

Tero Smolander

HAJAUTETUN JÄÄHDYTYSJÄRJESTELMÄN ENERGIATEHOKKUUDEN OPTIMOINTI

Opinnäytetyö
Energiatekniikka

2017



**Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu**

Tekijä/Tekijät	Tutkinto	Aika
Tero Smolander	Insinööri (AMK)	Kesäkuu 2017
Opinnäytetyön nimi		42 sivua 1 liitesivu
Hajautetun jäähdytysjärjestelmän energiatehokkuuden optimointi		
Toimeksiantaja		
Suunnittelutoimisto Janni Areva Oy		
Ohjaaja		
Lehtori Hannu Sarvelainen		
Tiivistelmä		
<p>Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on selvittää jäähdytysjärjestelmien suunnitteluun tarvittavia tietoja ja tarkastella mahdollisia energiatehokkuutta ja ympäristöystävällisyyttä parantavia tekijöitä.</p> <p>Työ on rajattu käsittelemään lähinnä kotitalouksien kylmälaitteiden tekniikkaa sekä näissä tarvittavien komponenttien optimoimista, mahdollisimman hyvän järjestelmäkokonaisuuden saavuttamiseksi. Sen lisäksi lukijalle annetaan yleiskäsitys jäähdytystekniikassa esiintyvistä prosesseista, tarvittavista laitteista ja näiden toimintaperiaatteista.</p> <p>Työssä suunnitellaan kotitalouskäyttöön soveltuva kylmälaite, jonka lähtökohtina ovat mahdollisimman energiatehokas jäähdytysjärjestelmä sekä minimoidut ympäristöä kuormittavat tekijät kustannustehokkaalla tavalla.</p> <p>Tulokset osoittavat miten laskelmien perusteella saadaan selville komponenttien optimaalisimmat mitoituskoot kotitalouksien kylmälaitteille, tarvittavaan jäähdytystehoon nähden, kun prosessissa käytetään kylmäainetta R600a.</p>		
Asiasanat		
jäähdytys, energiatehokkuus, ympäristöystävällinen		

Author (authors)	Degree	Time
Tero Smolander	Bachelor of Engineering	June 2017
Thesis Title		
Energy Efficiency Optimization of a Decentralized Refrigeration System		42 pages 1 page of appendix
Commissioned by		
Suunnittelutoimisto Janni Areva Oy		
Supervisor		
Hannu Sarvelainen, Senior Lecturer		
Abstract		
<p>The objective of this thesis is to elucidate the necessary information needed in designing of a refrigeration system and to examine potential factors for improving energy efficiency and environmental-friendliness.</p> <p>The thesis is limited mainly to cover domestic refrigeration technology and to the optimization of the components needed in these kinds of appliances to ensure the best possible ensemble. There is also an overview given on the basic operating principles of processes and components found in refrigeration systems.</p> <p>In this thesis, a refrigerator is designed for domestic use. The bases for this design are the possible energy efficiency and minimalized environmental effects in a cost-effective way.</p> <p>The results show how to calculate for the most optimal sizing of components for a domestic refrigeration, in relation to the cooling power needed, when R600a is used as the refrigerant.</p>		
Keywords		
refrigeration, energy efficiency, ecological		

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	5
2	KYLMÄTEKNIIKAN JA JÄÄHDYTTÄMISEN KEHITTYMINEN.....	6
2.1	Historia	6
2.2	Nyky aika	7
2.3	Tulevaisuus	8
3	JÄÄHDYTYSTEKNIIKAN MENETELMÄT	9
3.1	Jäähdytysprosessit	9
3.2	Jäähdytyskoneiden komponentit.....	14
3.3	Kylmäaineet.....	20
3.4	Energiatehokkuuden optimointi.....	24
4	JÄÄHDYTYSJÄRJESTELMÄN SUUNNITTELU.....	24
4.1	Lämpökuorma.....	26
4.2	Kylmäaineen valinta.....	31
4.3	Mitoituslaskelmat	33
5	YHTEENVETO	39
	LÄHTEET.....	40
	LIITTEET	

Liite 1. Kylmäaine R600a p, h-diagrammi

1 JOHDANTO

Viimeisten kolmen vuosikymmenen aikana Ilmaston lämpenemisen havaitseminen on tehnyt energiatehokkuudesta ja ympäristöystävällisyydestä kasvavia trendejä, jotka vaikuttavat kaikkien alojen teolliseen kehitykseen.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on tarkastella jäähdytystekniikan kehitystä ja auttaa ymmärtämään millä tavoin jäähdytystä voidaan nykypäivänä toteuttaa sekä miten jäähdytysjärjestelmien mitoitus tapahtuu niin että, ne olisivat mahdollisimman energiatehokkaita tarvittaviin tuloksiin nähden, samalla minimalisoimalla ympäristölle haitallista kuormitusta.

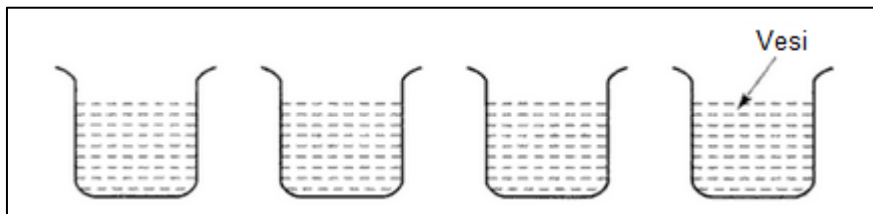
Teoriaosuudessa lukijalle annetaan yleiskäsitys tämänhetkisestä jäähdytystekniikasta, mutta työosuus on rajattu koskemaan lähinnä kotitalouskäyttöön suunnattujen kylmälaitteiden jäähdytysjärjestelmien optimointia.

Työssä suunnitellaan ja mitoitetaan kylmälaite, johon on alkutiedoiksi annettu haluttu sisälämpötila sekä tämän ympäristössä vallitseva lämpötila. Työ on teoreettinen, eikä sisällä empiiristä tutkimusta.

2 KYLMÄTEKNIIKAN JA JÄÄHDYTTÄMISEN KEHITTYMINEN

2.1 Historia

Ihminen on käyttänyt eri tapoja jäähdyttämiseen, tuhansien vuosien ajan. Jo 2500 vuotta ennen ajanlaskun alkua, muinaiset egyptiläiset tuottivat pieniä määriä jäätä, pitämällä vettä huokoisissa ja avonaisissa astioissa yöaikaan (Kuva 1). Veden haihtuminen kylmässä ja kuivassa ilmassa, sekä lämpösäteily kirkkaassa yössä, muodostivat jäätä veden pinnalle, vaikka ympäristössä vallitseva lämpötila oli yli veden jäätymiseen vaadittavan lämpötilan (Prasad 2006).



Kuva 1. Luonnonmukainen, muinainen jään tuotos. (Prasad 2006)

On myös viitteitä siihen että, Kiinassa, 1000 vuotta ennen ajanlaskun alkua, jäätä kerättiin, leikkaamalla sitä jäätyneistä vesistöistä (Prasad 2006).

500 eaa. Muinaiset persialaiset rakensivat aavikolle isoja ”jäävarastoja”, joissa oli vähintään 2 metriä paksut hiekasta, savesta, kananmunan valkuaisista, kalkista, lampaanvillasta ja tuhkasta tehdyllä laastilla valmistetut, hyvin lämpöä eristävät seinämät. Talvella leikattu ja kerätty jää kuljetettiin suurissa erissä näihin tiloihin, joissa sitä voitiin varastoida ympäri vuoden. (Prasad 2006.)

Euroopassa ja Amerikassa rakennettiin 1600- ja 1700-luvulla jään keräystä ja varastointia varten monia ns. ”jäätaloja”, joissa eristeenä käytettiin yleensä sahanpurua, sekä myöhemmin korkkia (Kharagpur s.a, 3).

Suuren mittakaavan liiketoiminnaksi jään keräys ja kaupankäynti kasvoi 1800-luvun alussa, kun uusienglantilainen liikemies nimeltään Frederic Tudor aloitti jään kuljetuksen Pohjois-Amerikan itärannikolta Kuubaan. Seuraavien vuosikymmenten aikana tästä kasvoi maailmanlaajuinen liiketoiminta, jonka suurimpina toimijoina olivat Norja, Yhdysvallat sekä Iso-Britannia. (Kharagpur s.a, 3.)

Vaikkakin on vaikea tehdä tarkkaa rajanvetoa sille, minä ajankohtana luonnonmukaiset jäähdytysmenetelmät kehittyivät keinotekoisiksi, voidaan ehkä merkittävimpana askeleena pitää skottilaisen professori William Cullenin vuonna 1755 esittelemää laitetta, jossa pumppu muodosti tyhjiön dietyylieetteriä sisältävään säiliöön, joka laskee aineen kiehumispistettä. Haihtuva eetteri sirottaa lämpöä ympäröivästä ilmasta, tuottaen pienen määrän jäätä. Laitteelle ei kuitenkaan löytynyt kaupallista käyttöä, mutta se toimi suunnan näyttäjänä sellaisille tiedemiehille kuten Oliver Evans, joka vuonna 1805 suunnitteli ensimmäisen jäähdytyskoneen. (Kharagpur s.a, 5.)

Vuonna 1820 englantilainen tiedemies nimeltä Michael Faraday onnistui ensimmäisenä maailmassa muuttamaan kaasun nestemäiseksi käyttäen korkeaa painetta ja matalaa lämpötilaa. Tämä avasi tien uudelle jäähdytystekniikalle, ja vuonna 1834 englantilainen insinööri nimeltään Jacob Perkins rakensi ensimmäisen toimivan kaasun painetta säätelevän jäähdytyslaitteen. Seuraavan 20 vuoden aikana useat keksijät ja tiedemiehet kehittivät omia jäähdytyslaitteitaan, ja vuonna 1856 englantilainen keksijä nimeltään James Harrison patentoi ensimmäisen käytännöllisen höyrynpuristusprosessiin perustuvan jäähdytyslaitteiston, jossa kylmäaineena käytettiin joko eetteriä, alkoholia tai ammoniakkaa. (Kharagpur s.a, 6.)

Ensimmäiset kaupalliset jääkaapit tulivat markkinoille 1800-luvun loppupuolella, mutta aina vuoteen 1929 asti niissä käytettiin kylmäaineena myrkyllisiä kaasuja kuten kloridia, ammoniakkaa ja rikkidioksidia. Sattui monia kuolemaan johtaneita onnettomuuksia, joissa rikkidioksidia pääsi vuotamaan ulos viallisista jääkaapeista. Näiden seurauksena vuonna 1930 kehitettiin uusi, myrkytön kaasu, nimeltä Freon. Freonia käytettiin kylmälaitteiden kylmäaineena aina vuoteen 1979 asti, jolloin tutkimukset osoittivat sen olevan haitallista otsonikerrokselle. (Keep it Cool Inc. 2005.)

