta. Tämä osuus riippuu lauhtumislämpötilasta kuvan 36 mukaan.



Kuva 36. Tulistuslämmönsiirrimen talteenottama osuus lauhdetehosta riippuen lauhtumislämpötilasta.

LTO-piiri on kuvan 36 tapauksessa lämpötiloissa 30/40 °C, mikä tarkoittaa, että paluuveden minimilämpötila on sama kuin tuloveden lämpötila eli 30 °C. Hiilidioksidin lämpötilat ovat x/45 °C. Hiilidioksidilla lauhtumislämpötilan minimi on asetettu 10 °C. Koska lämpöpumppu ei ole käytössä, lauhtutin poistaa ylimääräisen lämmön. Kuvassa 37 on esitetty booster-laitteiston sähkönkulutus kuukausittain, kun koneistoa ajetaan alikriittisellä puolella.

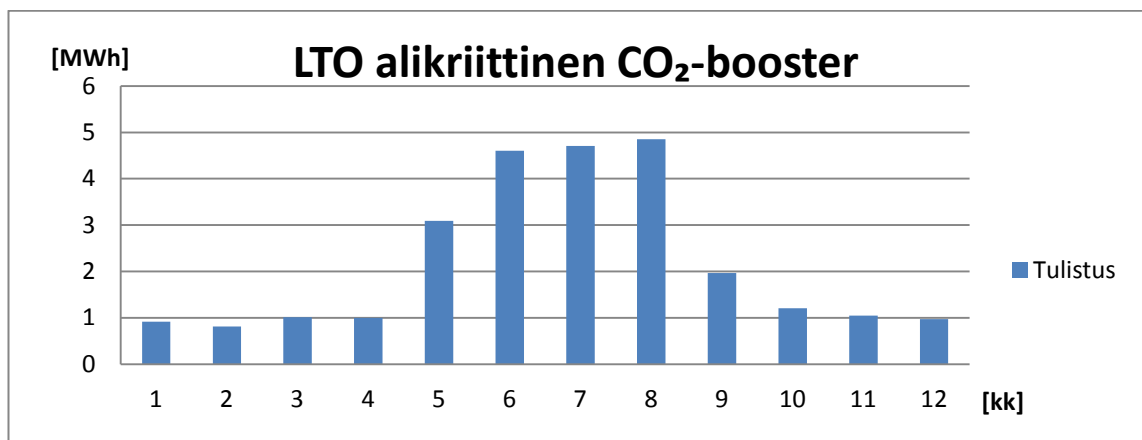


Kuva 37. Kuukausittainen CO₂-booster-laitteiston sähkönkulutus alikriittisellä ajolla.

Laskenta on toteutettu niin, että kylmäpuolen COP-arvo seuraa omakoneellisen energialaskennan tavoin soviteen avulla lauhtumislämpötilaa. Alikriittiselle ajolle sovitte on saatu Bitzerin valintaohjelman avulla ja se on muotoa:

$$\text{COP} = -0,0005T_l^3 + 0,0352T_l^2 - 0,9645T_l + 13,656. \quad (22)$$

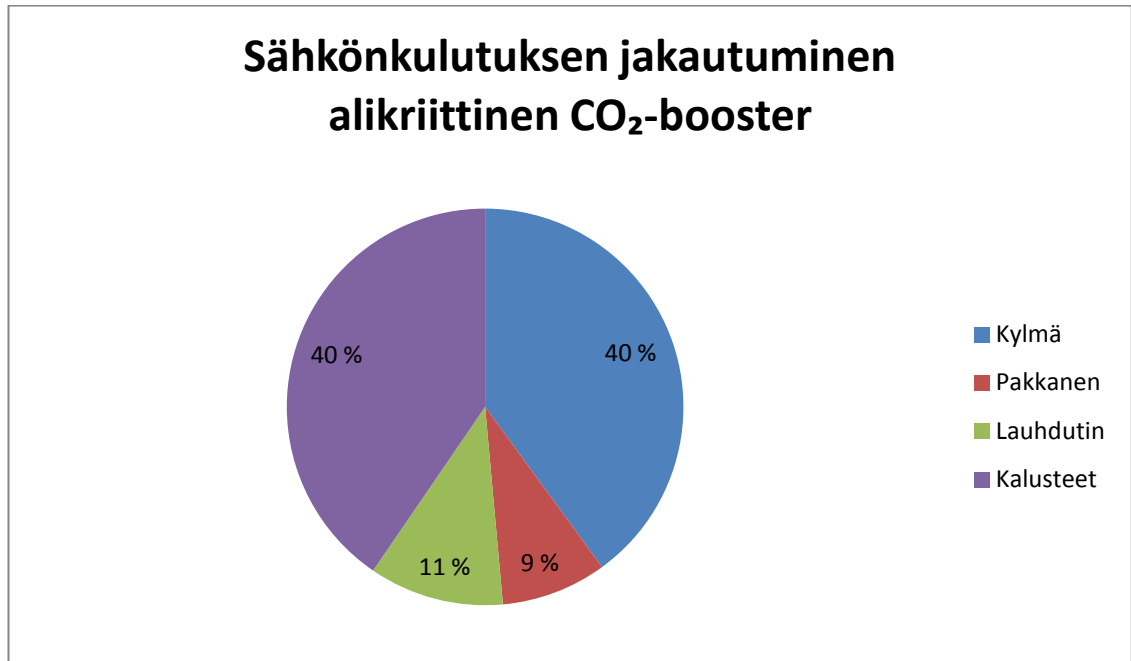
Pakkaspuolen COP-arvoksi on arvioitu 3,90 Bitzerin valintaohjelman avulla. Alikriittisellä ajolla talteenotettu lämpö on esitetty kuvassa 38. Lämpö otetaan talteen vain tulislämmönsiirtimellä.



