



Victor Savela

# Hiilidioksidi- ja ammoniakkiteollisuuskylmälaitosten käyttökustannusten vertailu

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Talotekniikka

Insinöörityö

1.12.2023

# Tiivistelmä

Tekijä:	Victor Savela
Otsikko:	Hiilidioksidi- ja ammoniakkiteollisuuskylmälaitosten käyttö- kustannusten vertailu
Sivumäärä:	38 sivua
Aika:	1.12.2023
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Talotekniikka
Ammatillinen pääaine:	LVI-suunnittelu
Ohjaajat:	Ryhmäpäällikkö Timo Reikko diplomi-insinööri Esko Kaappola Yliopettaja Aki Valkeapää

---

Tämän insinööriyön tarkoitus oli käydä läpi hiilidioksidi- ja ammoniakkikylmälaitosten eroja keskittyen käyttökustannuksiin. Työssä kehitettiin laskentaohjelma, joka helpottaa kylmäaineen valintaa käyttökustannusten perusteella.

Insinööriyö jakautui teoria- ja laskentaosuuksiin. Teoriaosuudessa perehdyttiin kylmätekniikkaan yleisesti, mukaan lukien kylmäaineiden ominaisuuksiin, erilaisiin kylmäjärjestelmiin ja niiden pääkomponentteihin. Lisäksi työssä tarkasteltiin tarkemmin hiilidioksidi- ja ammoniakkikylmälaitoksia.

Laskentaosuudessa tarkasteltiin kylmäainevalintaan vaikuttavia tekijöitä, laskentaan tarvittavia lähtötietoja ja laskennan tavoitteita. Insinööriyössä tuotettiin Grasshopper-pohjainen laskentaohjelma, joka on suunniteltu Rambollin käyttöön kylmälaitosten vertailun yksinkertaistamiseksi. Tämä laskentaohjelma keskittyy käyttökustannuksiin ja antaa arvokasta tietoa kylmälaitosten vertailussa.

Insinööriyössä kehitetty laskentaohjelma hyödyttää Rambollin kylmäsuunnittelua, jossa pyritään kestävämpiin kylmätekniikkaratkaisuihin. Jatkokehityksen kannalta ohjelmaan saa lisättyä suhteellisen helposti lisää komponentteja, joilla laskenta ohjelmaa voidaan laajentaa tai tarkentaa.

Avainsanat: teollinen kylmätekniikka, hiilidioksidi, ammoniakki, käyttökustannus.

## Abstract

Author: Victor Savela  
Title: Carbon Dioxide and Ammonia in Industrial Refrigeration Plants: Comparison of Operating Costs  
Number of Pages: 38 pages  
Date: 1 December 2023

Degree: Bachelor of Engineering  
Degree Programme: Building Services Engineering  
Professional Major: HVAC Design  
Supervisors: Timo Reikko, Team Leader  
Esko Kaappola, Master of Science (Technology)  
Aki Valkeapää, Principal Lecturer

---

The bachelor's thesis aimed at discussing the use of carbon dioxide and ammonia in refrigeration plants, focusing on the differences in operating costs between the two. In the final year project, a calculation program was developed to facilitate the selection of refrigerant based on operating costs.

The thesis first focused on refrigeration technology in general, including the properties of refrigerants, different refrigeration systems and their main components. In addition, carbon dioxide and ammonia refrigeration plants were examined in more detail. In the calculation part of the thesis, the factors affecting the choice of refrigerant, the necessary initial data, and the goals of deciding the right refrigerant were examined.

The thesis resulted in a Grasshopper-based calculation program designed for the commissioning company to simplify the comparison between ammonia and carbon dioxide refrigeration plants. The calculation program focuses on the operating costs and provides valuable information when comparing refrigeration plants.

The calculation program benefits refrigeration design aiming for more sustainable refrigeration solutions. In terms of further development, it is relatively easy to add new components to either enlarge the scope of the calculation program or to make it more precise.

Keywords: industrial refrigeration, carbon dioxide, ammonia, operating cost.

# Sisällys

## Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Kylmäprosessi ja jäähdytystekniikka	2
2.1	Kylmäprosessi	2
2.2	Suora ja välillinen jäähdytys	4
2.3	Komponentit	5
2.3.1	Kompressori	6
2.3.2	Lauhdutin	7
2.3.3	Paisuntaventtiili	8
2.3.4	Höyrytimet	9
3	Luonnolliset kylmäaineet	10
3.1	Hiilidioksidi (R744)	11
3.1.1	Hiilidioksidin historiaa	11
3.1.2	Hiilidioksidin ominaisuudet	11
3.1.3	Hiilidioksidikylmälaitokset	14
3.2	Ammoniakki (R747)	16
3.2.1	Ammoniakin historiaa	16
3.2.2	Ammoniakin ominaisuudet	17
3.2.3	Ammoniakkikylmälaitokset	18
4	Kylmäainevalintaan vaikuttavat tekijät	20
4.1	Kylmäaineiden termodynaamiset ominaisuudet	21
4.2	Kylmälaitoksen energiatehokkuus	22
4.3	Ympäristövaikutukset	23
4.4	Turvallisuusnäkökohdat	24
5	Laskentaohjelman kehittäminen	25
5.1	Tavoitteiden rajaus ja lähtötiedot	25
5.2	Laskentaohjelman rakentaminen	30
5.3	Laskenta ja lopputulos	33
6	Yhteenveto	35
	Lähteet	37

## Lyhenteet

- GWP:** *Global Warming Potential.* Kylmäaineen kasvihuonehaitallisuus eli kylmäaineen vaikutus ilmaston lämpenemiseen verrattuna hiilidioksidin vaikutukseen. Hiilidioksidille GWP-arvo on 1.
- ODP:** *Ozone Depletion Potential.* Kylmäaineen suhteellinen otsonihaitallisuus. Vertailulukuna on kylmäaineen R11 lukuarvo, joka on 1.
- ppm:** *Parts per Million.* Suhdeyksikkö, joka ilmaisee, kuinka monta miljoonanosaa jokin on jostakin.
- ASHRAE:** *American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers.* Amerikkalainen LVIJ- tekniikan etujärjestö.
- COP:** *Coefficient of Performance.* Lämpöpumpun lämpökerroin tietyissä toimintaolosuhteissa
- EER:** *Energy Efficiency Ratio.* Kylmälaitteen kylmäkerroin tietyissä toimintaolosuhteissa.
- SCOP:** *Seasonal Coefficient of Performance.* Vuosilämpökerroin eli lämpöpumpulla tuotetun ja kulutetun energian suhde vuoden aikana.
- SEER:** *Seasonal Energy Efficiency Ratio.* Vuosilämpökerroin eli kylmälaitteella tuotetun ja kulutetun energian suhde vuoden aikana.

## 1 Johdanto

Suuremmissa kylmälaitoksissa käytetään kylmäaineena yleensä ammoniakkia tai hiilidioksidia. Valintaan näiden kahden kylmäaineiden välillä vaikuttavat hyvin monet eri tekijät. Kylmäaineen valinnalla on myös merkittäviä vaikutuksia laitoksen investointi- ja käyttökustannuksiin, ja se onkin yksi keskeinen vaihe kylmälaitosten suunnittelun alkuvaiheessa.