2.2 Nykyaika

Nykyisin jäähdytystekniikalla on monia eri käyttökohteita, joista yleisimmät ovat kotien ja julkisten rakennusten ilmastointi sekä elintarvikkeiden säilytys.

Jäähdytystekniikkaa käytetään hyväksi myös monella eri teollisuuden osa-alueella, esimerkiksi kaasujen nesteyttämiseen ja erottelemiseen, aineiden kiteytämiseen, ilman kuivatukseen, käymisen kontrollointiin sekä erilaisten prosessien ylläpitämiseen. (Singal, L.C. Dr. s.a.)

Yleisesti tiedossa olevan teorian kyseenalaistaminen ja sen tutkiminen sekä teollisuuden kehitys ovat mahdollistaneet jäähdytystekniikan yleistymisen ja saatavuuden lähes kaikkialla maailmassa. Uusien materiaalien, turvalaitteiden, kylmäaineyhdisteiden sekä yleisen tekniikan kehityksen myötä jäähdytysjärjestelmistä on myös saatu huomattavasti edeltäjiään turvallisempia, energiatehokkaampia sekä ympäristöystävällisempiä.

2.3 Tulevaisuus

Ilmaston lämpenemisen havaitsemisen ja sitä seuranneiden Kioton ja Pariisin ilmastositomusten myötä on odotettavaa että, tulevaisuuden jäähdytystekniikan kehityksen painoarvot asettuvat pääosittain energiatehokkuuden sekä ympäristöystävällisyyden parantamiseen.

Suurin osa tämän hetkistä jäähdytysjärjestelmistä perustuu höyrynpuristusprosessiin, jossa eri kemikaalien (kylmäaineyhdisteiden) painetta säätelemällä saadaan lämpöenergiaa siirrettyä paikasta toiseen (Kaappola ym. 2011, 17.) Ja vaikkakin uusien kemikaaliyhdisteiden sekä tekniikan kehityksen myötä tällaisten järjestelmien hyötysuhteet on kasvaneet ja niiden haitallisuus ympäristölle on pienentynyt, etsitään jatkuvasti uusia, tehokkaampia ja vähemmän haitallisia tapoja jäähdyttämisen toteuttamiseksi.

Seuraavaksi tässä työssä käsitellään jäähdytysmenetelmiä, jotka voisivat tämänhetkisen tiedon perusteella olla lupaavimpia vaihtoehtoja höyrynpuristusprosessille.

Magnetokalorinen jäähdytys

Magneetikalorisessa jäähdytyksessä tietynlainen materiaali altistetaan magneettikentälle näin saaden sen atomien dipolit asettumaan linjaan, joka vähentää aineen lämpökapasiteettia. Jäähtyessään materiaali vapauttaa lämpöä. Kun magneettikenttä poistetaan, palautuvat dipolit luonnolliseen tilaansa saaden materiaalin imemään lämpöä ympäristöstä itseensä. Tämän prosessin toistaminen luo kierron, joka on samankaltainen kuin höyryn puristuksessa. (Pecharsky ym. 1999.)

Termoelektrinen jäähdytys

Jossa magneetinkentän sijaan materiaali altistetaan sähkökentälle, saaden aikaan saman ilmiön. Tästä lisää luvussa 3.1.

Joustokalorinen jäähdytys

Joustokalorinen jäähdytys perustuu prosessiin, jossa sopivaa materiaalia venyttämällä tämän rakenne muuttuu ja näin vapauttaa aineen latenttista (piilevää) lämpöä. Kun materiaali vapautetaan jännityksestä, se imee lämpöä ympäristöstään palautuessaan takaisin normaaliin tilaansa. (Schmidt ym. 2016.)

3 JÄÄHDYTYSTEKNIIKAN MENETELMÄT

3.1 Jäähdytysprosessit

Jäähdytys on prosessi, jossa aine tai tila kylmennetään lämpöenergiaa siirtämällä korkeammasta lämpötilasta matalampaan. Jäähdytysmenetelmät voidaan jakaa pääosin avoimiin kertaprosesseihin ja suljettuihin kiertoprosesseihin. (Çengel, Y. A. 2006, 5–6.)

Kertaprosessi

Tällä tarkoitetaan luonnollista, yhdensuuntaista prosessia jossa systeemi ei palaa takaisin alkuperäiseen tilaansa. Tällaista jäähdytysmenetelmää käy-

tään esimerkiksi kylmälaukussa, jossa jäähdytettävä kohde asetetaan laukuun ja lisätään esimerkiksi jäätä tai kylmävaraajia (ns. kylmäkalleja). Jää ja varaajat jäähdyttävät haluttua kohdetta sulaessaan, eivätkä palaakaan enää takaisin alkuperäiseen tilaansa. (Aittomäki 1996, 41.)

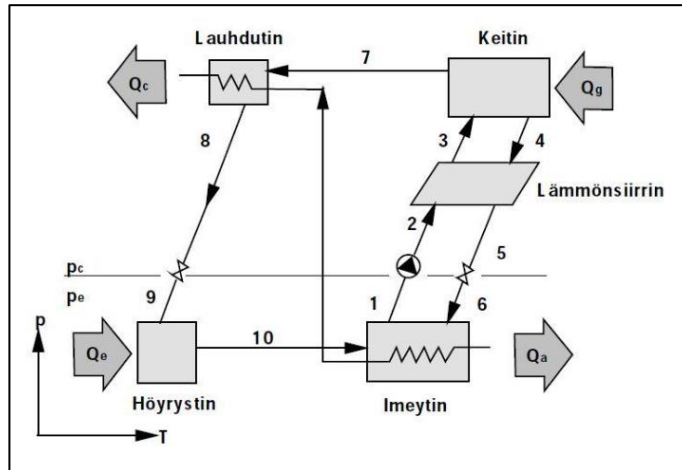
Kiertoprosessi

Kiertoprosessi on suljettu prosessi, johon vaikutetaan ulkopuolisella työllä ja jossa tehdyn työn jälkeen systeemi palaa takaisin alkuperäiseen tilaansa ja toistuu uudelleen. Nämä voidaan jakaa edelleen, pääosittain höyrynpuristusprosessiin, absorptioprosessin ja kaasun kiertoon. (Aittomäki 1996, 22.)

Absorptio

Absorptiojäähdytysprosessi perustuu liuenneen kylmäaineen sekä liuottimen eli absorbentin käyttäytymiseen liuoksena. Tiettyssä paineessa ja lämpötilassa kylmäaineen ja absorbentin välillä vallitsee tasapaino, jota muuttamalla joko lämpötilaa tai painetta säätämällä kaasua joko sitoutuu tai vapautuu. Tässä prosessissa samalla sitoutuu ympäristöstä lämpöä tai sitä vapautuu ympäristöön.

Absorptiojäähdyttimessä kaasumainen kylmäaine ohjataan imeyttimelle, joka sisältää vettä. Kylmäaine liukenee veteen ja sen painetta sekä lämpötilaa nostetaan pumpulla. Tämä vastaa höyrypuristusprosessissa olevan kompressorin tekemään työtä. Seuraavaksi kylmäaine kulkeutuu lauhduttimelle, jossa sen painetta ja lämpötilaa lasketaan, jonka seurauksena lämpöä vapautuu ympäristöön. Lauhduttimelta kylmäaine kulkeutuu paisuntalaitteelle, jossa sen paine ja lämpötila laskevat merkittävästi. Jäähdytetty kylmäaine ohjautuu höyrystimeen, jossa se sitoo lämpöä ympäristöstä itseensä muuttuen jälleen kaasuksi. Tämän jälkeen prosessi toistaa itsensä. Imeytintä joudutaan jäähdyttämään erillisellä vesijäähdytyskierrolla jotta, lauhtumis- ja liukenemislämpö saadaan kompensoitua. Kuvassa 2 esitetään absorptiojäähdyttimen toimintaperiaate. (Aittomäki 1996, 79–87.)



Kuva 2. Absorptiojäähdyttimen toimintaperiaate (Koljonen & Sipilä 1998, 13)

Vaikkakin absorptioprosessiin perustuvat järjestelmät ovat jääneet vähäisempään käyttöön näitä tehokkaampien höyrynpuristusjärjestelmien yleistymisen myötä, käytetään niitä vielä esimerkiksi matkailuautoissa, joissa sähkön käyttö on rajoitettua mutta kaasua on saatavilla.

Kaasun kierto

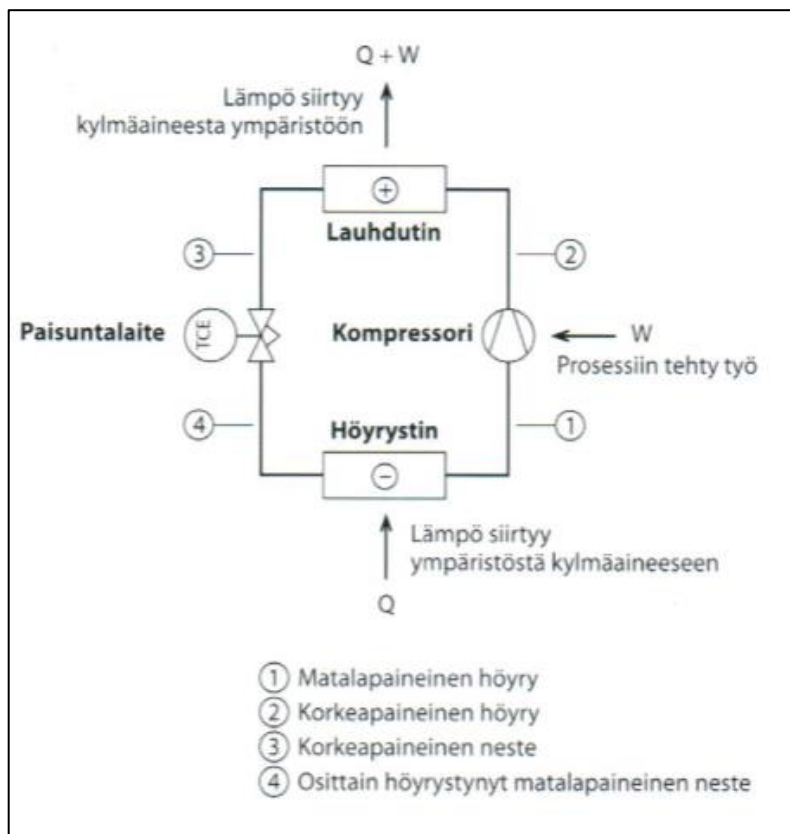
Kaasun kierrolla toimiva jäähdytys on hyvin samanlainen kuin höyryn puristukseen perustuvat järjestelmät. Erona on, että kylmäaine pysyy kaasuna läpi koko kierron. Näin erityistä kylmäaineseosta ei tarvita, vaan yleensä typpi pitoinen ilma on riittävää. Kaasunkiertojärjestelmät ovat kuitenkin vähemmän tehokkaita ja hyvin isokokoisia, höyrynpuristusjärjestelmiin nähden. Mahdollisia käyttökohteita ovat esimerkiksi lentokoneet, joissa korkeapaineista ilmaa on valmiiksi saatavana ja missä erinäisten kemikaalien käyttöä pidetään liian vaarallisena. (Khemani H. 2008.)