Kuva 38. CO₂-booster-laitteistolla talteenotettu lämpö alikriittisellä ajolla.

Koska alikriittisen ajon tapauksessa yritetään minimoida kylmä- ja pakkaskalusteiden energiankulutusta, lämmöntalteenotto jää taka-alalle. Kuvan 38 lämmöntalteenoton potentiaalilla pystytään kattamaan energialaskelman mukaan vain noin 10 % vuosittaisesta marketin lämmöntarpeesta.

Sähkönkulutuksessa kalusteiden lisälaitteiden, kuten valaistuksen, sähkönkulutus on asetettu yhtä suureksi, kuin omakoneellisessa toteutuksessa. Näin toimien vertailukelpoisuus tältä osin säilyy. Kuvassa 39 on esitetty sähkönkulutuksen jakautuminen alikriittisessä ajossa.

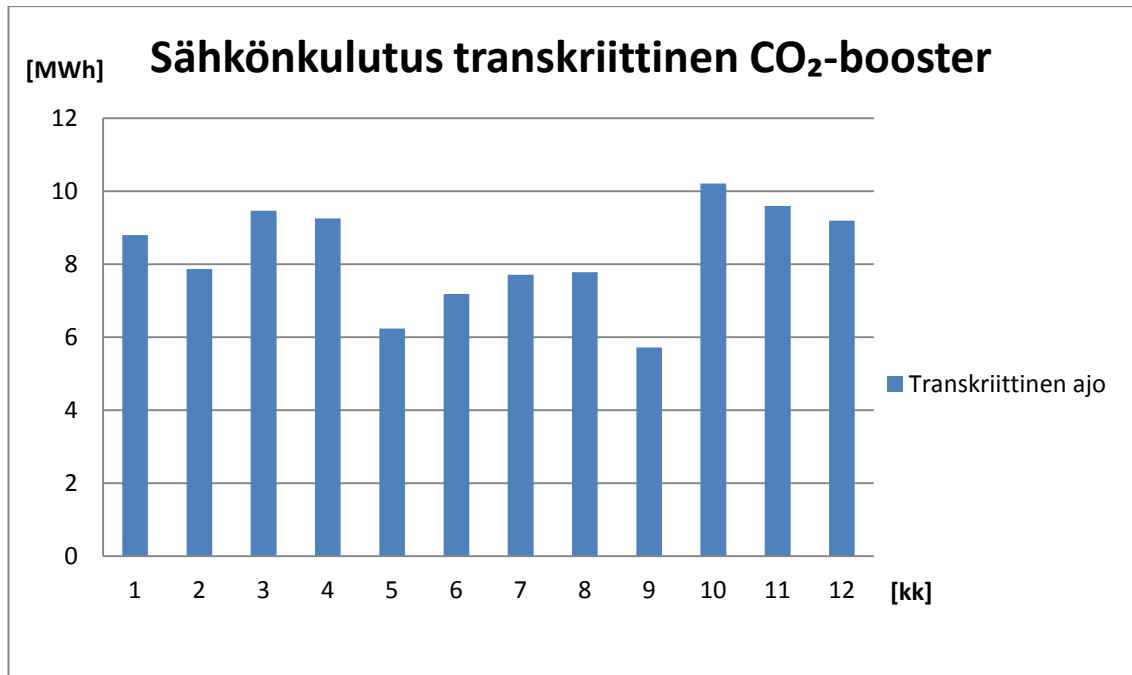


Kuva 39. Sähkönkulutuksen jakautuminen alikriittisessä ajossa.

Kuvasta 39 nähdään, että kylmäpuolen eli korkeapainekompressorin toiminnalla on hyvin suuri vaikutus sähkönkulutukseen. Kalusteiden lisälaitteiden sähkönkulutus on yhtä suuri, mutta siihen ei voida prosessivalinnoilla vaikuttaa.