Insinööriyö tehdään kansainvälisen Ramboll-konsernin Ramboll Finland Oy:n tytäryhtiölle. Ramboll Finland Oy on Suomen yksi suurimmista suunnittelu- ja konsultointitoimistoista. Yrityksen kylmätekniikkasuunnitteluun keskittyneeseen ryhmään on usein tullut asiakkailta kysymyksenä, kumpaa kylmäainetta kannattaa käyttää erilaisissa käyttökohteissa. Insinööriyön tavoitteena on kehittää laskentatyökalu, jolla voidaan vertailla hiilidioksidi- ja ammoniakkilaitosta toisiinsa käyttökustannusten perusteella ja näin vastata kustannustehokkaasti esimerkiksi asiakaskyselyihin. Laskentatyökalun kehityksessä pyritään siihen, että työkalun käyttöä voidaan tulevaisuudessa laajentaa myös muihin kylmäaineisiin.

Työssä kehitettävä laskentaohjelma on rajattu käyttökustannuksien vertailuun, jotta insinööriyöstä ei tulisi liian laaja. Laskentaohjelma kehitetään siten, että se käyttää lähtötietoina tuntikohtaista ulkolämpötilaa ja jäähdytystehontarvetta, jotka saa esimerkiksi IDA ICE -ohjelman simuloinnista. Tässä insinööriyössä käytetään Rambollin sisäistä jäähdytystehontarvelaskentatyökalua. Laskentaohjelmassa olevat ammoniakki- ja hiilidioksidikylmälaitokset ovat hyvin yksinkertaistettuja. Tämä antaa tilaa ohjelman jatkokehittämiseen tulevaisuudessa, jolloin siihen voidaan lisätä paljon eri komponentteja tarkempaa kustannusvertailua varten.

Työ on jaettu teoria- ja laskentaosuuteen. Teoriaosuudessa käsitellään kylmäprosessia, luonnollisia kylmäaineita sekä perehdytään tarkemmin hiilidioksidi ja ammoniakkikylmälaitoksiin. Laskentaosuudessa tarkastellaan

kylmäainevalintaan liittyviä seikkoja, valinnassa tarvittavia lähtötietoja, laskennan tavoitteita, haluttua lopputulosta sekä laskentaohjelman kehitystä.

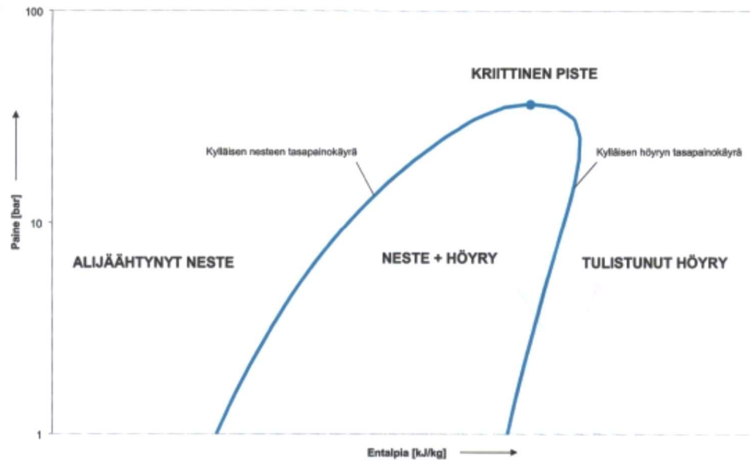
Insinööriyön teoriaosuudessa käsiteltävä tieto on peräisin kylmätekniikkaan keskittyvästä kirjallisuudesta ja teknisistä määräyksistä. Laskentaosiossa ja laskentaohjelman luomisessa on käytetty tämän lisäksi eri valmistajien esitteitä, dokumentteja ja laskentaohjelmia. Työn tekemisessä hyödynnetään myös insinööriyön tekijän omaa kokemusta kylmäsuunnittelusta Ramboll Finland Oy:ssä.

## 2 Kylmäprosessi ja jäähdytystekniikka

### 2.1 Kylmäprosessi

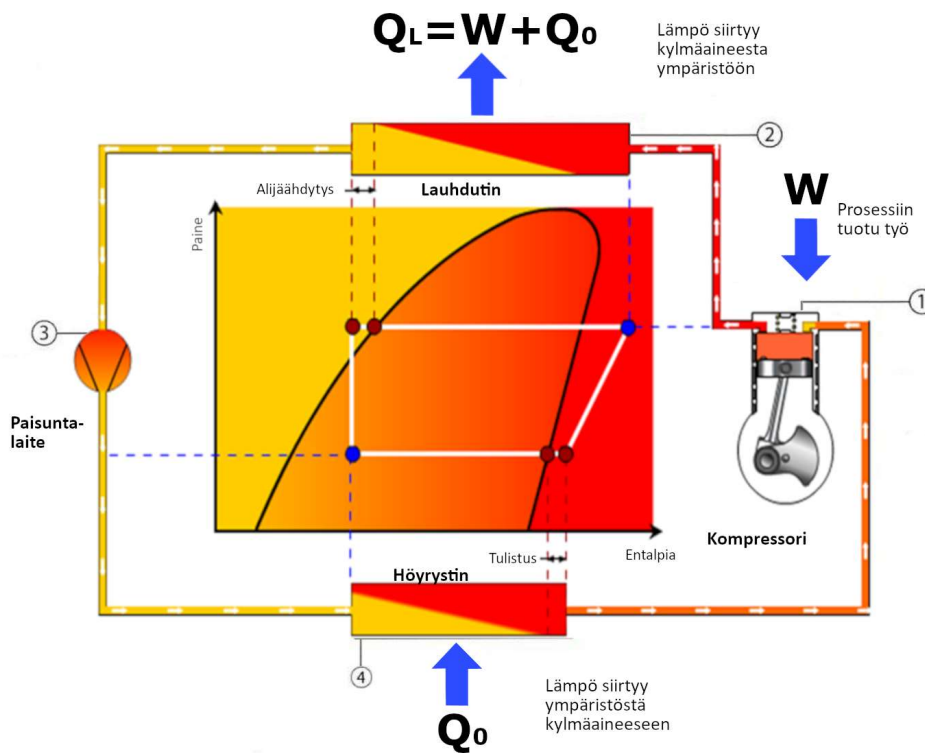
Kylmäteknisessä kiertoprosessissa eli kylmäprosessissa lämpöä poistetaan matalammasta lämpötilasta korkeampaan. Termodynamiikan toisen pääsäännön mukaan ilman prosessiin tuotua työtä lämmön on mahdotonta siirtyä kylmemmästä lämpimämpään. Tämä työ kylmäprosessissa tuodaan yleensä kompressorin syötettävän sähkötehon kautta. Tuotu sähköenergia muuttuu kompressorissa lämpöenergiaksi, joka siirtyy kylmäaineeseen ja ympäristöön. Kylmäaine toimii prosessissa lämmönsiirtäjänä, ja sen höyrystyminen ja lauhtuminen eri painetasoissa mahdollistavat kylmäprosessin. (1, s. 17–18.)