Höyrynpuristusprosessi

Höyrynpuristusprosessiin pohjautuvat jäähdytysjärjestelmät ovat eniten käytettyjä järjestelmiä nykypäivänä. Suurin osa kotitalouksien jääkaapeista ja ilmastointijärjestelmistä perustuvat tähän prosessiin.

Tällainen prosessi perustuu järjestelmän sisällä kiertävän kylmäaineen höyryntämiseen ja lauhduttamiseen sen painetta kontrolloimalla. Ensin matalassa

paineessa ja lämpötilassa oleva osittain höyrystynyt kylmäaine kulkeutuu höyrystimeen, jossa se imee itseensä lämpöä ympäristöstä näin saaden kylmäaineen täysin höyrystymään. Tämän jälkeen höyry imetään kompressorille matalapaineisena höyrinä, joka puristaa kylmäaineen korkeampaan paineeseen samalla nostaen aineen lämpötilan. Seuraavaksi höyry johdetaan lauhduttimeen, joka tiivistää höyrin nesteeksi näin saaden sen luovuttamaan lämpöä ympäristöönsä. Neste kulkeutuu edelleen paisuntalaitteeseen jossa kylmäaineen paine ja lämpötila laskevat. Tämän jälkeen prosessi toistaa itsensä. Kuvassa 3 esitellään suljetun höyrinpuristusprosessin kierto. (Kaappola ym. 2011, 17.)

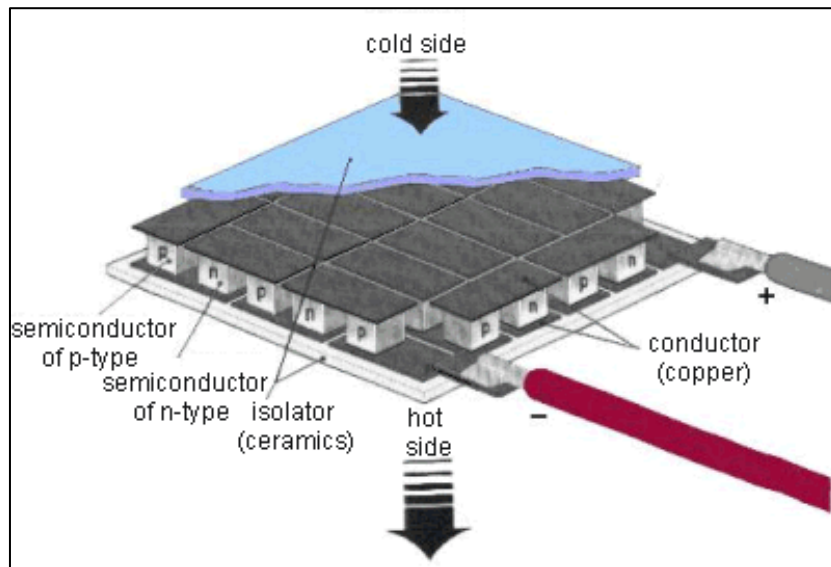


Kuva 3. Suljetun höyrinpuristusprosessin kierto (Kaappola ym. 2011, 17)

Muita jäähdytysmenetelmiä

Muita vähemmän käytettyjä jäähdytysmenetelmiä on esimerkiksi termoelektrinen jäähdytys, joka perustuu *Peltier efektiin*.¹ jossa kahden johdinmateriaalin liittymäkohtaan ohjattaessa sähkövirtaa voidaan tuottaa tai poistaa lämpöä. Kuvasta 4 selviää termoelektrisen jäähdyttimen rakenne (S. H. Price 2007).

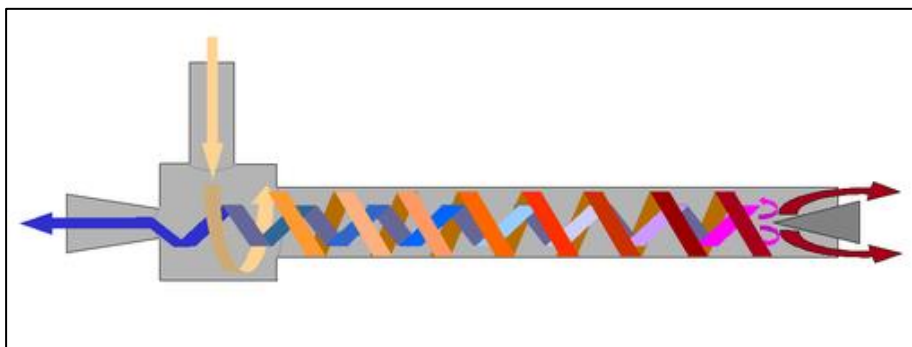
¹ Jean Peltierin vuonna 1834 havaitsema termoelektrinen ilmiö



Kuva 4. termoelektrisen jäädyttimen rakenne (S H Price, 2007)

Tällainen jäädytyn ei ole kovin tehokas, mutta tekniikkaa käytetään esimerkiksi autojen kylmälaukuissa ja mikroprosessorien jäädyttämiseen tietokoneissa (S H Price 2007).

Toinen harvinaisempi jäädytysmenetelmä on nimeltään Vortex-putki. Tämä on mekaaninen laite joka erottaa paineistetun kaasun kylmäksi ja lämpimäksi virtaukseksi. Paineistettu kaasu syötetään pyörrekammioon ja kiihdytetään nopeaan kierto- liikkeeseen. Kammion päässä olevan kartiomaisen suuttimen vuoksi, ainoastaan uloimmilla reunoilla oleva kaasu pääsee ulos putkesta. Loput ohjataan takaisin kammioon sisempää osaa pitkin. Palautuessaan kaasu vapauttaa lämpöä, joka ohjautuu ulompaan ilmavirtaan ja edelleen ulos putkesta. Kuvasta 5 selviää Vortex-putken toimintaperiaate. (Aittomäki 1996, 53.)



Kuva 5. Vortex-putken toimintaperiaate (R. K. Pandey 2015)

3.2 Jäähdytyskoneiden komponentit

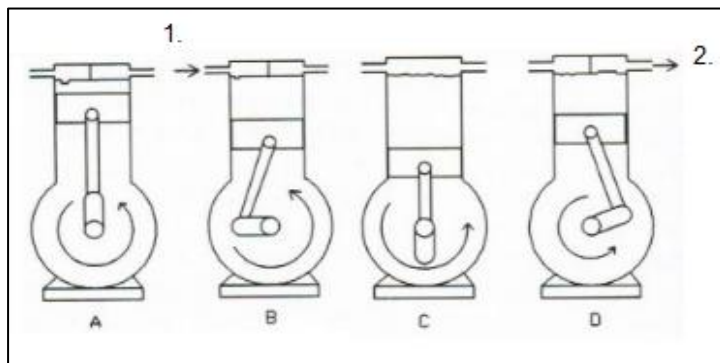
Kompressori

Kompressori on mekaaninen laite, jonka avulla kaasun tai höyryn painetta nostetaan, puristamalla niiden tilavuutta pienemmäksi. Nostamalla kylmäaineen painetta kompressori myös takaa aineen kierron koko prosessin lävitse (Nydal, R. 1994, 150).

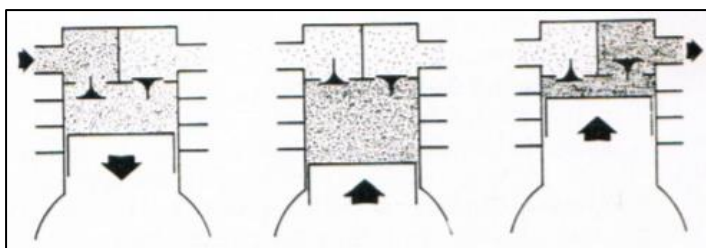
Yleisimpiä jäähdytysjärjestelmissä käytettäviä kompressorityyppejä ovat mäntä-, ruuvi-, ja kierukka- eli scroll-kompressorit.

Mäntäkompressori

Mäntäkompressori on kompressorityyppi, jossa höyry imetään ensin imuventtiilin kautta sylinteriin, jossa kampaiksiin liitetty mäntä puristaa tilavuuden pienemmäksi. Tämän jälkeen korkeapaineinen höyry ohjautuu poistoventtiiliin kautta painesäiliöön tai vaihtoehtoisesti toiseen sylinteriin, jossa höyryä puristetaan lisää (Airila ym. 1983, 18). Kuvat 7 ja 8 kuvaavat männän eri asentoja sylinterissä sekä imu- ja poistoventtiilien toimintaa.



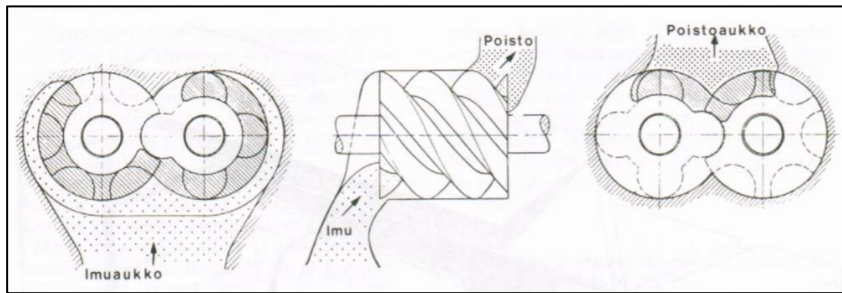
Kuva 7. Männän asennot sylinterissä (Nydal, R. 1994, 152)



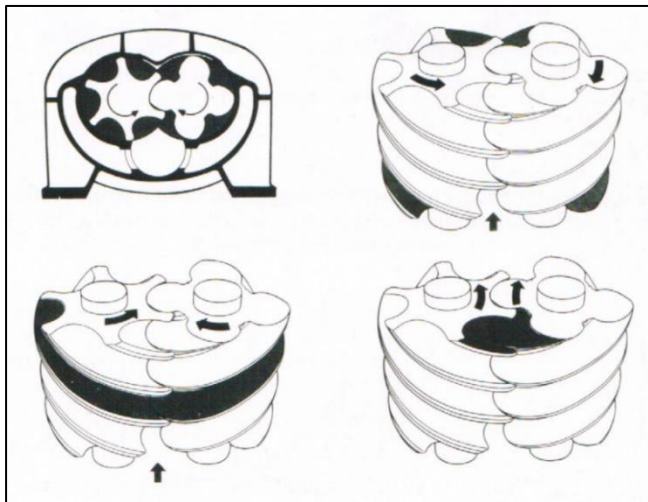
Kuva 8. Imu- ja poistoventtiilien toiminta (Nydal, R. 1994, 151)

Ruuvikompressori

Ruuvikompressorissa höyry tai kaasu puristuu kahden roottorin eli ruuvin ja luistin väliin jäävässä tilassa. Höyry imeytyy sisään rungossa olevasta imuaukosta, kun roottorin urat ovat oikealla kohdalla. Roottorien jatkaessa pyörimistä, ne sulkevat imuaukon ja sisällä oleva höyry jää roottorien väliin. Kun välissä oleva tila alkaa pienentyä roottorien pyöriessä, myös höyryn tilavuus pienenee. Kun höyry on saavuttanut tarvittavan paineen, se kulkeutuu kompressorin toisesta päästä ulos. (Airila ym. 1983, 18.) Kuvista 9 ja 10 ilmenee ruuvikompressorin imu- ja poistoaukkojen sijaintia sekä kaksiroottorisen ruuvikompressorin toimintaperiaate.