6.2.2 Transkriittinen ajo

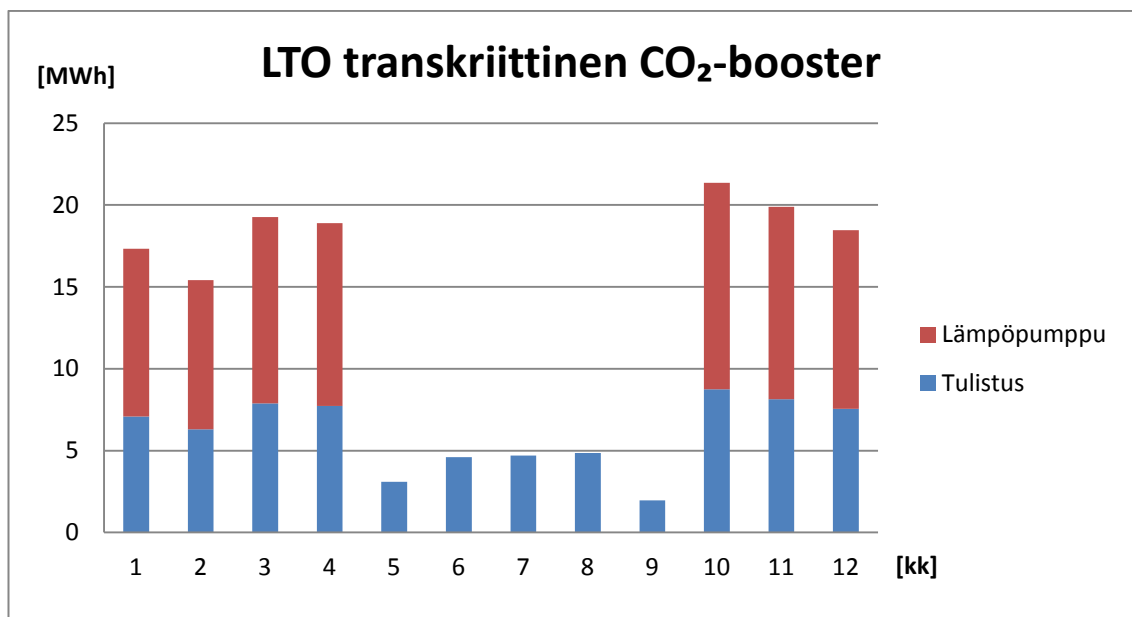
Transkriittisessä ajossa tarkoituksena on painottaa lämmöntalteenottoa. Lämmityskaudella lauhtumislämpötila on nostettu lämpötilaan 32 °C, mikä vastaa kuvan 7 mukaan 75 barin painetasoa ja on juuri hiilidioksidin kriittisen pisteen yläpuolella. Tulistuslämmönsiirtimen lisäksi lämpöä otetaan talteen lämpöpumpulla. Tulistuslämmönsiirtimen on Bitzerin valintaohjelman avulla laskettu ottavan lämpöä talteen 48 % kylmäpuolen lauhdutustehosta. Lämpöpumpulla alijäähdytetään hiilidioksidikaasu 10 °C lämpötilaan, jolloin kaasunjäähdyttimen ei tarvitse olla käytössä. Lämmityskauden ulkopuolella lämpöpumppu ei ole käytössä ja koneisto toimii kuten alikriittisessä ajossa. Kuvassa 40 on esitetty CO₂-booster-laitteiston sähkönkulutus kuukausittain transkriittisellä ajolla.



Kuva 40. Kuukausittainen CO₂-booster-laitteiston sähkönkulutus transkriittisellä ajolla.

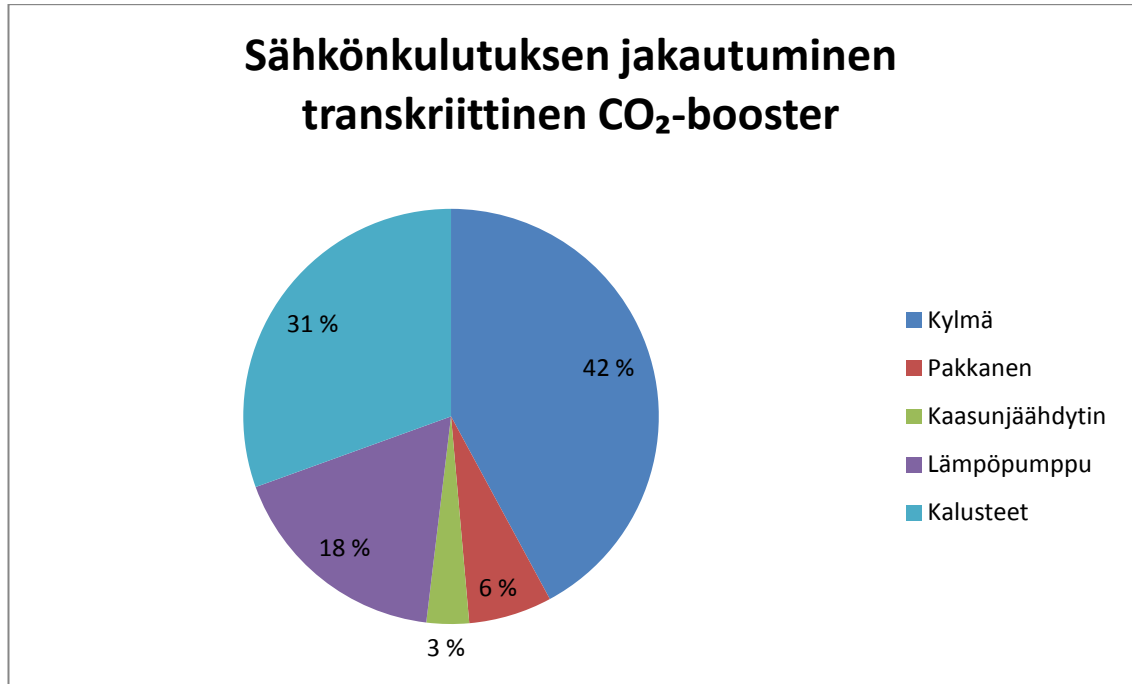
Lämmityskaudella, kun lauhtumislämpötila on 32 °C, on Bitzerin laskentaohjelman mukaan kylmäpuolen COP-arvo 3,30. Pakkaspuolen COP-arvo on sama kuin alikriittisessä ajossa eli 3,90. Sähkönkulutus korostuu lämmityskaudella, koska korkeapaine-kompressori pakotetaan nostamaan painetaso 75 barin tasolle.