Jokaisen kylmäaineen olomuodot esitetään kylmäaineelle ominaisen log p,h -tilapiirroksen (kuva 1) avulla. Tilapiirroksen x-akselilla esitetään entalpian (h) arvot ja y-akselilla absoluuttisen paineen (p) arvot. Tilapiirroksen rajakäyrä osoittaa kylmäaineen eri olomuodot paineesta ja lämpötilasta riippuen. Kriittinen piste jakaa rajakäyrän kylläiseen nesteeseen tasapainokäyrään ja kylläisen höyryn tasapainokäyrään. Kylläisen nesteeseen rajakäyrän vasemmalla puolella kylmäaine esiintyy alijäähtyneenä nesteinä, ja kylläisen höyryn oikealla puolella kylmäaine esiintyy tulistuneena höyrynä. Tasapainokäyrän sisään jäävässä osassa kylmäaine esiintyy nestehöyryseoksena. Kriittisen pisteen yläpuolella aine esiintyy kaasuna, jota ei saada enää nesteytettyä lämpöä poistamalla. (1, s. 19.)



Kuva 1. Kylmäaineen olomuodot log p, h -tilapiirroksessa (1, s.19).

Kuvassa 2 on esitetty kylmäprosessi kylmäaineen log p, h -tilapiirroksessa.



Kuva 2. Kylmätekniinen kiertoprosessi (1, s.17).



Kompressorissa (kuvassa merkintä 1) matalapaineinen höyry puristetaan korkeapaineiseksi höyryksi, ja samalla höyryn lämpötila nousee. Lauhduttimessa (kuvassa merkintä 2) korkeapaineinen höyry lauhtuu, jolloin lämpöenergia siirtyy kylmäaineesta ympäristöön (ilmaan, veteen tai muuhun väliaineeseen). Kylmäaineen muuttuminen nesteeksi varmistetaan alijäähdyttämällä kylmäainetta eli varmistetaan lämpöenergian siirto kylmäaineesta kylmäisen nesteen tasapainokäyrän ohi, jolloin lauhduttimessa olevan kylmäaineen lämpötila alkaa laskemaan. Kylmäaineen virratessa paisuntaventtiilin (kuvassa merkintä 3) läpi, osa kylmäaineesta höyrystyy. Paisuntaventtiilin jälkeen (kuvassa merkintä 4) kylmäaineen lämpötila ja paine vastaavat höyrystymislämpötilaa ja -painetta. Paisuntaventtiilin jälkeen kylmäaine virtaa höyrystimeen, jossa kylmäaineen höyrystyminen tapahtuu. (1, s.17–19.)

Kompressorin toiminnan kannalta on tärkeää, että kaikki neste muuttuu höyryksi. Tämä varmistetaan kylmäaineen tulistuksella höyrystimen loppuosassa. Tulistus tarkoittaa, että kylmäaineen lämpötila on korkeampi kuin höyrystymispainetta vastaava höyrystymislämpötila. Höyrystimen jälkeen kylmäaine voi vielä tulistua lisää imuputkessa. Imuputkesta kylmäaine virtaa kompressorille, ja kylmäprosessi alkaa alusta. Kylmätekniistä kiertoprosessia, joka tapahtuu kokonaan kriittisen pisteen alapuolella, kutsutaan alikriittiseksi. Jos kompressorin puristaa kylmäainehöyryn paineen kriittisen pisteen yläpuolelle, kylmäprosessi muuttuu ylikriittiseksi. (1, s.17–19.)

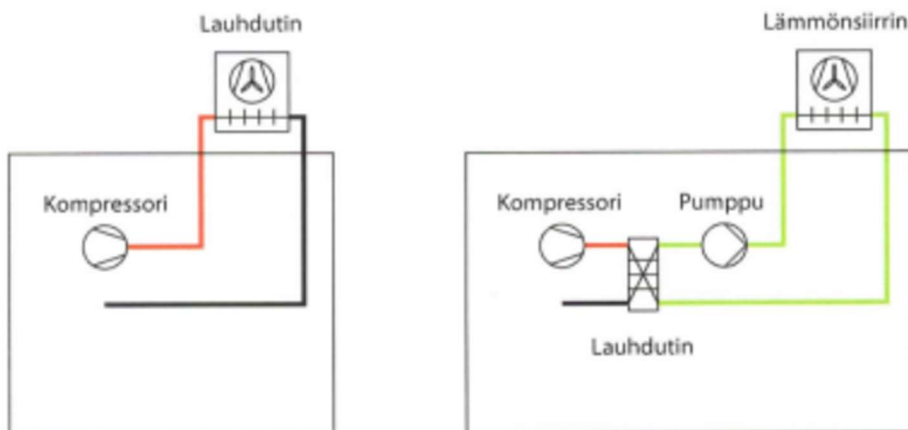
## 2.2 Suora ja välillinen jäähdytys

Jäähdytysprosessit jaetaan kahteen järjestelmään, jotka ovat suora- ja välillinen jäähdytysjärjestelmä (kuva 3). Suorassa jäähdytysjärjestelmässä höyrystin on suoraan kosketuksessa jäähdytettävään aineeseen, kuten ilmaan. Välillisessä järjestelmässä höyrystimen läpi kulkeva väliaine, yleensä vesi tai glykoli-vesiseos, on kosketuksessa lämmönsiirtimeen, joka on taas puolestaan kosketuksessa jäähdytettävään väliaineeseen. (1, s. 75.)



Kuva 3. Suora ja välillinen jäähditys (1, s. 75).

Lauhdutusjärjestelmä myös voi olla suora tai välillinen (kuva 4). Suorassa lauhdutuksessa lauhdutin on suoraan kosketuksessa lämmitettävään aineeseen, kuten ilmaan. Välillisessä järjestelmässä lauhduttimen läpi kulkeva väliaine (yleensä glykoli-vesiseos) on kosketuksessa lämmönsiirtimeen, joka on taas puolestaan kosketuksessa lämmitettävään väliaineeseen. (1, s. 75.)



Kuva 4. Suora ja välillinen lauhdutus (1, s. 75.)