Kuva 9. Ruuvikompressorin imu- ja poistoaukkojen sijainti (Airila ym. 1983, 34)

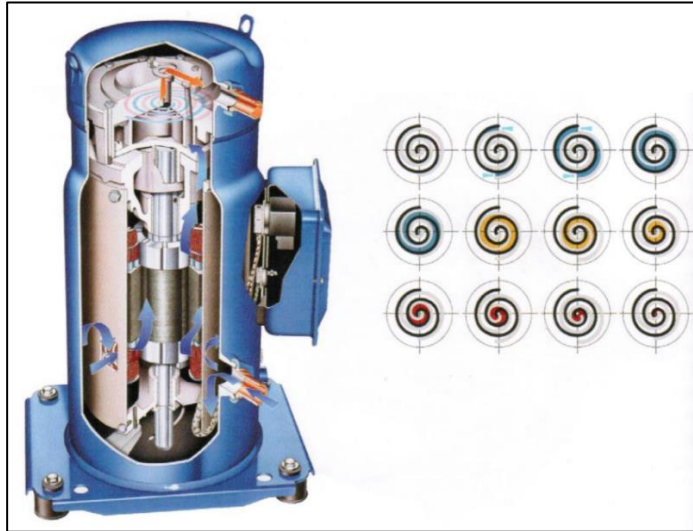


Kuva 10. Kaksiroottorisen ruuvikompressorin toimintaperiaate (Aittomäki 1996, 151)

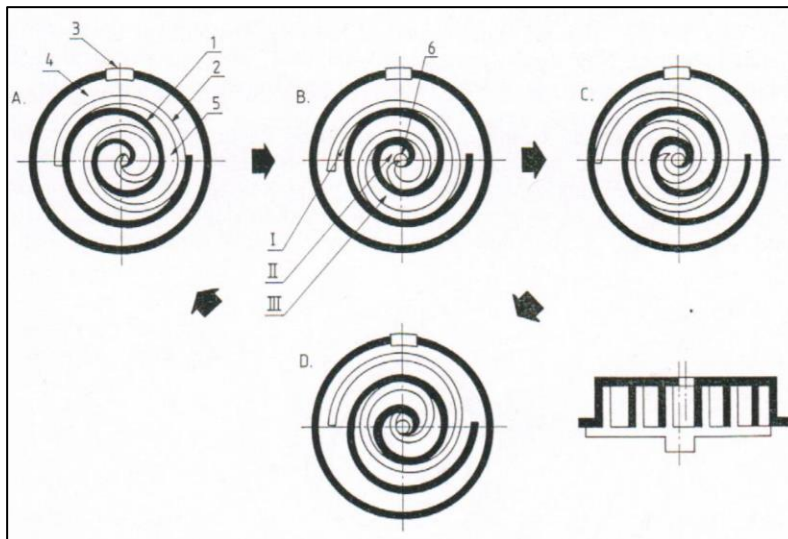
Scroll-kompressor

Scroll-kompressorissa puristus tapahtuu kahden lomittain olevan kierukan välissä. Toinen kierukoista on kiinteä ja toinen pyörii ns. toisen sisällä välillä koskettaen toisiinsa. Näiden väliin syntyy perättäisiä kammioita jotka pienentyvät kierukoiden pyöriessä. Väliin jäänyt höyry tai kaasu puristuu tiiviimmäksi.

Scroll-kompressoreissa ei ole erillisiä imu- tai poistoventtiilejä, vaan höyry imeytyy imuportin kautta suoraan imukammioon ja kun höyry on saavuttanut tarvittavan paineen, se poistuu paineportin kautta automaattisesti (Aittomäki 1996, 150). Kuvissa 11 ja 12 esitetään scroll-kompressorin rakenne, höyryn suuntaus sekä sen perus toimintaperiaate.



Kuva 11. Scroll-kompressorin rakenne ja höyryn suuntaus (Kaappola ym. 2011, 54)



Kuva 12. Scroll-kompressorin toimintaperiaate. 1 kiinteä kierukka, 2 kiertävä kierukka, 3 imuportti, 4 imukammio, 5 puristustila, 6 paineportti. I imutila sulkeutuu, II puristustila avautunut, III puristus käynnissä (Aittomäki 1996, 150).

Suurin osa kompressoreista toimii ns. päällä/pois-tekniikalla, joka tarkoittaa että, kompressorin pyörii tietyllä vakionopeudella sammuen kun tarvittava lämpötila on saavutettu ja käynnistyy uudelleen kun siihen liitetty termostaatti il-

moittaa jäähdytettävän kohteen lämpötilan nousseen liian korkeaksi. Osa laitevalmistajista on tuonut markkinoille myös invertterikompressoreja, joissa pyörimisnopeus on säätävä. Tällaiset kompressorit ovat hyvin tehokkaita, koska ne kontrolloivat lämpötilaa pyörimisnopeutta säätämällä, eikä niiden käynnistämiseen kulu ylimääräistä energiaa (Secop 2012). Invertteriteknikkaa käyttävät kompressorit ovat kuitenkin vielä vähäisessä käytössä näiden suhteellisen korkean hinnan vuoksi.

Kompressorit on suunniteltu puristamaan kaasumaista ainetta. Saapuessaan kompressorin imupuolelle kylmäaineessa ei saa olla yhtään nestettä, koska tämä voi vahingoittaa kompressoria. Tämän takia käytetään tulistusta. Tulistus tarkoittaa kylmäaineen lämmittämistä täysin kaasumaiseen muotoon niin, että sen lämpötila nostetaan sen kiehumispistettä korkeammaksi. Tulistamisen säätö tapahtuu paisuntalaitetta säätämällä (Y. A. Çengel 2006, 115).

Lauhdutin

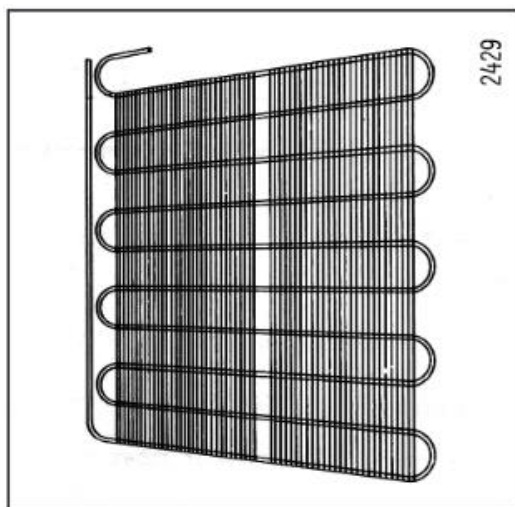
Lauhdutin on jäähdytysjärjestelmän komponentti, jonka tehtävä on poistaa lämpöä järjestelmästä joko nesteeseen tai ympäröivään ilmaan, sekä lauhduttaa höyrystynyt kylmäaine takaisin sen nestemäiseen muotoon.

Lauhduttimet voidaan jakaa vesilauhduttimiin sekä ilmalauhduttimiin. Tässä työssä käydään tarkemmin läpi vain ilmalauhduttimien toimintaa, koska ne ovat merkityksellisiä varsinaisessa työosuudessa.

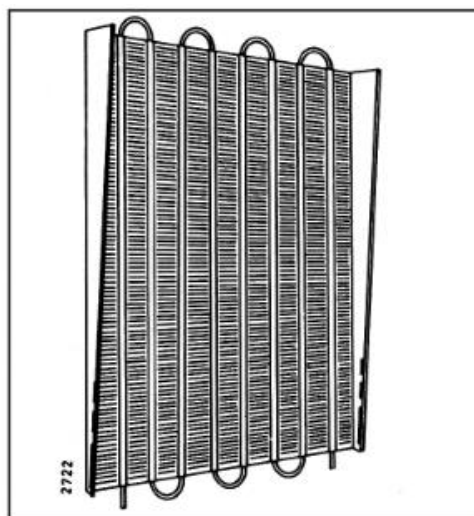
Ilmalauhduttimet voidaan jakaa edelleen staattisesti kylmennettäviin sekä tuulettimella kylmennettäviin lauhduttimiin. Staattisesti kylmennettävissä lauhduttimissa jäähdytys syntyy lämpötilaerojen aiheuttaman paine-eron avulla. Tällaiset lauhduttimet ovat suunniteltu pienemmille jäähdytysjärjestelmille kuten kotitalouksien jääkaapit ja pakastimet. Isommissa jäähdytysjärjestelmissä on tarpeellista käyttää tuulettimella kylmennettäviä lauhduttimia, jotta lauhduttimen koko pysyy kohtuullisena (Secop 2016).

Staattisesti kylmennettävät lauhduttimet voidaan jakaa ns. kuorityyppisiin lauhduttimiin joita käytetään pääosin arkkupakastimissa, sekä takaosalauhduttimiin jotka ovat yleisimpiä jääkaapeissa käytettäviä lauhduttimia.

Takaosalauhdutin tyyppejä on lanka-putkilauhdutin sekä putkilevylauhdutin (kuvat 13 ja 14).



Kuva 13. Lanka-putkilauhdutin (Secop 2016)



Kuva 14. Putkilevylauhdutin (Secop 2016)

Paisuntalaite

Paisuntalaitteen tehtävänä on jäähdyttää kiertävä kylmäaine tarvittavan alhaiseksi ennen sen kulkeutumista höyrystimelle. Jäähdytys tapahtuu kylmäaineen painetta laskemalla, mikä laskee kylmäaineen kiehumispistettä näin saaden kylmäaineen höyrystymään laskien tämän lämpötilaa. Suuremmissa jäähdytysjärjestelmissä paisuntalaitteena käytetään yleensä paisuntaventtiiliä, joka säätelee kylmäaineen ruiskutusta höyrystimelle. Pienemmissä, kotitalouksien jäähdytyslaitteissa, paisuntalaitteena toimii yleensä kapillaariputki, joka on ohut, noin 6 mm paksu kupariputki, jonka lävitse kylmäaine kulkeutuu. Kun kylmäaine kulkeutuu putken päästä ulos, kulkeutumiskanava suurenee huomattavasti ja näin kylmäaineen paine putoaa samalla laskien kylmäaineen lämpötilaa. Tarvittavan kylmätehon ja putken sisähalkaisijan perusteella määritellään putken pituus, joka varmistaa tarvittavan painehäviön. Mitoittamiseen ei löydy suoraa laskentakaavaa, vaan mitoitus tapahtuu kokeilemalla. (Nydal, R. 1994, 107–108.)