Transkriittisellä ajolla talteenotettu lämpö on esitetty kuvassa 41. Lämpö otetaan talteen tulistuslämmönsiirtimellä ja alijäähdetyksessä lämpöpumpulla.



Kuva 41. CO₂-booster-laitteistolla talteenotettu lämpö transkriittisellä ajolla.

Energialaskentaohjelmassa lämmityskaudella, kun tulistuslämmönsiirrin on ottanut lauhdetehosta talteen osansa, lämpöpumppu ottaa jäljelle jääneestä osasta lämmön talteen COP-arvolla 3,00. Lämpöpumppu kuluttaa sähköä talteenotettuun lämpöön verrattuna COP-arvolla 4,00. Lämpöpumpun vesipuolen lämpötilat ovat 7/9 °C ja hiilidioksidipuolen lämpötilat 35/10 °C. Kuvassa 42 on esitetty sähkönkulutuksen jakautuminen transkriittisessä ajossa.



Kuva 42. Sähkönkulutuksen jakautuminen transkriittisessä ajossa.

Kuvasta 42 nähdään, että lämpöpumpun sähkönkulutus on lähes viidenneksen koko sähkönkulutuksesta. Vaikka lämpöpumpun käytön myötä kaasunjäähdyttimen kuluttaman sähkön määrä romahtaa verrattuna alikriittiseen ajon lauhduttimen kulutukseen, on transkriittisessä ajossa lämpöpumpun ja kaasunjäähdyttimen kuluttaman sähkön osuus kokonaissähkönkulutuksesta 10 %-yksikköä suurempi, kuin pelkän lauhduttimen kuluttama sähkön osuus alikriittisessä ajossa. Lämpöpumpun ja kaasunjäähdyttimen kuluttamaan sähkömäärään pystytään vaikuttamaan koneiston ajotapaa muuttamalla.

7. VERTAILU

Toteutustapojen vertailussa otetaan konkreettisesti huomioon energiatehokkuuteen vaikuttavat seikat: sähkönkulutus ja lämmöntalteenottopotentiali. Arvot on laskettu energialaskentaohjelmalla. Lisäksi otetaan kantaa yleisellä tasolla muihin toteutukseen vaikuttaviin seikkoihin, kuten investointikustannuksiin. Vertailussa on käytetty painottamatonta pistejärjestelmää, jotta kaikki seikat tulevat huomioitua.

7.1 Sähkönkulutus

Sähkönkulutus on pienien markettien energialaskennassa oleellisin osa, koska se vaikuttaa suoraan toteutuksen valintaan ja energiakustannuksiin. Taulukossa 16 on eritelty käsiteltävien toteutusvaihtoehtojen eri komponenttien vuoden sähkönkulutukset.

Taulukko 16. Toteutusvaihtoehtojen komponenttien sähkönkulutukset [MWh]

| Toteutus | Ohjaus | Kylmä | Pakanen | Neste-/kaasunjähdytin | Kalusteet | Liuospumppu | Lämpöpumppu | Yhteensä | Pisteet |
|-----------------|-----------------|-------|---------|-----------------------|-----------|-------------|-------------|----------|---------|
| R134a /R410A | Ei LTO | 33,0 | 15,2 | 10,8 | 33,5 | 3,3 | | 95,9 | 5 |
| | Rajaus 21 °C | 34,6 | 16,0 | 10,9 | 33,5 | 4,6 | | 99,6 | 4 |
| | Rajaus 25 °C | 36,4 | 16,9 | 11,1 | 33,5 | 4,6 | | 102,5 | 3 |
| R290 /R410A | Ei LTO | 44,0 | 15,2 | 11,4 | 33,5 | 3,3 | | 107,4 | 2 |
| | Rajaus 21 °C | 47,4 | 16,0 | 11,6 | 33,5 | 4,6 | | 113,0 | 1 |
| | Rajaus 25 °C | 51,5 | 16,9 | 11,8 | 33,5 | 4,6 | | 118,3 | 0 |
| CO ₂ | Alikriittinen | 33,1 | 7,1 | 9,1 | 33,5 | | 0 | 82,8 | 6 |
| | Transkriittinen | 46,2 | 7,1 | 3,6 | 33,5 | | 19,3 | 99,0 | 4 |

Taulukosta 16 nähdään, että CO₂-booster-laitteisto on sähkönkulutukseltaan kaikkein energiatehokkain vaihtoehto. R134a/R410 omakoneellinen toteutus rajauksella 21 °C on sähkönkulutukseltaan samoissa lukemissa kuin transkriittinen hiilidioksidiprosessi. Tämän vuoksi näille vaihtoehdoille annetaan samat vertailupisteet.