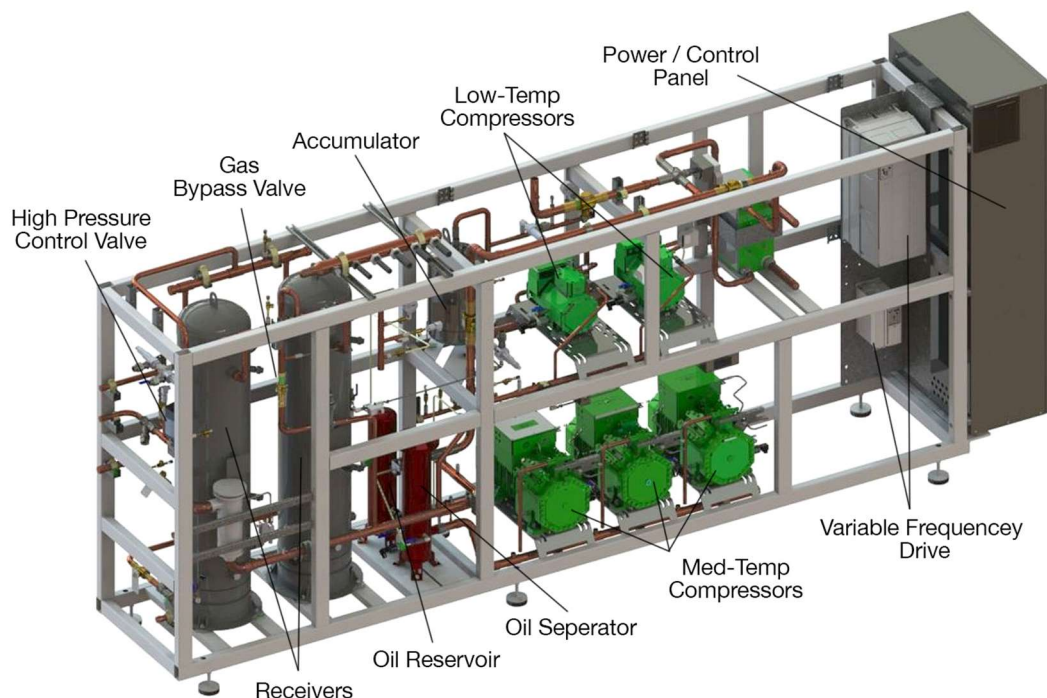
### 2.3 Komponentit

Jokaisessa kylmälaitteissa tai lämpöpumpussa on vähintään neljä pääkomponenttia, jotka ovat kompressori, höyrystin, paisuntalaite ja lauhdutin. Tässä kappaleessa käydään näiden komponenttien tehtävät, jotta saadaan parempi kuva kylmäjärjestelmän toiminnasta. (1, s. 50.)

### 2.3.1 Kompressorit

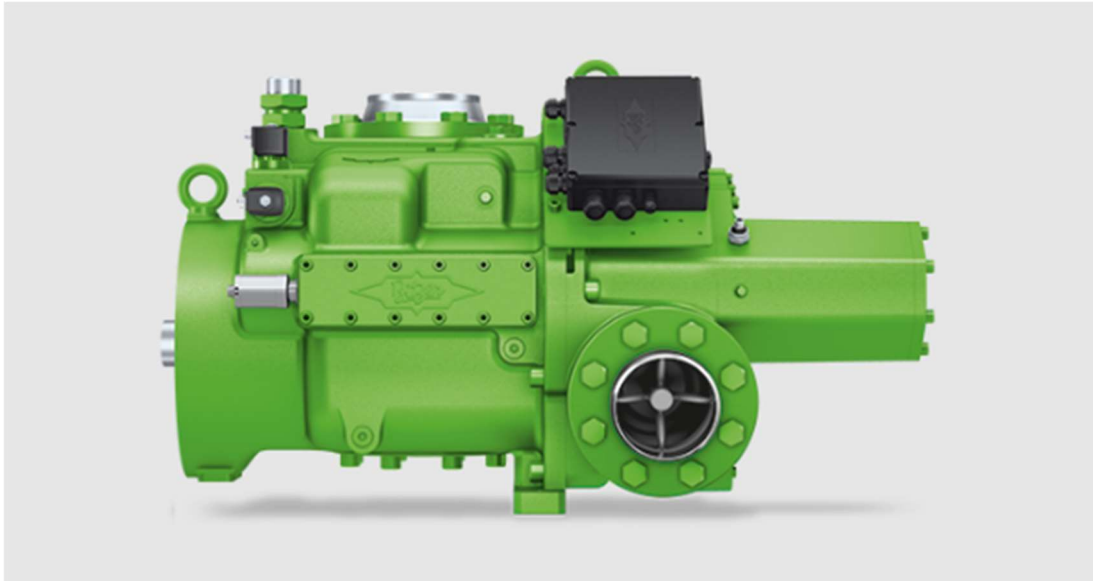
Kompressorit on käyttökustannusten näkökulmasta koneiston tärkein komponentti. Sen tehtävänä on korottaa kylmäaineen paine höyrystymislämpötilasta lauhtumislämpötilaan. Tämä painero saa kylmäaineen siirtymään höyrystimeltä lauhtuttimelle. (1, s. 51–53.)

Kompressorit luokitellaan rakenteen perusteella hermeettisiin, puolihhermeettisiin ja avokompressoreihin. Hermeettisen kompressorin sähkömoottori ja kompressorit ovat umpinaisen kuoren sisällä. Puolihhermeettisissä kompressoreissa taas sähkömoottori ja kompressorit on sijoitettu avattavan kuoren sisälle, joten niitä pystyy huoltamaan tai korjaamaan. Avokompressorissa sähkömoottori on kuoren ulkopuolella ja käyttövoima tuodaan akselin avulla kompressorikuoren läpi. Tyypillisesti ammoniakkilaitoksissa käytetään avonaista ruuvikompressoria ja hiilidioksidilaitoksissa puolihhermeettistä mäntäkompressoria. Kuvassa 5 on esitetty tyypillinen kaupan kylmä hiilidioksidikompressorikoneikko, jossa on puolihhermeettiset mäntäkompressorit. (1, s. 51–53.)



Kuva 5. Tyypillinen kaupankylmän hiilidioksidikompressorikoneikko (2).

Kuvassa 6 on esitetty avonainen ruuvikompressor, joka on tyypillinen ammoniakkilaitoksissa. (1, s. 51–53.)



Kuva 6. Ammoniakkijärjestelmässä käytetty avoruuvikompressor (3).

### 2.3.2 Lauhdutin

Lauhduttimen tehtävänä on nesteyttää kompressorilta tuleva tulistunut kylmäainehöyry. Se siis toimii lämmönsiirtimenä, jossa tulistunut höyry luovuttaa lämpöä ympäristöön ja lauhtuu kaasusta nesteeksi. Paisuntaventtiilin oikea toiminta varmistetaan alijäähdyttämällä nestettä hiukan lauhduttimessa ja näin minimoidaan kaasukuplien määrä. Ilmajäähdytteiset lauhduttimet (kuva 7) ovat yleisimmin käytettyjä kylmäjärjestelmissä. Näiden lisäksi on nestejäähdytteisiä lauhduttimia. Näitä käytetään muun muassa silloin, kun halutaan minimoida kylmäainetäyttöä, kun kompressorin ja lauhduttimen välinen etäisyys on suuri tai jos lauhdelämpöä halutaan hyödyntää muualla (välillinen lauhdutus). (1, s. 55–56.)

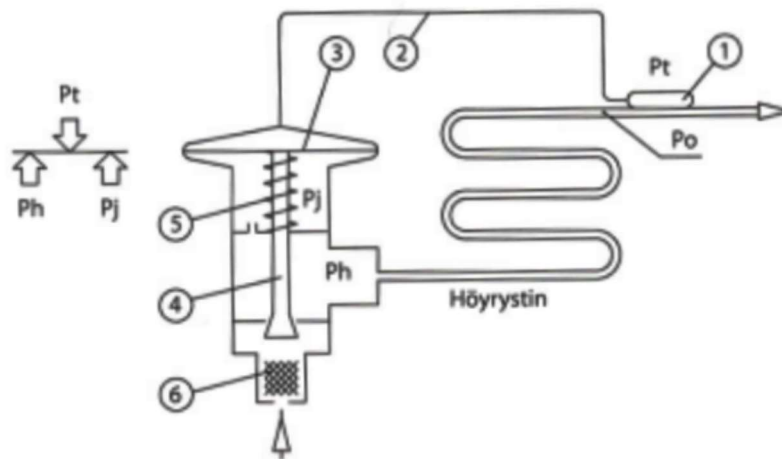


Kuva 7. Ilmajäähdytteinen lauhdutin.