Joidenkin kylmäaineiden kohdalla mahdollisimman hyvän järjestelmän tehokkuuden takaamiseksi voidaan lauhduttimen ja kapillaariputken väliin asentaa ylimääräinen lämmönvaihtaja kylmäaineen alijäähdyttämistä varten (Kaappola ym. 2011, 69).

Höyrystin

Höyrystin on lämmönsiirrin, jossa matalan kiehumispisteen omaava höyrystynyt kylmäaine alkaa kiehua samalla imien itseensä lämpöä ympäristöstä näin jäähdyttäen haluttua tilaa.

Höyrystimet voidaan jakaa rakenteeltaan putkihöyrystimiin, ns. evähöyrystimiin sekä levyhöyrystimiin. Putkihöyrystimet ovat yksikertaisia kupari- tai teräsputkikierukoita joiden sisällä kylmäaine kulkeutuu. Evähöyrystimissä putkikierukan ympärille on lisätty ohuita metallilevyjä lämmönsiirron tehostamiseksi. Yleisimmin käytössä olevassa levyhöyrystimissä putkikierukka on sijoitettu kahden alumiinilevyn väliin. (Kaappola ym. 2011, 59.)

Muita komponentteja

Jäähdytysjärjestelmissä muita tarvittavia komponentteja ovat esimerkiksi termostaatit, jotka ovat lämpöohjattuja kytkimiä, joilla tarvittaessa käynnistetään kompressorin lämpötilan noustessa liian suureksi. Toinen merkittävä järjestelmän osa on putkisto, jonka tehtävänä on kuljettaa kylmäaine komponentilta toiselle. Putkisto koostuu yleensä kupari- tai teräsputkista. Sellaisissa järjestelmissä, joissa kompressorin tarvitsee öljyä voiteluun, voidaan käyttää myös öljynerotinta ja öljynpalautusjärjestelmää. Öljynerottimella minimoidaan öljyn kiertämistä kylmäaineen mukana. Suodatinkuivain on myös jäähdytysjärjestelmän mahdollinen osa, jolla sidotaan järjestelmässä olevia epäpuhtauksia kuten vettä tai happoja. (Kaappola ym. 2011, 61–74.)

Materiaalit ja eristys

Nykypäivän jääkaappi koostuu jäähdytysjärjestelmän lisäksi ulkokuoresta ja ovesta, kaapin sisäosasta tai vuorauksesta sekä eristeestä näiden välissä. Ulkokuori ja ovi ovat yleisesti valmistettu alumiini- tai teräslevystä jotka tuovat kaapin rakenteeseen jäykkyyttä ja kestävyyttä. Sisäosa valmistetaan yleisesti polyuretaani- sekä polystyreenimuovista, jotka valetaan haluttuun muotoon.

Jotta järjestelmässä ilmenevät lämpöhäviöt olisivat mahdollisimman pieniä, tulee jäähdytettävä tila olla tehokkaasti eristetty. Nykypäivän jääkaapeissa yleisin eristysmateriaali on polyuretaanivaahdo, joka ruiskutetaan sisä- ja ulkokuoren väliin. Polyuretaani on suosittu ja tehokas eritysmateriaali, koska sillä on suuri lämmönvastus, eli sen lämmönjohtavuus on matala ja sen hinta on verrattain edullinen. Kovettuessaan polyuretaani antaa myös lisää jyrkyyttä kaapille. Lämpöhäviöiden minimoimiseksi on myös tärkeää tiivistää oven ja kaapin välit mahdollisimman tehokkaasti (Melo 2012).

3.3 Kylmäaineet

Tämän luvun kuvaus kylmäaineesta perustuu Kaappolan ym. (2011) kylmätekniikan kiertoprosessi -lukuun. Kylmäaineet ovat kaasuseoksia, jotka toimivat lämmönsiirtäjinä kiertoprosessi jäähdytysjärjestelmissä. Tämä perustuu niiden kykyyn muuttaa olomuotoaan nestemäisestä kaasumaiseksi ja päinvastoin, painetta ja lämpötilaa säätelämällä. Kun kylmäaine muuttuu nestemäisestä kaasumaiseksi, se sitoo lämpöä ympäristöstä itseensä. Kun taas muuttuessaan kaasumaisesta nestemäiseksi, se vapauttaa lämpöä ympäristöönsä.

Kylmäaineen ominaisuudet

Vaikkakin kylmäaineen ominaisuudet riippuvat suuresti tähän vaikuttavasta paineesta ja lämpötilasta, voidaan hyvän kylmäaineen ominaisuudet jaotella sen termodynaamisiin, kemiallisiin ja fysiologisiin ominaisuuksiin jotka ovat esitelty taulukoissa 1, 2 ja 3 seuraavasti:

Taulukko 1. Kylmäaineen termodynaamiset ominaisuudet (Kaappola ym. 2011, 31–32.)

Ominaisuus	Hyöty
suuri höyrystymislämpö	pieni massavirta, pieni kompressorin koko, pieni putkikoko
pieni kompressorin painesuhde	pieni puristustyö, vähäinen tulistuminen puristuksessa
pieni viskositeetti	painehäviöt venttiileissä ja putkistoissa pienet
hyvät lämmönsiirto ominaisuudet	pieni lämmönsiirtopinta-alan tarve
suuri tilavuustuotto	kompressorin pieni koko

Taulukko 2. Kylmäaineen kemialliset ominaisuudet (Kaappola ym. 2011, 31–32.)

Ominaisuus	Hyöty
stabiilius	suuri käyttölämpötila- alue
ei- aktiivinen reagoitokyky	hyvä käytettävyys eri materiaalien kanssa
palamattomuus	käytön turvallisuus
liukenevuus käytettävään öljyyn	hyvä öljynpalautuminen kompressorille

Taulukko 3. Kylmäaineen fysiologiset ominaisuudet (Kaappola ym. 2011, 31–32.)

Ominaisuus	Hyöty
myrkyttömyys	käytön turvallisuus
vähäinen ärsyttävyys iholle ja limakalvoille	käytön turvallisuus
haittaamattomuus jäähdytettävälle tavaralle	vähäinen tuotehävikki vuotojen yhteydessä
vuotojen helppo havaittavuus	käytön turvallisuus, helpottaa huoltotoimenpiteitä

Näiden ominaisuuksien lisäksi kylmäaineiden tulisi olla ympäristöystävällisiä.

Kylmäaineissa ympäristöystävällisyyteen viitattaessa tarkoitetaan yleensä näiden haitallisuutta otsonikerrokselle sekä näiden potentiaalia kasvihuoneilmiön lisäämiseksi.

Otzone Depletion Potential- eli ODP-luku

Kylmäaineen ODP-luvulla ilmoitetaan tämän suhteellinen haitallisuus otsonikerrokselle. Referenssilukuna käytetään kylmäaineen R-11-lukua, joka on arvoltaan 1,0.

Global Warming Potential- eli GWP-luku

GWP-luku ilmaisee kylmäaineen suhteellisen kasvihuonehaitallisuuden. Referenssiaineena käytetään hiilidioksidia (CO₂). Jonka GWP-luku on 1,0.

Kylmäaineiden jaottelu

Kylmäaineet voidaan jaotella moniin eri ryhmiin, esimerkiksi niiden höyrystymis- ja lauhtumisominaisuuksien mukaan, jolloin ne määritellään joko yksikomponenttisiksi kylmäaineiksi, jotka koostuvat vain yhdestä aineesta ja joiden höyrystyminen ja lauhtuminen tapahtuvat vakioämpötilassa. Toiseksi ne voidaan määritellä atseotrooppisiksi kylmäaineiksi, jotka ovat kahdesta tai useammasta yksikomponenttisestä kylmäaineesta koostuvia seoksia ja joiden höyrystyminen ja lauhtuminen tapahtuvat vakioämpötilassa. Tällaisten kylmäaineiden tunnus alkaa numerolla 5. Kolmanneksi ne voidaan määritellä tseotrooppisiksi kylmäaineiksi, jotka koostuvat kahdesta tai useammasta yksikomponenttisestä kylmäaineesta, joiden höyrystymisen ja lauhtumisen yhteydessä lämpötila muuttuu. Tseotrooppisten kylmäaineiden tunnus alkaa numerolla 4.

Yksikomponenttiset kylmäaineet voidaan jakaa edelleen ryhmiin, niiden kemiallisen koostumuksen perusteella. Valtaosa kylmäaineista koostuu orgaanisesta kemiasta tunnettuihin hiilivetyihin, joiden vetyatomeja on keinotekoisesti korvattu halogeenimolekyyleillä. Tällaisia molekyylejä ovat fluori-, kloori-,

bromi- ja jodimolekyylit. Alkuperäisen hiilivedyn perustella yksikomponenttiset kylmäaineet voidaan jaotella metaani-, etaani-, propaani ja eteeniryhmiin. Myös muita kylmäaineita on olemassa, jotka voidaan jakaa joko, sekalaisiin orgaanisiin yhdistelmiin, orgaanisiin rengasyhdisteisiin, epäorgaanisiin yhdisteisiin tai atseo- ja tseostrooppisiin kylmäaineseoksiin.

Seuraavaksi käydään läpi kylmäaineiden lainsäädännöllinen jaottelu.

Chloro-Fluoro-Carbon- eli CFC-kylmäaineet

Nämä ovat kokonaan halogenoituja hiilivetyjä, eivätkä sisällä lainkaan vetyä. Ne koostuvat kloorista, fluorista ja hiilestä. CFC-ryhmään kuuluvat kylmäaineet ovat hyvin haitallisia otsonikerrokselle ja näiden potentiaali kasvihuoneilmiön lisäämiseksi on merkittävä. Joten näiden ODP- ja GWP-luvut ovat suuria.

Hydro-Chloro-Fluoro-Carbon- eli HCFC-kylmäaineet

Nämä ovat osittain halogenoituja hiilivetyjä jotka koostuvat vedystä, kloorista, fluorista sekä hiilestä. Pieni ODP-luku mutta suuri GWP-luku.

Hydro-Fluoro-Carbon- eli HFC-kylmäaineet

Nämä ovat osittain halogenoituja hiilivetyjä jotka koostuvat fluorista, hiilestä ja vedystä. Nämä kylmäaineet ovat haitattomia otsonikerrokselle mutta näiden potentiaali kasvihuoneilmiön kiihdyttämiseksi on suuri. ODP-luku on 0, GWP-luku on suuri.

Per-Fluoro-Carbon- eli PFC-kylmäaineet

Nämä ovat kokonaan halogenoituja hiilivetyjä, jotka sisältävät fluoria ja hiiltä. Näiden ODP-luku on 0, GWP-luku on suuri.

Näiden lisäksi on myös kylmäaineita, jotka eivät sisällä lainkaan halogeenimolekyylejä. Näitä kutsutaan luonnonmukaisiksi kylmäaineiksi.