7.2 Lämmöntalteenotto

Lämmöntalteenotto on energialaskennan kannalta sähkönkulutuksen jälkeen toiseksi merkittävin tekijä. Koska lämmöntalteenottolaitteisto voi vaihdella, lämmöntalteenoton arvot ovat potentiaalisia arvoja. Taulukossa 17 on eritelty käsiteltävien toteutusvaihtoehtojen lämmöntalteenoton potentiaalit eri lämmöntalteenoton ohjausvaihtoehdoilla.

Taulukko 17. Eri toteutusvaihtoehtojen lämmöntalteenottopotentiaalit [MWh].

| Toteutus | Ohjaus | LTO-laite | Tulistuslämmön-siirrin | Lämpöpumppu | Yhteensä | Pisteet |
|-----------------|-----------------|-----------|------------------------|-------------|----------|---------|
| R134a /R410A | Ei LTO | 0 | | | 0 | 0 |
| | Rajaus 21 °C | 124,9 | | | 124,9 | 2 |
| | Rajaus 25 °C | 127,3 | | | 127,3 | 3 |
| R290 /R410A | Ei LTO | 0 | | | 0 | 0 |
| | Rajaus 21 °C | 129,4 | | | 129,4 | 4 |
| | Rajaus 25 °C | 134,1 | | | 134,1 | 5 |
| CO ₂ | Alikriittinen | | 26,2 | 0 | 26,2 | 1 |
| | Transkriittinen | | 72,7 | 77,2 | 149,9 | 6 |

Taulukosta 17 nähdään, että omakoneellisilla välillisillä kalusteilla lämmöntalteenoton potentiaali ei merkittävästi muutu rajausta muuttaessa ja talteen otettu energia on keskimäärin noin 130 MWh. Kuitenkin transkriittisellä booster-laitteistovaihtoehdolla päästään tulistuslämmönsiirtimen ja lämpöpumpun kombinaatiolla suurempaan arvoon eli noin 150 MWh.

7.3 Muita toteutukseen vaikuttavia tekijöitä

Ympäristöystävällisyys ja turvallisuus ovat tärkeä tekijä toteutuksen valinnassa. R134a- ja R410A-kylmäaineet ovat F-kaasuasetuksen vuoden 2020 GWP-raja-arvon alapuolella, joten käyttökielto ei vaikuta niihin vielä tällöin. Kuitenkin markkinoille saattamisen vähentäminen tulee varmasti vaikuttamaan kylmäaineiden saatavuuteen ja hintaan. R290 eli propaani on ympäristöystävällinen kylmäaine, mutta palamisherkkyden vuoksi luo kysymyksen turvallisuudesta. Lisäksi koska Euroopan kylmäainelainsäädäntö ei

vielä tunne uusia palamis- ja myrkyllisyysluokituksia, voi propaanin käyttö olla ongelmallista. Koska hiilidioksidi on ympäristöystävällinen, palamaton ja myrkytön, booster-toteutukset saavat 2 pistettä. Lisäksi propaanitoteutuksille annetaan 1 vertailupiste.

Booster-koneiston hinta kokoon nähden nousee marketin pienentyessä. Laitteiston investointikustannuksia ajateltaessa pienessä marketissa booster-koneiston hinta nousee marketin pinta-alaan nähden korkeaksi. Omakoneellisessa välillisessä toteutuksessa investointikustannukset ovat enemmän suoraan verrannollisia marketin kokoon, joten omakoneellinen toteutus on investointikustannuksiltaan booster-toteutusta edullisempi. Investointivertailussa ei oteta kantaa, onko booster-koneistossa mukana lämpöpumppu vai ei. Omakoneelliset välilliset toteutukset saavat investointiosiota 1 vertailupisteen. Lisäksi omakoneelliset toteutukset, joissa ei ole lämmöntalteenottoa saavat toisen vertailupisteen, koska lämmöntalteenottolaitteiston takaisinmaksuaika pienessä marketissa voi olla niin pitkä, että se ei ehdi maksaa itseään takaisin.

Pienissä marketeissa tilanpuute on ongelma. Konehuoneelle on vaikea löytää tilaa ja konehuoneeseen käytetty tila on pois myyntitilasta. Hiilidioksiditoteutus vaatii konehuoneen. Omakoneellisilla välillisillä kalusteilla ei erillistä konehuonetta tarvita, vaan liuospiiri johdetaan suoraan nestejäähdyttimelle. Nestejäähdyttimelle voi myös olla vaikea löytää paikkaa varsinkin kaupunkiolosuhteissa, mutta myyntitilaan vaikutusta ei ole. Tilantarpeesta omakoneelliset välilliset toteutukset saavat 1 vertailupisteen.

7.4 Vertailun tulokset

30 kW kylmätehoa ja 5 kW pakkastehoa on mitoitustilanteena pienissä marketeissa suuremmasta päästä, jolloin pienimmissä marketeissa varsinkin lämmöntalteenoton merkitys pienenee. Investointikustannuksien merkitys kasvaa, koska hinta neliötä kohden on suurempi. Lisäksi tilantarpeesta tulee monesti määräävä tekijä.