Ylikriittisissä hiilidioksidilaitoksissa taas puhutaan kaasunjäähdyttimestä, sillä kaasujäähdyttimessä oleva hiilidioksidi on ylikriittinen höyry, jota jäähdytetään. Ylikriittisessä hiilidioksidilaitoksessa faasimuutos tapahtuu vasta nestevarajassa. Matalimmissa lämpötiloissa kaasujäähdytin toimii lauhduttimena. (4, s. 6.)

### 2.3.3 Paisuntaventtiili

Paisuntaventtiilin tehtävä on säätää kylmäaineen ruiskutusta höyrystimeen tulistuksen mukaan. Sen tarkoituksena on siis varmistaa kylmäaineen tulistus (tyypillisesti 5–10 K) höyrystimessä, ettei kompressorille päädy nestettä, jolloin kompressori vaurioituisi. Ruiskutuksen määrää säätää mekaanisessa paisuntaventtiilissä tuntoelin, joka sijaitsee höyrystimen jälkeisen imuputken pinnassa (kuva 8). Tuntoelimen lämpötilan aiheuttama painemuutos vaikuttaa kapillaariputkea pitkin paisuntaventtiilin sisällä olevaan neulaan, joka puolestaan avaa tai sulkee venttiiliä. (1, s. 57–58.)



Kuva 8. Termostaattinen paisuntaventtiili, jossa on sisäinen paineentasaus (1, s. 57).

### 2.3.4 Höyrystimet

Höyrystimen tehtävä kylmäjärjestelmässä on siirtää lämpöä kylmäaineeseen esimerkiksi lamellien kautta ilmasta. Perinteisesti ilmakiertoisia höyrystimisiä (kuva 9) käytetään kylmä- ja pakkashuoneissa. Niissä ilma kiertää joko painovoimaisesti tai puhaltimien avulla lamellien läpi. Höyrystimisiä voi myös olla välillisinä, eli höyrystin jäähdyttää muuta ainetta, joka kiertää jäähdytettävässä tilassa. Tämänkaltaisissa järjestelmissä höyrystiminä käytetään yleensä levylämmönsiirtimiä tai moniputkilämmönsiirtimiä. (1, s. 59–60.)



Kuva 9. Luonnollisen ilmankierron höyrystin.

### 3 Luonnolliset kylmäaineet

Kylmäaineet voidaan jaotella esimerkiksi niiden halogeenimolekyylien perusteella tai höyrystymis- ja lauhtumiskäyttäytymisen mukaan. Tämän lisäksi on niin sanottuja luonnollisia kylmäaineita, joita ovat esimerkiksi propaani R290, butaani R600, hiilidioksidi R744, ammoniakki R717 ja vesi R718. Nämä jaotellaan vielä puhtaisiin hiilivetyihin (HC-kylmäaineet) ja epäorgaanisiin kylmäaineisiin. Hiilidioksidi ja ammoniakki kuuluvat epäorgaanisiin kylmäaineisiin. (5.)

Luonnollisia kylmäaineita yhdistää se, että ne esiintyvät luonnossa sellaisinaan. Kaikissa luonnollisissa kylmäaineissa on kuitenkin omat haittapuolensa. Hiilivedyt ovat palavia, ammoniakki on myrkyllinen, vedellä on vähän käyttösovelluksia ja hiilidioksidilla korkea käyttöpaine. (5; 4, s. 4.)

### 3.1 Hiilidioksidi (R744)

#### 3.1.1 Hiilidioksidin historiaa

Hiilidioksidi ei ole uusi kylmäaine, vaikka niin usein ajatellaan. Ensimmäisen hiilidioksidikylmäjärjestelmän patentoi Thaddeus Love jo vuonna 1867. Koska hiilidioksidi ei ole välittömästi myrkyllistä, hiilidioksidi nousi suureen suosioon esimerkiksi elintarvikkeita kuljettavissa laivoissa ja veneissä, joissa ennen hiilidioksidia käytetty myrkyllinen ammoniakki nähtiin turvallisuusriskinä. (4, s. 4.)

1930-luvulla alkoi uusien synteettisten kylmäaineiden valmistaminen ja kehittyminen. Nämä nähtiin silloin niin sanotusti "ihmeaineiksi", koska hiilidioksidia käyttävissä kylmälaitoksissa oli näihin verrattuna suuremmat konekoot, huono hyötysuhde ja suuri käyttöpaine. Nämä aineet syrjäyttivät hiilidioksidin kokonaan 1960-luvun puolivälissä, jolloin sen käyttö lopetettiin täysin. Hiilidioksidi löydettiin uudelleen vasta 1980-luvun jälkeen, kun huomattiin, että synteettisesti valmistetuissa kylmäaineissa olikin huonoja puolia, kuten otsonikerrosta heikentävä vaikutus (ODP) ja ilmastoa lämmittävä vaikutus (GWP). Edellä kuvatuista syistä markkinoilla tuli taas kysyntää kylmäaineelle, joka on ympäristöystävällinen, myrkytön ja palamaton. (4, s. 4; 6, s. 6.)

Hiilidioksidi on myrkytön ja palamaton kylmäaine. Sen GWP-arvo on 1 ja ODP-arvo on 0. Ympäristöystävällisenä kylmäaineena sitä on kehitetty hyvin paljon viime vuosikymmenellä. Vanhoja komponentteja on paranneltu ja tutkimuksen ohella kehitelty uusia, joiden avulla hiilidioksidilaitokset ovat päässeet tavanomaisten kylmäaineiden tasolle. Nykyisin 1920-luvun esteet hiilidioksidin käytölle on lähes kokonaan ylitetty. (4, s. 4.)

#### 3.1.2 Hiilidioksidin ominaisuudet

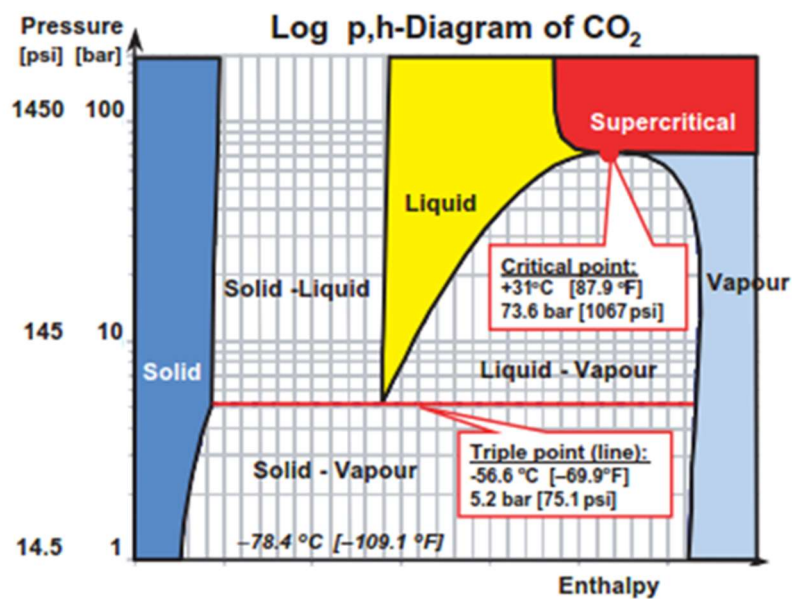
Hiilidioksidissa on paljon kylmätekniisiä ominaisuuksia, jotka poikkeavat muista kylmäaineista. Näitä ominaisuuksia ovat

- korkeampi käyttöpaine kuin muissa kylmäaineissa



- kriittinen piste hyvin matalassa lämpötilassa (31.1 °C)
- todella suotuisat lämmönsiirto-ominaisuudet
- korkea kolmoispisteen (tila, jossa aineen kaikki kolme olomuotoa ovat tasapainossa) paine 5,2 bar
- kapeampi käyttölämpötila-alue. (6, s. 8.)