Tällaisia aineita esiintyy luonnossa sellaisenaan ja nämä ovat lähes täysin ympäristöystävällisiä. Luonnonmukaiset kylmäaineet voidaan jakaa **HC-kylmäaineisiin**, jotka ovat puhtaita hiilivetyjä ja joiden ODP-luku on 0 ja GWP-luku 0 tai lähes 0, sekä **epäorgaanisiin** kylmäaineisiin, jotka ovat puhtaita epäorgaanisia yhdisteitä joiden ODP-luku on 0 ja GWP-luku on 0 tai lähes 0.

3.4 Energiatehokkuuden optimointi

Energiaviraston (energiavirasto s.a.) mukaan: "--Energiatehokkuus tarkoittaa energian tehokasta käyttöä ja kasvihuonepäästöjen vähentämistä kustannustehokkaalla tavalla."

Jäähdytysjärjestelmissä mahdollisimman hyvän energiatehokkuuden takaamiseksi tulee järjestelmän osien olla optimaalisia niiltä vaadittavaan työhön nähden. Esimerkiksi jos kompressorin teho on liian suuri tarvittavaan jäähdytystehoon nähden tai eristyksen ollessa puutteellinen, kuluu energiaa hukkaan. Myös asianmukaisen kylmäaineen valinta on erityisen tärkeää, ensinnäkin ympäristöystävällisyyden vuoksi, mutta myös että sen ominaisuudet ovat optimaalisia haluttuun järjestelmään nähden.

4 JÄÄHDYTYSJÄRJESTELMÄN SUUNNITTELU

Työssä tehdään esimerkkisuunnitelma kotitalouskäyttöön sopivalle, yksioviselle jääkaapille, johon ei kuulu pakastinta eikä pakastelokeroa. Jääkaapin sisällä vallitsevaksi lämpötilaksi halutaan 5 °C, huoneenlämmön ollessa 25 °C. Jäähdytys tapahtuu höyrynpuristusprosessiin pohjautuvalla jäähdytysjärjestelmällä.

Jotta lämpöä voidaan siirtää aineesta tai kappaleesta toiseen täytyy näiden välillä olla lämpötilaero. Termodynamiikan 0. pääsäännön mukaan lämpötilaero pyrkii aina tasopainotilaan, eli lämpötilat yrittävät tasoittua. Termodynamiikan 2. pääsäännön mukaan tämä lämmön siirtyminen tapahtuu aina yksisuuntaisesti korkeammasta lämpötilasta matalampaan. (Kaappola ym. 2011, 250.)

Jäähdytysjärjestelmää suunniteltaessa tämä tarkoittaa että, järjestelmän lauhdumislämpötila täytyy olla huoneenlämpöä korkeampi, jotta kylmäaine luovuttaa lämpöä lauhduttimessa ympäristöönsä ja vastakkaisesti taas järjestelmän höyrystymislämpötilan tulee olla jääkaapin sisällä vallitsevaa lämpötilaa matalampi, jotta höyrystimessä oleva kylmäaine sitoo lämpöä itseensä.

Vaikka ihanteellisissa olosuhteissa riittäisi lämmönsiirron mahdollistamiseksi 0,1 °C lämpötilaerot, tulee suunnittelussa ottaa huomioon mahdolliset lämpötilojen vaihtelut esimerkiksi sellaisissa tiloissa, joissa huoneen lämpötilan nousua ei pystytä kontrolloimaan ilmastoinnin avulla.

Höyrystimen ja halutun lämpötilan välisen eron ei tarvitse olla huomattavan iso, mutta muutaman asteen ero on suotavaa. Lauhduttimelle kannattaa kuitenkin asettaa vähintään 12 °C keskiarvoista huoneenlämpöä korkeampi toimintalämpötila, koska kesällä huoneenlämmöt ja ilmankosteus voivat nousta huomattavasti. (Emerson 2006, 16–2,16–3.)

Jääkaapille annetut alkuarvot:

ulkomitat:	1000 x 600 x 595 mm (K x L x S)
sisämitat:	530 x 525 x 510 mm
kompressoritila:	390 x 315 x 280 mm
sisätilavuus:	142 l
ulkokuori:	alumiinilevy, 2 mm
sisäosa:	polystyreenimuovi, 2 mm
eristysmateriaali:	polyuretaanivaaho
eristyksen paksuus:	35 mm
ovien tiivistemateriaali:	PVC-muovi
tiivisteiden paksuus:	10 mm
tiivisteiden leveys:	20 mm
haluttu lämpötila:	5 °C
huoneen lämpötila:	25 °C
Lauhduttimen lämpötila:	37 °C
Höyrystimen lämpötila:	0 °C

4.1 Lämpökuorma

Jotta jääkaapin sisätila saadaan jäähdytettyä haluttuun lämpötilaan, tulee määrittää tähän tarvittava jäähdytysteho. Vallitsevaan lämpötilaan ja edelleen tarvittavaan jäähdytystehoon vaikuttavat jääkaappiin kohdistuvat ulkoiset tekijät, joiden summaa kutsutaan lämpökuormaksi. Lämpökuorma koostuu lämpöhäviöistä sekä tuotekuormasta. (Nydal, R. 1994, 26.)

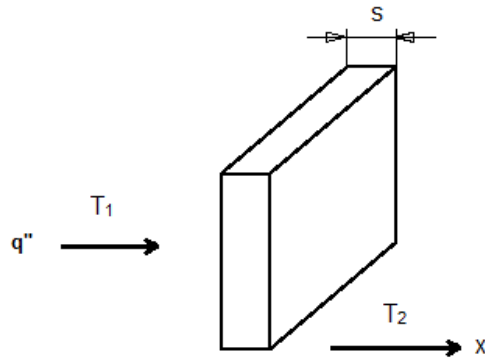
Isompia kylmäkoneistoja, esimerkiksi kylmiöitä tai kylmälaitoksia suunniteltaessa tulisi ottaa huomioon myös ilmastoinnista ja ilmanvaihtuvuudesta sekä muista laitteista kuten lampuista ja mahdollisista sähkömoottoreista koituvat kuormat. Tämän kokoluokan kylmälaitteen suunnittelussa näitä lisäkuormia ei tarvitse huomioida. (Nydal, R. 1994, 51.)

Lämpöhäviöiden määrittäminen

Tässä tapauksessa jäähdytyksessä tapahtuvilla lämpöhäviöillä tarkoitetaan sitä lämmön määrää eli lämpövirtaa, joka siirtyy johtumalla jääkaapin rakenteiden läpi jäähdytettävään tilaan. Lämpövirran suuruuteen vaikuttavat lämpötilan muutos, rakenteiden mittasuhteet sekä rakenteissa käytettävien materiaalien lämmönjohtavuus. (Kaappola ym. 2011, 250.)

Koska ulkokuoren ja sisäosan valmistettuun käytettävien materiaalien lämmönjohtavuus on huomattavasti suurempi kuin näiden välissä käytettävän eristeen lämmönjohtavuus, voidaan nämä unohtaa lämpövirtoja laskettaessa.

Johtumalla tapahtuvaa lämmön siirtymistä voidaan havainnollistaa yksinkertaisella kappaleella, jonka pintoihin vaikuttaa erisuuruiset lämpötilat (kuva 15).



Kuva 15. Yksisuuntaisen johtumisen periaate (Kaappola ym. 2011, 251)

Kappaleeseen muodostuu x -suuntaan kulkeva lämpövirta, jota kutsutaan nimellä lämpövirran tiheys, q'' . Lämpövirran tiheydelle on johdettavissa kaava (1), jonka avulla lämpövirta voidaan määrittää.

Lämpövirran tiheys voidaan määrittää kaavalla 1.

$$q'' = \lambda \frac{\Delta T}{s} \quad (1)$$

Jossa	q''	lämpövirran tiheys	[W/m ²]
	λ	kappaleen lämmönjohtavuus	[W/m·K]
	ΔT	lämpötilaero	[K]
	s	kappaleen paksuus	[m]

Kertomalla lämpövirran tiheys kappaleen pinta-alalla, saadaan selville kappaleen läpi kulkeutuva lämpövirta kaavasta 2.

$$H = q''A \quad (2)$$

jossa	H	lämpövirta	[W]
	q''	lämpövirran tiheys	[W/m ²]
	A	kappaleen pinta-ala	[m ²]

Kaava voidaan johtaa edelleen muotoon:

$$H = \lambda \frac{\Delta T}{s} A \quad (3)$$

Jääkaapin seinämien, oven sekä tiivisteiden läpi johtuva lämpövirta saadaan selville käyttämällä kaavaa 3.

Koska vastakkaisiin seinämiin kohdistuvien lämpövirtojen suurus on sama, ei jokaisen seinämän lämpövirtaa tarvitse laskea erikseen, vaan riittää kun kertoo toisesta saadun tuloksen kahdella.

$$H_{\text{ovi+takaseinä}} = 0,026 \frac{W}{m} K \cdot \frac{(25 - 5) K}{0,035 m} \cdot (0,525 \cdot 0,530) m \cdot 2 = 4,134 W$$

$$\cdot H_{\text{sivut}} = 0,026 \frac{W}{m} K \cdot \frac{(25-5)K}{0,035 m} \cdot (0,530 \cdot 0,510) m \cdot 2 = 8,031 W$$

$$H_{\text{katto+pohja}} = 0,026 \frac{W}{m} K \cdot \frac{(25 - 5) K}{0,035 m} \cdot (0,525 \cdot 0,510) m \cdot 2 = 7,956 W$$

$$H_{\text{tiivisteet}} = 0,10 \frac{W}{m} K \cdot \frac{(25 - 5) K}{0,01 m} \cdot [0,02 \cdot (0,525 + 0,530)] m \cdot 2 = 8,440 W$$

Kokonaislämpövirta saadaan laskemalla seinämiin kohdistuvat lämpövirrat yhteen.

$$\begin{aligned} H_{\text{kokonais}} &= H_{\text{ovi}} + H_{\text{sivut}} + H_{\text{katto}} + H_{\text{takaseinä}} + H_{\text{pohja}} + H_{\text{tiivisteet}} \\ &\approx 28,5 W \end{aligned}$$

Johtumisesta koituvien lämpövirtojen kompensoimiseen tarvittavan lämpötehon tarve on n. 28,5 W.

Tuotekuorman määrittäminen

Tuotekuormalla tarkoitetaan tarvittavan lämpömäärää, joka kuluu tietyn kohteen kylmentämiseen. Jotta saadaan laskettua jäädytettävä tuotekuorma, pitää olla tiedossa tuotteen ominaislämpökapasiteetti. Taulukosta 4 selviää kuuden yleisen elintarvikkeen ominaislämpökapasiteetti.