Vertailun pisteet ovat painottomia, mutta niistä saa kuvan toteutuksien hyvistä ja huonoista puolista. Koska eri asiakkaat painottavat eri asioita, ei vertailu ole yksiselitteistä. Kaupunkiolosuhteissa täytyy ottaa paljon asioita huomioon. Esimerkiksi museovirasto vaalii ympäristön säilyvyyttä, minkä vuoksi neste- tai kaasunjäähdyttimen sijoittaminen ei ole välttämättä helppoa. Lisäksi puhaltimien melutaso täytyy ottaa tarkemmin huomioon, jotta ympärillä asuvat eivät häiriinny.

Kuitenkin tässä diplomityössä energiatehokkuus on etusijalla. Sähkönkulutus on vertailussa tärkein osa-alue, koska se on tilaajan valinnoista riippumattomin energiatehokkuuden arvo. Taulukossa 18 on esitetty eri toteutusvaihtoehtojen saamat vertailupisteet.

Taulukko 18. Eri toteutusvaihtoehtojen vertailupisteet.

| Toteutus | Ohjaus | Sähkönkulutus | LTO | Ympäristöystävällisyys/turvallisuus | Investointi | Tilantarve | Yhteensä |
|-----------------|-----------------|---------------|-----|-------------------------------------|-------------|------------|----------|
| R134a /R410A | Ei LTO | 5 | 0 | 0 | 2 | 1 | 8 |
| | Rajaus 21 °C | 4 | 2 | 0 | 1 | 1 | 8 |
| | Rajaus 25 °C | 3 | 3 | 0 | 1 | 1 | 8 |
| R290 /R410A | Ei LTO | 2 | 0 | 1 | 2 | 1 | 6 |
| | Rajaus 21 °C | 1 | 4 | 1 | 1 | 1 | 8 |
| | Rajaus 25 °C | 0 | 5 | 1 | 1 | 1 | 8 |
| CO ₂ | Alikriittinen | 6 | 1 | 2 | 0 | 0 | 9 |
| | Transkriittinen | 4 | 6 | 2 | 0 | 0 | 12 |

Energiatehokkuuden lisäksi ympäristöystävällisyys on F-kaasuasetuksen vuoksi tärkeää. Laskentaan ja vertailuun on valikoitu F-kaasuasetuksen täyttäviä kylmäaineita. Transkriittinen booster-koneisto on vertailun kärjessä. Se on lämmöntalteenossa ja ympäristöystävällisyydessä muita vaihtoehtoja parempi. Lisäksi sen sähkönkulutus on kolmanneksi pienin.

Kuitenkin jos tarkastellaan tilannetta, jossa lämmöntalteenottoa ei investointikustannuksien vuoksi haluta toteuttaa, on omakoneellinen R134a /R410A-toteutus hyvä vaihtoehto. Vaikka ympäristöystävällisyydestä joudutaan tinkimään, on omakoneellinen R134a /R410A-toteutus pienissä marketeissa perusteltu murrosvaiheen vaihtoehto. R290 /R410A-toteuksen sähkönkulutus on niin suurta, ettei se energiatehokkuudessa pysty kilpailemaan booster-toteutusten kanssa.

8. YHTEENVETO

Kylmäainetilanne heikkenee F-kaasuasetuksen myötä, joten marketin kylmäntuottoon soveltuvien kylmäaineiden määrä vähenee. F-kaasuasetus rajaa lyhyellä aikataululla R404A-kylmäaineen pois käytöstä, minkä vuoksi varsinkin pakkaspuolen kylmäaineen valinta on vaikeaa. Optimaalista pakkaspuolen kylmäainetta, joka täyttää ympäristövaatimukset, ei vielä ole. Kylmäpuolen kylmäaineille on jo vaihtoehtoja, mutta esimerkiksi omakoneellisista kylmäkalusteista suurin osa toimii vielä R134a-kylmäaineella. R134a-kylmäaineen, kuten muidenkin HFC-yhdisteiden, käyttöä rajoitetaan F-kaasuasetuksen mukaan, joten niiden käyttäminen ei enää pitkällä tähtäimellä ole kannattavaa. Omakoneellisissa kylmäkalusteissa propaani on lupaava ratkaisu, mutta ennen kuin Euroopan Unioni päättää uusista palo- ja myrkyllisyysluokituksista, on propaanin käyttö rajattua. Hiilidioksidi on ympäristön kannalta helppo valinta kylmäaineeksi.

Isoissa marketeissa on yleistä hoitaa kylmäntuotto booster-koneistolla mutta ongelmat tulevat esiin pienien markettien kohdalla. Booster-ratkaisu on kallis pieneen markettiin ja konehuoneelle on usein vaikea löytää paikkaa. Tämän vuoksi omakoneellisesta välillisestä ratkaisusta tulee vartenotettava kylmäntuoton vaihtoehto pienissä marketeissa. Liuospiirin nestejäähdyttimen paikka voi tuottaa ongelmia omakoneellisen välillisen ratkaisun kohdalla, mutta sen sijoittaminen on usein helpompaa kuin erillisen konehuoneen.