Näistä ominaisuuksista suurin merkitys kylmälaitosten suunnittelussa, rakentamisessa ja huollossa ovat korkeapaine ja alhainen kriittinen lämpötila, sillä ne vaativat vain niihin soveltuvia laitteita. Kuvassa 10 on esitetty hiilidioksidin eri faasit, kriittinen piste ja kolmoispiste log p, h -piirroksessa. Taulukossa 1 on vertailtu hiilidioksidia muihin kylmäaineisiin (4, s. 4; 6, s. 8.)



Kuva 10. Laajennettu hiilidioksidin log p, h -tilapiirros (4, s. 6).

Taulukko 1. Hiilidioksidin ominaisuudet verrattuna muihin kylmäaineisiin. (4, s. 4)

<b>Kylmäaine</b>	<b>R134a</b>	<b>Ammoniakki R717</b>	<b>Hiilidioksidi R744</b>	<b>Propaani R290</b>
Luonnollinen	Ei	Kyllä	Kyllä	Kyllä
ODP	0	0	0	0
GWP	1300	0	1	3
Kriittinen piste bar	40.7	113	73.6	42.5
°C	101.2	132.4	31.1	96.7
Kolmoispiste bar	0.004	0.06	5.18	1E-09
°C	-103	-77.7	-56.6	-187.68
Syttyvyys	Ei	Kyllä (matala)	Ei	Kyllä
Myrkyllinen	Ei	Kyllä	Ei	Ei

Vaikka hiilidioksidi ei aiheuta pieninä pitoisuuksina haittoja ihmisille, se ei ole kuitenkaan täysin vaaraton. Ilmakehässä hiilidioksidia on noin 400 ppm. 3000 ppm:n pitoisuuden kohdalla hengitys alkaa huomattavasti tihentyä, mutta vasta noin 8000 ppm:n pitoisuudessa oleskeleminen aiheuttaa ihmiselle aitoa vaaraa. Terveyshaitan riskin poistamiseksi hiilidioksidikylmälaitoksissa tulee olla hiilidioksidipitoisuutta mittaavia antureita. Taulukossa 2 on taulukoituna hiilidioksidin pitoisuudet ja niiden aiheuttamat terveysvaikutukset. (6, s. 72.)

Taulukko 2. CO<sub>2</sub> - kaasun vaikutus ihmisiin (6, s. 72).

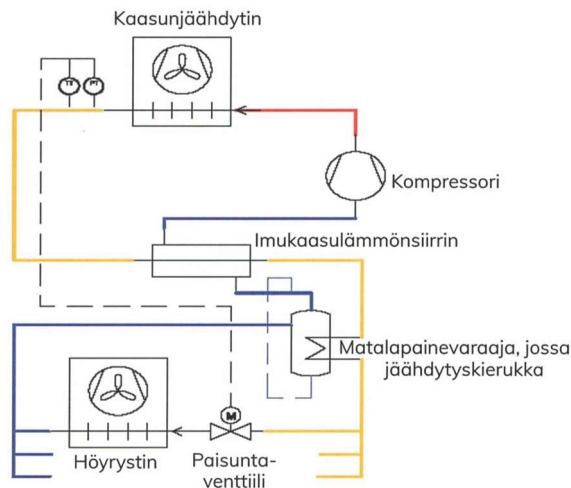
Pitoisuus		Vaikutus ihmiseen
ppm	g/m <sup>3</sup>	
400	0.726	Normaali pitoisuus ilmassa.
20000	36.3	Hengitys tihenee 50 %.
30000	54.5	Hengitys tihenee 100 %. STEL (Lyhyen aikavälin raja-arvo) 10 min
50000	90.8	Hengitys tihenee 300 %. Päänsärkyä ja hikoilua voi ilmetä noin 1 tunnin kuluttua. Useimmat sietävät tätä, mutta se on fyysisesti rasittavaa.
80000– 100000	145– 182	Päänsärky 10–15 minuutissa. Huimaus, korvien soiminen, verenpaine kohoaa, kohonnut pulssi, levottomuus, pahoinvointi.
100000– 180000	182– 327	Muutaman minuutin kuluttua: Epileptisen kohtauksen kaltaisia kouristuksia, tajunnan menetys ja sokki (yhtäkkäinen verenpaineen lasku). Altistuneen henkilön tila palautuu nopeasti normaalisti raittiissa ilmassa.
180000– 200000	327– 363	Aivoverenkiertohäiriön kaltaisia oireita.

### 3.1.3 Hiilidioksidikylmälaitokset

Hiilidioksidikylmälaitoksia on monenlaisia. Tässä luvussa käsitellään tavanomaisia hiilidioksidilaitoksia, joissa kylmäprosessi voi olla yli- tai alikriittinen.

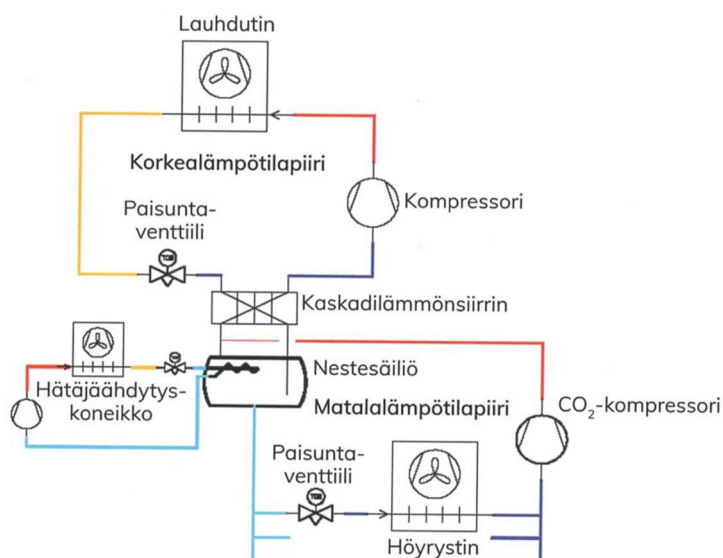
Ylikriittisissä kylmälaitoksissa kaasun lämpötila on hiilidioksidin kriittisen pisteen lämpötilan yläpuolella, eli kaasujäähdytin jäähdyttää kaasua ja itse lauhtuminen tapahtuu nestevaraajassa. Tämän tyyppistä prosessia on perinteisesti käytetty

mm. liikkuvassa ilmastoinnissa (autot, laivat), lämpöpumpuissa, kaupallisissa kylmlaitteissa (Booster-koneisto) sekä suorahöyrysteissä jäähallilaitoksissa. Kuvassa 11 on yksinkertaistettu ylikriittinen järjestelmä. (4, s. 6.) Tämän työn laskentaosiossa suorahöyrysteistä hiilidioksidilaitosta käytetään laskentapohjan vertauskohteena.