Taulukko 4. Elintarvikkeiden ominaislämpökapasiteetti (Çengel Y. A. 2006)

Tuote	Ominaislämpökapasiteetti [kJ/kg·K]
kananmuna 60 g	3,32
margariini	2,08
kana	3,32
naudan ulkofilee	2,72
täysmaito	3,79
banaani	3,35

Tietyn aineen jäähdyttämiseen kuuluva lämpömäärä saadaan laskettua kaavasta 4.

$$Q_{tuote} = mc_p \Delta T \quad (4)$$

jossa	Q_{tuote}	lämpömäärä	[J]
	m	tuotteen massa	[kg]
	c_p	ominaislämpökapasiteetti	[J/kg·K]
	ΔT	lämpötilan muutos	[K]

Jäähdytettäviksi tuotteiksi valitaan 12 kananmunaa, 500 g margariinia, 3 kg kanaa, 2 kg nautaa, 3 l täysmaitoa ja 2 kg banaaneja. Oletetaan että tuotteet ovat huoneenlämpöisiä. Lasketaan tuotteiden jäähdyttämiseen kuluva lämpömäärä kaavalla 4.

$$Q_{kananmuna} = 0,06 \text{ kg} \cdot 3230 \text{ J/kgK} \cdot (25 - 5)^\circ\text{C} \cdot 12 = 46\,512 \text{ J}$$

$$Q_{margariini} = 0,5 \text{ kg} \cdot 2930 \text{ J/kgK} \cdot (25 - 5)^\circ\text{C} = 29\,300 \text{ J}$$

$$Q_{kana} = 2 \text{ kg} \cdot 3320 \text{ J/kgK} \cdot (25 - 5) = 132\,800 \text{ J}$$

$$Q_{nauta} = 2 \text{ kg} \cdot 3980 \text{ J/kgK} \cdot (25 - 5)^\circ\text{C} = 159\,200 \text{ J}$$

$$Q_{maito} = 3 \text{ kg} \cdot 3140 \text{ J/kgK} \cdot (25 - 5)^\circ\text{C} = 188\,400 \text{ J}$$

$$Q_{banaani} = 2 \text{ kg} \cdot 3350 \text{ J/kgK} \cdot (25 - 5)^\circ\text{C} = 134\,000 \text{ J}$$

$$Q_{tuote} = Q_{kananmuna} + Q_{margariini} + Q_{kana} + Q_{nauta} + Q_{maito} + Q_{banaani}$$

$$= 690\,212 \text{ J}$$

Kun kaavaan 4 lisätään prosessiin kulunut aika, saadaan kaavasta 5 määritettyä lämpöteho tietylle ajanjaksolle.

$$\dot{Q}_{tuote} = \frac{mc_p \Delta T}{t} \quad (5)$$

jossa	\dot{Q}_{tuote}	Lämpöteho	[W]
	m	tuotteen massa	[kg]
	c_p	ominaislämpökapasiteetti	[J/kg·K]
	ΔT	lämpötilan muutos	[K]
	t	aika	[s]

$$\dot{Q}_{tuote} = \frac{690\,212\text{ J}}{3600\text{ s}} = 191,7\text{ W}$$

Jotta valitut tuotteet saadaan jäähdytettyä 25 °C lämpötilasta 5 °C lämpötilaan yhden tunnin aikana, tarvitaan 191,7 W lämpöteho. Tällöin kokonaistehontarpeeksi lämpöhäviöistä ja tuotekuormasta saadaan:

$$\dot{Q} = H_{kokonais} + \dot{Q}_{tuote}$$

$$28,5\text{ W} + 191,7\text{ W} = 220\text{ W}$$

Koska suunniteltavan jäähdytysjärjestelmän lopullinen prosessi ei välttämättä ole täysin optimaallinen, on kokonaistehon tarpeeseen järkevää lisätä n. 10 % ns. reserviteho. Tulee myös ottaa huomioon että jos suunnitteilla ei ole invertterityyppisen kompressorin käyttö, on kompressorin käyttöaika vain n. 65 %. Tällöin vaadittavaksi tehontarpeeksi saadaan $220\text{ W} \cdot (100+10) / 65\% \approx 372\text{ W}$

4.2 Kylmäaineen valinta

Koska kaikki kylmäaineet eivät ole yhteensopivia kaikkien komponenttityyppien kanssa, tulee ennen laitteiden mitoittamista valita järjestelmässä kulkeva

kylmäaine. Kylmäainetta valittaessa tärkeimpiä huomioitavia tekijöitä ovat aineen haitallisuus ympäristölle sekä tämän termodynaamisten ominaisuuksien sopivuus suunniteltavaan järjestelmään nähden.

Nykypäivän kotitalouskäyttöön tarkoitetuissa jääkaapeissa yleisimmät käytettävät kylmäaineet ovat R600a, R134a ja R12. Taulukosta 5 nähdään näiden kylmäaineiden ominaisuuksia.

Taulukko 5. Kylmäaineiden ominaisarvoja (Secop 2012)

Kylmäaine	R 600a	R 134a	R 12
Nimi	Isobutaani	1,1,1,2- Tetra-fluori-etaani	Dikloori-difenyylimetaani
Kriittinen lämpötila °C	135	101	112
Normaali kiehumispiste °C	-11.6	-26.5	-29.8
Paine kun lämpötila on -25 °C bar	0.58	1.07	1.24
Paine kun lämpötila on +20 °C bar	3.0	5.7	5.7

Luvuista käy ilmi että, R600a-kylmäaineen painetasot ovat huomattavasti alhaisemmat mitä R134a- ja R12-kylmäaineiden. Tämä tarkoittaa sitä R600a-kylmäainetta käyttävien järjestelmien kompressorilta vaadittava puristustyö on vähäisempi. Joka merkitsee että, kompressorin sähkönkulutus on pienempi.

Kylmäaineiden haitallisuutta ympäristölle kuvaavien ODP- sekä GWP-lukujen arvot esitetään taulukossa 6.

Taulukko 6. Kylmäaineiden ODP ja GWP arvot (Linde 2007)

Kylmäaine	R 600a	R 134a	R 12
ODP	0	0	1
GWP	3	1430	10 900

Jotta järjestelmä olisi mahdollisimman tehokas ja ympäristöystävällinen, päädytään valitsemaan kylmäaine R600a.

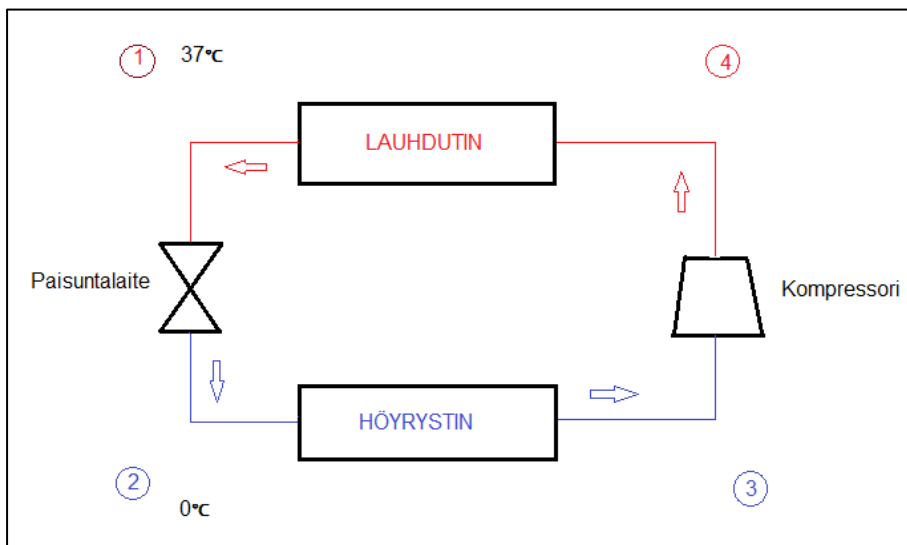
4.3 Mitoituslaskelmat

Massavirta

Ensimmäinen vaihe mitoituslaskemissa on järjestelmän sisällä virtaavan kylmäaineen massavirran määrittäminen.

Kun on tiedossa tarvittava jäähdytysteho, lauhtumis- ja höyrystymislämpötilat sekä kylmäaine, voidaan kylmäaineelle tarvittava massavirta määrittää R600a-kylmäaineen p,h-piirroksesta (liite 1).

Jotta voidaan laskea tarvittava massavirta, täytyy p,h-piirroksen avulla selvittää ensin kylmäaineen entalpia-arvot virtauksen kohdissa 1, 2, 3 ja 4 (kuva 16).



Kuva 16. Höyrinpuristusprosessin kierto

Esimerkissä käytetään 5K-tulistusta sen varmistamiseksi että, kompressorille saapuva kylmäaine on täysin höyrymäisessä muodossa.

Kohtien 1 ja 2 välissä entalpia-arvot eivät muutu. Tätä kutsutaan adiabaattiseksi prosessiksi. Kohtien 2 ja 3 välillä taas paine pysyy samana. Tätä kutsutaan isobaariseksi prosessiksi. Kohtien 3 ja 4 välillä entropia pysyy samana. Tätä kutsutaan isentrooppiseksi prosessiksi.

Kun tiedämme että kohdassa 1, kylmäaine on 37 °C kylläistä höyryä, voimme määrittää jokaisen kohdan lämpötilan, paineen sekä entalpia-arvot. Luvut ovat esitettynä taulukossa 7.

Taulukko 7. Lämpötila, paine ja entalpia-arvot esimerkki kierrolle 5K-tulistuksella.

Kohta	T Lämpötila °C	P Paine bar	h Entalpia (kJ/kg)
1	37	4,95	287,5
2	0	1,58	287,5
3	5 (tulistus)	1,58	563,7
4	38,1	4,95	607,9

Kun tiedämme entalpia-arvot, voidaan massavirta laskea kaavasta 6.

$$\dot{m} = \frac{\dot{\phi}}{h_3 - h_2} \quad (6)$$

jossa	\dot{m}	massavirta	[kg/s]
	$\dot{\phi}$	jäähdytystehontarve	[W]
	h_3	entalpia-arvo	
		kompressorin imupuolella	[kJ/kg]
	h_2	entalpia-arvo	
		ennen höyrytintä	[kJ/kg]

$$\dot{m} = \frac{372 \text{ W}}{(563,7 - 287,5) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 0,001347 \text{ kg/s}$$

Höyrystin

Mahdollisimman optimaalinen höyrystin on sellainen, joka poistaa tarvittavan lämpökuorman. Eli tähän erimerkkijärjestelmään optimaalinen höyrystimen koko olisi 372 W.