Omakoneellinen välillinen toteutus on uudenlainen ratkaisu, joten booster-koneiston suunnittelusta on enemmän kokemusta ja toteutettuja hankkeita. Tämän vuoksi esimerkiksi lämmöntalteenoton toteutus ja ohjaus ovat omakoneellisessa välillisessä ratkaisussa vielä epävarmoja seikkoja. Energialaskentaohjelman mukaan booster-koneistolla voitaisiin saada hieman enemmän lämpöä talteen, mutta lämmöntalteenoton toteutuksen epävarmuuden vuoksi erot eivät ole niin merkittäviä, että pelkästään lämmöntalteenoton perusteella kannattaisi tehdä toteutusvalintaa. Lisäksi lämmöntalteenoton kohdalla pienissä marketeissa on otettava erityisesti huomioon tilaajan tahtotila. Mahdollista on, että kylmäntuotto pyritään tekemään mahdollisimman pienillä investoinneilla. Koska pienissä marketeissa lämmityksen tarve on verrattain vähäistä, on mahdollista, että lämmöntalteenottolaitteistosta saatu hyöty ei kata investointikustannuksia. Talteen otetun lämmön johtaminen ja myyminen toisaalle, kuten esimerkiksi taloyhtiölle, vaatii erillisiä sopimuksia, jotka vaihtelevat tapauskohtaisesti.

Sähkönkulutus on energialaskennan kannalta suurin vaikuttava tekijä. Energialaskentaohjelman mukaan, kun lämmöntalteenotto on käytössä, ovat booster-koneisto ja omakoneellinen välillinen ratkaisu, jossa kylmäpuolen kylmäaineena toimii R134a ja pakkaspuolen kylmäaineena R410A, sähkönkulutuksen kannalta lähes yhtä hyviä ratkaisuu-

ja. Isompi ero sähkönkulutuksessa tulee, kun lämmöntalteenotto ei ole käytössä. Tällöin booster-koneisto on energiatehokkaampi ratkaisu. Kuitenkin tämän diplomityön tapauksessa omakoneellinen välillinen R134a/R410A-toteutus ilman lämmöntalteenottoa on sähkönkulutukseltaan vertailussa toiseksi paras vaihtoehto, joten sen käyttö voi olla muut vaikuttavat tekijät huomioon ottaen mahdollinen toteutusvaihtoehto.

Tässä diplomityössä painotetaan F-kaasuasetuksen vaikutuksia eli käytännössä ympäristöystävällisyyttä sekä energiatehokkuutta. Sähkönkulutuksen, lämmöntalteenoton ja ympäristöystävällisyyden kannalta booster-koneisto on paras vaihtoehto kylmäntuoton toteutukseen pienissä marketeissa. Konseptina se on hyvä vaihtoehto sen vuoksi, että isommat marketit toteutetaan usein hiilidioksidilla. Tällöin kaikissa marketeissa F-kaasuasetuksen vaatimukset toteutuvat ongelmitta. Kuitenkin on huomioitava, että kylmäaineita ja tekniikoita kehitetään koko ajan ja sopivien kylmäaineiden löytyessä, voi omakoneellinen välillinen toteutus haastaa booster-toteutuksen myös energiatehokkuudessa.

Pienien markettien kylmäntuotto on murrosvaiheessa. Jos hanke päätetään toteuttaa omakoneellisella välillisellä ratkaisulla, voidaan hanke toteuttaa vielä HFC-kylmäaineilla. Energiatehokkuuden epäselvyyden vuoksi toteutuksen valintaa ohjaa suuressa määrin investointikustannukset ja toteutuksen tilantarve, minkä vuoksi omakoneellinen välillinen ratkaisu on lyhyellä aikavälillä booster-koneistoa houkuttelevampi vaihtoehto. Lisäksi koska hankkeilla on monesti kiire, helpompi toteutusvaihtoehto on pienemmän ongelmamäärän vuoksi etusijalla.