Kuva 11. Ylikriittinen suorahöyrsteinen hiilidioksidikylmlaitos, jonka matalapainevaraajassa on jäähdytyskierukka (6, s. 34).

Alikriittistä prosessia käyttävässä kylmlaitoksessa lauhtumislämpötila pysyy kriittisen pisteen lämpötilan alapuolella, eli kaasu lauhtuu lauhduttimessa. Hiilidioksidin alikriittisen prosessin ongelmana on kapea käyttölämpötila-alue. (4, s. 6–7.) Tämä on käytännössä sama kuin aikaisemmin käsitelty normaali kylmäprosessi (kuva 1). Alikriittistä prosessia käytetään tyypillisesti teollisuuskylmlaitosten kaskadikoneistojen matalalämpöpiireissä (kuva 12).



Kuva 12. Kaskadilaitoksen periaatekuva (6, s. 31).

Kaskadikylmälaitoksissa hiilidioksidi toimii höyrystyvänä kylmäaineena, jolloin hiilidioksidin prosessi pysyy alikriittisenä. Tämä toteutetaan kaskadi-lämmönsiirrimellä, jolla erotetaan korkealämpöpiiri ja matalalämpöpiiri toisistaan. Matalalämpöpiirissä hiilidioksidin lauhtumislämpö siirtyy korkealämpöpiiriin kylmäaineen höyrystimeen, joka puolestaan luovuttaa lämmön veteen tai ilmaan. Hiilidioksidin korkean käyttöpaineen ansiosta se on erityisen tehokas matalissa lämpötiloissa. Tämän ja vaarattomuuden takia hiilidioksidilla toimiva kaskadilaitos on parempi vaihtoehto pakkaskylmälaitoksissa kuin perinteinen kylmäjärjestelmä, jossa käytetään tavanomaisia kylmäaineita. (6, s. 30–32.)

## 3.2 Ammoniakki (R747)

### 3.2.1 Ammoniakin historiaa

Ammoniakki on yksi ensimmäisistä mekaanisissa kylmäjärjestelmissä käytetyistä kylmäaineista, jota on käytetty jo yli 150 vuotta. Carl von Lindeä pidetään ammoniakin pioneerina, koska hän kehitti kylmäprosessin, loi perustan nykyaikaiselle jäähdytysteknologialle ja kehitti vuonna 1876 ensimmäisen ammoniakikylmälaitoksen, joka suunniteltiin tarkkojen hyötysuhdelaskelmien avulla.

Ensimmäisen jäädytyskäyttöön tarkoitetun ammoniakkikompressorin kehitti kuitenkin David Boyle vuonna 1872. Boylen ammoniakkikompressoreja valmistettiin peräti 200 kappaletta vuoteen 1884 mennessä. Suurin osa näistä jäädytti Texasissa tuotettua lihaa. (7, s. 2; 8.)

### 3.2.2 Ammoniakin ominaisuudet

Ammoniakki on yksi yleisimmin käytetyistä kylmäaineista, sillä se on halpa, ympäristöystävällinen ja energiatehokas. Sen GWP- ja ODP-arvot ovat 0, joten se ei vaikuta ilmastonmuutokseen eikä ole haitallinen otsonikerrokselle. Ammoniakki on kuitenkin myrkyllinen ja tietyillä pitoisuuksilla palava, minkä vuoksi ammoniakkilaitosten suunnittelussa on oltava huolellinen. Taulukossa 3 on esitetty ammoniakin vaikutukset ihmiseen eri pitoisuuksissa. Kuten kaikki muutkin nykyiset kylmäaineet, ammoniakki on oikein käytettynä turvallinen käyttäjälle sekä ympäristölle. (7, s. 2–7, 41.)

Taulukko 3. Ammoniakin vaikutus ihmiseen eri pitoisuuksissa (7, s. 41).

Pitoisuus		Vaikutus ihmiseen
ppm	mg/m <sup>3</sup>	
5–10	3–7	Pistävä haju voidaan havaita.
20–25	14–18	Ärsytys ja haittavaikutukset alkavat.
100	70	Silmän sarveiskalvon ärsytys ja kyynelvuoto.
400–700	280–500	Välittömästi hengitysteitä ja silmiä ärsyttävää
5000	3600	Lyhytaikainen altistuminen pitoisuudelle voi aiheuttaa nopean kuoleman kurkunpään turvotuksen tai keuhkopöhön vuoksi.

Ammoniakin hyviä puolia ovat seuraavat:

- pitkä käyttöhistoria, paljon kokemusta käytöstä
- luonnollinen kylmäaine, joka ei ole haitallinen otsonikerrokselle, eikä vaikuta ilmastonmuutokseen
- halvempaa kuin HFC-kylmäaineet
- pistävän hajun vuoksi vuoto helppo havaita vaarattomilla pitoisuuksilla (5–50 ppm)
- laaja käyttölämpötila-alue ja hyvä energiatehokkuus erinomaisten termodynaamisten ominaisuuksien vuoksi
- ei aiheuta syöpää eikä mutaatioita. (7, s. 7.)

Ammoniakin heikot puolet taas ovat seuraavat:

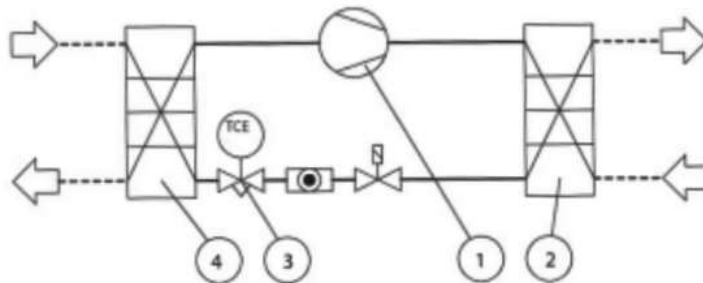
- myrkyllisyys ihmisille sekä vesieläimille
- herkkä syttyminen sekä tietyissä pitoisuuksissa räjähdysvaara
- tiettyjen metallien syövyttäminen. (7, s. 7.)

### 3.2.3 Ammoniakkikylmälaitokset

Seuraavaksi käsitellään kuiva- ja märkähöyrysteisiä ammoniakkijärjestelmiä, jotta saadaan käsitys niiden välisistä eroista.

Kuivahöyrysteinen ammoniakkijärjestelmä on yksinkertaisimmillaan sama kuin aiemmin käsitelty tyypillinen kylmäprosessi. Se koostuu kompressorista,

lauhduttimesta, paisuntaventtiilistä, höyrystimestä sekä putkistovarusteista ja automaatiolaitteista. Kuivahöyrysteisen kylmäjärjestelmän hyötysuhde on huomionpäättävämpi kuin märkähöyrysteisen, sillä tiettyjen metallien syövyttäminen on varmistettava, että kompressorille tuleva kylmäaine on tulistunut ennen kompressoria 5 K. Lisätulistus voidaan saada aikaan erillisellä lämmönsiirtimellä tai isommalla höyrystimellä. Vaikka järjestelmässä ei ole hyvä hyötysuhde, se on yksinkertainen, halvempi hankkia ja vaatii vähemmän kylmäainetäyttöä. Kuvassa 13 on esitetty kuivahöyrysteinen nesteenjähdytyskoneisto. (9, s. 190.)