Höyrystimen tarvittava pinta-ala saadaan kaavasta 7.

$$A = \frac{\dot{\phi}}{U} \Delta T \quad (7)$$

jossa	A	Höyrystimen pinta-ala	[m ²]
	$\dot{\phi}$	Jäähdytystehotarve	[W]
	U	materiaalin lämmönjohtavuus	[W/mK]
	ΔT	Höyrystimen alkupään ja loppupään lämpötilaero	[K]

Materiaaliksi valitaan kupari, jonka lämmönjohtavuus on 400 [W/mK]

$$\frac{372 \text{ W}}{400 \frac{\text{W}}{\text{mK}} \cdot 5 \text{ K}} = 0,186 \text{ m}^2$$

Höyrystinputken pituus saadaan kaavasta

Lauhdutin

Kun massavirta tiedetään, voidaan määrittää lauhduttimen teho kaavasta 8.

$$\dot{\phi}_{LA} = \dot{m}(h_4 - h_1) \quad (8)$$

jossa	$\dot{\Phi}_{LA}$	lauhduttimen teho	[W]
	\dot{m}	massavirta	[kg/s]
	h_4	entalpia-arvo kompressorin painepuolella	[kJ/kg]
	h_1	entalpia-arvo lauhduttimen jälkeen	[kJ/kg]

$$0,001347 \frac{kg}{s} \cdot (607,9 - 287,5) \frac{kJ}{kg} = 431,6 W$$

Lauhduttimen tarvittava pinta-ala voidaan laskea kaavalla 9.

$$A = \frac{\dot{\Phi}_{LA}}{U} \Delta T \quad (9)$$

jossa	A	pinta-ala	[m ²]
	$\dot{\Phi}_{LA}$	lauhduttimen teho	[W]
	U	kuparin lämmönjohtavuus	[W/mK]
	ΔT	Lauhduttimen ja huoneenlämmön lämpötilaero	[K]

$$\frac{431,6 W}{400 \frac{W}{mK} \cdot 12 K} = 0,0899 m^2$$

Kompressori

Kompressorin teho saadaan määritettyä kaavalla 10.

$$\dot{\Phi}_K = \dot{m}(h_4 - h_3) \quad (10)$$

jossa	\dot{Q}_k	kompressorin teho	[W]
	\dot{m}	massavirta	[kg/s]
	h_3	entalpia-arvo kompressorin imupuolella	[kJ/kg]
	h_4	entalpia-arvo kompressorin painepuolella	[kJ/kg]

$$0,001347 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot (607,9 - 563,7) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 59 \text{ W}$$

Optimaalinen kompressorin koko tässä tapauksessa olisi 59 W kompressori, jonka jäähdytyskapasiteetti olisi 0,372 kW ja joka toimisi 5 °C ja 38,1 °C alueella.

Tulee ottaa huomioon, että tässä esimerkkisuunnitelmassa kompressorin teho on arvioitu täysin häviöttömälle prosessille.

Kompressorin hyötysuhdetta kuvataan COSP-arvolla, joka määräytyy lauhduttimen lämpöeron suhteesta kompressorin lämpöeroon. COSP-arvo voidaan laskea käyttämällä kaavaa 11.

$$COSP = \frac{h_4 - h_1}{h_4 - h_3} \quad (11)$$

$$COSP = \frac{607,9 - 287,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{607,9 - 563,7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 7,2$$

Koko järjestelmän hyötysuhdetta kuvataan COP-arvolla, joka taas määräytyy höyrystimen lämpöeron suhteesta kompressorin lämpöeroon. COP-arvo saadaan laskettua kaavasta 12.

$$COP = \frac{h_3 - h_2}{h_4 - h_3} \quad (12)$$

$$COP = \frac{563,7 - 287,5 \frac{kJ}{kg}}{607,9 - 563,7 \frac{kJ}{kg}} = 6,2$$

Paisuntalaite

Paisuntalaitteeksi tämän kokoiselle järjestelmälle sopii parhaiten kuparista valmistettu yksinkertainen ja halpa kapilaariputki. Mitoituksessa tulee ottaa huomioon kylmäaine, järjestelmän jäähdystystehontarve, lauhduttimen lämpötila, höyrystimen lämpötila sekä kompressoriin sisään tulevan kylmäaineen lämpötila.

Kapilaariputken mitoitukseen ei löydy suoraa laskentakaavaa vaan optimaaliset mitat saavutetaan kokeilemalla. Laittevalmistajilta on kuitenkin saatavilla tähän tarkoitettuja ohjelmia, joiden tietokannoista löytyy hyväksi todettuja mitoituksia eri kokoisille järjestelmille.

Tämän esimerkkisuunnitelman kapilaariputken mitoitukseen on käytetty Secop Oy:n tarjoamaa CapSel-ohjelmaa (kuva 17).

Input Data

Refrigerant	R600a	▼
A Heat load of the system	372	W
B Evaporating temperature	0	°C
C Condensing temperature	37	°C
D Return gas temperature	5	°C

Capillary Tube Recommendation
Flow Rate: 36.3 l/min (N₂ at delta p 10 nbar)

Length	Inner Diameter
0.34 m	0.90 mm
0.57 m	1.00 mm
1.00 m	1.12 mm
1.42 m	1.20 mm
1.74 m	1.25 mm
3.06 m	1.40 mm
4.32 m	1.50 mm
5.97 m	1.60 mm
10.75 m	1.80 mm

Optimal selection is highlighted in yellow.

Kuva 17. Optimaaliset kapilaariputket mitat CapSel ohjelmasta

5 YHTEENVETO

Opinnäytetyön tavoitteena oli tarkastella jäähdystekniikan kehitystä sekä auttaa ymmärtämään, miten jäähdytystä toteutetaan nykypäivänä ja millä tavoin järjestelmien energian kulutusta sekä ympäristöä haitallisesti kuormittavia tekijöitä saadaan rajoitettua kylmäaine- ja materiaalivalinnoilla sekä optimaalisilla komponenttien mitoituksilla haluttuihin tuloksiin nähden.

Ensimmäinen asia joka tulee ottaa huomioon, suunniteltaessa jäähdytysjärjestelmää on se, mitä halutaan jäähdyttää ja millaiseen lämpötilaan.

Vaikkakin työssä tehdyn esimerkkisuunnitelman prosessi oli täysin häviötön, saatiin tarvittavien komponenttien optimaaliset koot selville. Kun jääkaappi haluttiin toimimaan 5 °C lämpötilassa huoneenlämmön ollessa 25 °C saatiin optimaaliseksi komponenttien mitoiksi 59 W suuruusluokkaa oleva kompressori, jonka imupuolen lämpötila tulisi olla 5 °C ja painepuolen n. 38 °C. Lauhdutin jonka teho tulisi olla 431,6 kW ja pinta-alan 0,0899 m². Optimaalinen höyrystin on sellainen, joka poistaa halutun lämpökuorman, eli tässä tapauksessa tehotaan 372 W ja pinta-alaltaan 0,186 m². Tarvittavan paine-eron saavuttamiseksi, kapilaariputken mitoiksi saatiin 1,74 m pitkä kupariputki, jonka sisähalkaisija on 1,25 mm.

Tarkempien ja todenmukaisempien tulosten määrittäminen vaatisi empiiristen tutkimusten suorittamista fyysisellä järjestelmällä, josta voitaisiin määrittää järjestelmän sisällä tapahtuvat häviöt, jotka lisäävät puristuksen tarvetta ja edelleen energiankulutusta.

LÄHTEET

Aittomäki, A. 1996. KYLMÄ-TEKNIikka. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy.

Çengel, Y. A. 2006. HEAT AND MASS TRANSFER: A Practical Approach. New York: McGraw-Hill.

Emerson. 2016. Refrigeration Manual. PDF-dokumentti. Saatavilla: http://www.hvacinfo.com/Cope_manuals/AE103_R3.pdf [viitattu 06.6.2017].

Energiavirasto. s.a. Energiatehokkuus. WWW-dokumentti. Saatavilla: <http://www.energiavirasto.fi/energiatehokkuus> [viitattu 28.5.2017].

Kaappola, E., Hirvelä, A., Jokela, M., Kianta, J. 2011. KylmätekniiKAN perusteet. Helsinki: Opetushallitus.

Keep it Cool Inc. s.a. History of the refrigerator. WWW-dokumentti. Saatavissa: http://www.keepitcool.com/history_of_the_refrigerator2.htm [viitattu 13.5.2017].

Kharagpur, I. I. T. s.a. History of Refrigeration. PDF-dokumentti. Saatavissa: http://nptel.ac.in/courses/112105129/pdf/RAC_Lecture_1.pdf [viitattu 13.5.2017].

Khemani, H. 2008. Methods of refrigeration gas cycle. WWW-dokumentti. Saatavilla: <http://www.brighthubengineering.com/hvac/20589-methods-of-refrigeration-gas-cycle/> [viitattu: 20.5.2017].

Koljonen, T., Sipilä, K. 1998. Uudemman absorptiojäähdytystekniikan soveltaminen kaukojäähdytyksessä. PDF-dokumentti. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/1998/T1926.pdf> [viitattu 20.5.2017].

Linde. 2007. Refrigerants Environmental Data. Ozone Depletion and Global Warming Potential. PDF-dokumentti. Saatavilla: http://www.linde-gas.com/internet.global.lindegas.global/en/images/Refrigerants%20environmental%20GWPs17_111483.pdf [viitattu 05.06.2017].

Melo, C. 2012. Thermal Insulation of Household Refrigerators: Perspectives and Evaluation Methods. PDF-dokumentti. Saatavissa: http://www.inmetro.gov.br/painelsetorial/palestras/isolamento_termico_de_refrigeradores_domesticos_perspectivas_e_metodo_de_avaliacao_claudio_melo.pdf [viitattu 23.5.2017].

Nydal, R. 1994. Käytännön kylmäteknikka. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy.

Pandey, R. 2015. Desing and fabrication of vortex tube. WWW-dokumentti. Saatavilla: <https://www.slideshare.net/rkp042/vortex-tube-44516868> [viitattu 20.5.2017].

Pecharsky V. K. 1999. Magnetocaloric effect and magnetic refrigeration. E-kirja. Saatavissa: www.sciencedirect.com [viitattu 18.5.2017].

Prasad, M. 2005. Refrigeration and Air Conditioning. E-kirja. Saatavissa: <https://books.google.fi> [viitattu 12.5.2017].

Price, S. H. 2007. The Peltier Effect and Thermoelectric Cooling. WWW-dokumentti. Saatavilla: http://ffden-2.phys.uaf.edu/212_spring2007.web.dir/sedona_price/phys_212_webproj_peltier.html [viitattu 20.5.2017].

Schmidt, M., Schutze, A., Seelecke, S. 2016. Elastocaloric cooling processes. WWW-dokumentti. Saatavissa: <http://aip.scitation.org/doi/full/10.1063/1.4953433> [viitattu 18.5.2017].

Secop. 2012. Advantages of adaptable capacity. PDF-dokumentti. Saatavilla: http://www.secop.com/fileadmin/user_data/pdfs/guidelines/adaptable_capacity_whitepaper_02-2012_desa300a102.pdf [viitattu 21.5.2017].

Secop. 2016. Condensers for refrigeration appliances. PDF-dokumentti. Saatavilla: http://www.secop.com/fileadmin/user_data/pdfs/danfoss_lectures/condensers_for_refrigeration_appliances.pdf [viitattu 22.5.2017].

Singal, L.C, Dr. s.a. Applications of Refrigeration. WWW-dokumentti. Saatavissa: <http://www.allsubjects4you.com/applications-of-refrigeration.htm> [viitattu 15.5.2017].