LÄHTEET

- [1] Coolselector2, 1.1.1.44 ed., Danfoss, 2016. [Tietokoneohjelma]
- [2] BITZER Software, 6.4.4.1464 ed., Bitzer, 2015. [Tietokoneohjelma]
- [3] FincoilSelect, 4.5th ed., Alfa Laval, Vantaa, 2014. [Tietokoneohjelma]
- [4] CoolPack, 1.5 ed., IPU, Tanskan teknillinen yliopisto, 2012. [Tietokoneohjelma]
- [5] Jupiter Scroll CoolFlow, [Verkkodokumentti], [Viitattu 19.10.2015], saatavissa: <http://www.coolfors.com/fi/tuote/jupiter-scroll/>.
- [6] National refrigerants, [Verkkodokumentti], [Viitattu 2.9.2015], saatavissa: <http://www.nationalref.com/>.
- [7] Vento Hybrid, [Verkkodokumentti], [Viitattu 19.10.2015], saatavissa: <http://www.aht.at/en/products/multideck-chillers/refrigerated-shelves/vento-hybrid/>.
- [8] A. Aittomäki, Kylmäteknikka, 4. painos. Suomen Kylmäyhdistys ry, Helsinki, 2012, 413 s.
- [9] A. Aittomäki, Välilliset kylmlaitokset - suunnittelu ja rakentaminen, 1. painos. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Tampere, 2001, 235 s.
- [10] J. Bergé, CoolFors toteuttaa Suomen ensimmäisen luonnollisella R290-kylmäaineella toimivan päivittäistavarakaupan, [Verkkodokumentti], [Viitattu 15.10.2015], saatavissa: <http://www.coolfors.com/fi/news/coolfors-toteuttaa-suomen-ensimmaisen-luonnollisella-r290-kylmaaineella-toimivan-paivittaistavarakaupan/>.
- [11] J. M. Calm, The next generation of refrigerants - Historical review, considerations, and outlook, International Journal of Refrigeration, Vol. 31, No. 7, 2008, pp. 1123-1133.
- [12] J. M. Calm, D. A. Didion, Trade-offs in refrigerant selections: past, present, and future, International Journal of Refrigeration, Vol. 21, No. 4, 1998, pp. 308-321.
- [13] M. Eck, L. Mardorf, Hochschule Osnabrück, [Verkkodokumentti], [Viitattu 2.9.2015], saatavissa: http://lat.mb.fh-osnabrueck.de/download/Praktikum/KM_WP/log_p_h%20Diagramm%20R1234yf.pdf.
- [14] Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EU) N:o 517/2014, Euroopan unionin virallinen lehti, s. 195-230.
- [15] Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EU) N:o 842/2006, Euroopan unionin virallinen lehti, s. 1-11.

- [16] P. Hakala, Jos R404A:n käyttö loppuu, mitä tilalle? Suomen Kylmäyhdistys ry, 2013, 1-25 p.
- [17] P. Hakala, E. Kaappola, Kylmälaitoksen suunnittelu, 3. painos. Opetushallitus, 2013, 274 s.
- [18] P. Hannula, Uusi F-kaasuasetus - hallitusti kohti uusia kylmäaineita ja vuotta 2030, Kylmäextra, Vsk. 6, N:o. 1, 2014, s. 7-9.
- [19] P. Hannula, Euroopan komission ehdotus uudeksi F-kaasuasetukseksi, Kylmäextra, Vsk. 5, N:o. 1, 2013, s. 10-15.
- [20] T. Heikkilä, Kylmätekniiikan osastonjohtaja, Granlund Tampere Oy, 2015-2016, [Haastattelu].
- [21] E. Kaappola, A. Hirvelä, M. Jokela, J. Kianta, Kylmätekniiikan perusteet, 3. painos. Opetushallitus, Helsinki, 2014, 263 s.
- [22] M. Karampour, S. Sawalha, Supermarket refrigeration and heat recovery using CO₂ as refrigerant, 2014, [Verkkodokumentti] [Viitattu 10.10.2015], saatavissa: https://www.kth.se/polopoly_fs/1.498819!/EP06-supermarket%20refrigeration%20and%20heat%20recovery%20using%20CO2%20as%20refrigerant.pdf.
- [23] KHT Royal Institute of Technology, In short about R1234ze, Department of Energy Technology, [Verkkodokumentti], [Viitattu 4.9.2015], saatavissa: <https://www.kth.se/en/itm/inst/energiteknik/forskning/ett/projekt/koldmedier-med-lag-gwp/low-gwp-news/kort-om-r1234ze-1.561807>.
- [24] KHT Royal Institute of Technology, R-1234yf to be used in MAC systems, despite safety concerns, Department of Energy Technology, [Verkkodokumentti], [Viitattu 4.9.2015], saatavissa: <https://www.kth.se/en/itm/inst/energiteknik/forskning/ett/projekt/koldmedier-med-lag-gwp/low-gwp-news/ar-r1234yf-framtidens-koldmedium-for-mobilkyla-1.426734>.
- [25] J. Kianta, Kylmäainetilanne 2008, Suomen Kylmäyhdistys ry, 2008, s. 1-14.
- [26] K. Kiiski, Myyntipäällikkö, AHT, 2015, [Myyntiesittely].
- [27] D. Lavento, Hyviä kylmäaineita on riittävästi, Kylmäextra, Vsk. 6, N:o. 1, 2014, s. 10-11.
- [28] N. Masson, H. Jia, S. Burkel, Guide 2014: Natural refrigerants - Continued growth and innovation in Europe, Shecco publications, 2014, 195 p.
- [29] M. O. McLinden, A. F. Kazakov, J. Steven Brown, P. A. Domanski, A thermodynamic analysis of refrigerants: Possibilities and tradeoffs for Low-GWP refrigerants, International Journal of Refrigeration, Vol. 38, No. 1, 2014, pp. 80-92.
- [30] M. Mykkänen, Tutkimus ja tuotekehityspäällikkö, Norpe Suomi Oy, 2015 [Kokous]

[31] A. F. Mills, Basic heat & mass transfer, 2. painos. Prentice Hall Inc, Upper Saddle River, NJ, 1999, 1000 p.

[32] A. Ruuskanen, Jäähdytysasiantuntija, Ruokakesko Oy, 2015, [Kokous]

LIITE A: OMAKONEELLISEN VÄLILLISEN TOTEUTUKSEN LIUOSPIIRIN KYTKENTÄKAAVIO