Kuva 13. Kuivahöyrysteinen nesteenjähdytyskoneisto (9, s. 190).

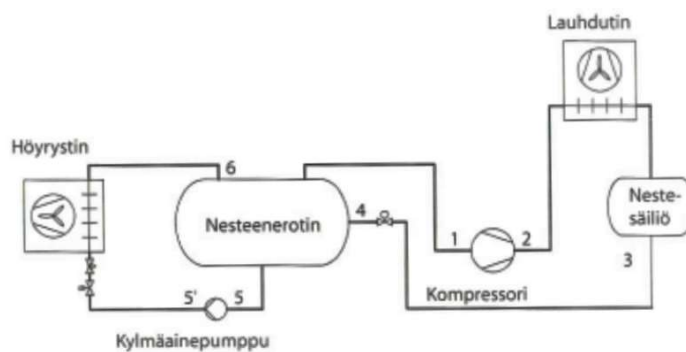
Märkähöyrysteinen ammoniakkilaitos voidaan toteuttaa pumppukiertoisilla höyrystimillä tai painovoimaisilla höyrystimillä. Näissä suurin osa kylmäaineesta kiertää nesteenerottimen ja höyrystimen välillä. Nimensä mukaisesti painovoimaiset eli termosifonihöyrystimet perustuvat painovoimaan. Niissä kierto tapahtuu tulevan nesteen ja lähtevän höyry-nesteseoksen tiheyseron avulla. (9, s. 191–192.)

Pumppukiertoisessa järjestelmässä kierto taas tapahtuu pumppujen avulla. Kummassakin järjestelmässä höyry-nesteseos palaa höyrystimeltä nesteenerottimelle, jossa nestepisarot putoavat pohjalle. Kompressorin imee nesteenerottimen yläosassa olevan höyryn ja puristaa sen, jonka jälkeen kylmäaine virtaa lauhduttimelle ja lauhtunut neste palaa paisuntaventtiin kautta nesteenerottimelle. Näin höyrystimeen voidaan ajaa nesteenerottimelta suurempi



nesteenmäärä, kuin siellä höyrystyy. Samalla varmistetaan hyvä lämmönsiirto. (9, s. 191–192.)

Märkähöyrysteinen järjestelmä on kuivahöyrysteiseen järjestelmään verrattuna hyötysuhteeltaan paljon tehokkaampi, eli sen käyttökustannukset ovat pienemmät, mutta se vaatii suuremmat putket ja enemmän kylmäainetäytöstä, joten hankintainvestointi on suurempi. Kuvassa 14 on esitetty märkähöyrysteisen pumppukierroisen kylmäkoneiston periaate. (9, s. 191–192.)



Kuva 14. Märkähöyrysteisen pumppukierroisen kylmäkoneiston periaatekaavio (9, s. 189).

Tämän työn laskentapohjan vertauskohteena käytetään märkähöyrysteistä pumppukierroista ammoniakkilaitosta välillisellä jäähdytyksellä.

#### 4 Kylmäainevalintaan vaikuttavat tekijät

Kylmäainevalintaan vaikuttavia tekijöitä on monia. Nämä vaihtelevat teknisistä ja taloudellisista tekijöistä ympäristö- ja turvallisuustekijöihin. Oikean kylmäaineen löytäminen vaatii perusteellisen analyysin, jossa otetaan huomioon kaikki nämä eri tekijät. On tärkeää muistaa, että ei ole olemassa kylmäainetta, jolla on kaikki hyvät ominaisuudet, ja tämän vuoksi kylmäainevalinta on aina jonkinasteinen kompromissi, jossa kylmäaine valitaan kulloisenkin käyttötarpeen mukaan. (1, s. 32.)

#### 4.1 Kylmäaineiden termodynaamiset ominaisuudet

Kylmäaineiden termodynaamiset ominaisuudet vaikuttavat merkittävästi kylmäaineenvalintaan. Kylmäaineen toiminta kylmäkoneistossa perustuu sen kykyyn sitoa ja luovuttaa lämpöä olomuodon muutoksissa, jolloin selvittää pienellä massavirralla. Kylmäainetta valitessaan suunnittelijan on analysoitava erilaisia ominaisuuksia, jotka vaikuttavat kylmäaineen käyttäytymiseen järjestelmän kylmäteknisessä kiertoprosessissa.

Kylmäaineen paine-lämpötila-suhde määrää sen faasimuutokset. Faasimuutoksen aikana sitoutuneen tai vapautuneen lämpöenergian määrä on kaikilla kylmäaineilla eri. Kylmäaineet, jotka sitovat paremmin lämpöä, voivat sitoa enemmän lämpöenergiaa höyrystymisen aikana ja vapauttaa enemmän lauhtumisen aikana. Tämä parantaa jäähdytyskapasiteettia ja tehokkuutta. Lämpöenergian sitomisominaisuudet saadaan selville, kun on tiedossa kylmäaineen entalpia ja ominaislämpö. Entalpia edustaa aineen kokonaislämpöpitoisuutta. Ominaislämpö on taas lämpöenergian määrä, joka tarvitaan aineen lämpötilan nostamiseen. Kylmäaineet, joilla on sopiva entalpia- ja ominaislämpöarvot, edistävät tehokasta lämmönsidontaa ja järjestelmän tehokkuutta. (1, s. 19–20, 31.)

Kuten edellä todettiin, kylmäaineilla on myös kriittinen piste, jonka jälkeen ne eivät voi esiintyä erillisinä neste- ja höyryfaaseina. Kylmäaineen kriittisen pisteen ja transkriittisen (ylikriittisen) käyttäytyminen on tärkeä tietää, varsinkin alhaisen kriittisen pisteen omaavien kylmäaineiden käytössä. (1, s. 19–20, 31.)

Taulukko 4. Kylmäaineiden haluttuja ominaisuuksia ja näiden ominaisuuksien avulla saavutettu hyöty. (1, s. 31).

Ominaisuus	Saavutettu hyöty
suuri höyrystymislämpö	pieni massavirta, pieni kompressorin koko ja pieni putkikoko

pieni kompressorin paine-suhde (korkeapaine/matalapaine)	pieni puristustyö ja vähäinen tulistuminen puristuksessa
pieni viskositeetti	painehäviöt venttiileissä ja putkistoissa pienet
hyvät lämmönsiirto-ominaisuudet	pieni lämmönsiirtopinta-alan tarve
suuri tilavuustuotto	pieni kompressorin koko
höyrystymispaine yli 1 bar	mahdolliset vuodot tapahtuvat putkistosta ulospäin estäen ilman ja kosteuden pääsyn kylmälaitokseen

## 4.2 Kylmälaitoksen energiatehokkuus

Kylmäaineiden energiatehokkuus on kriittinen tekijä, joka vaikuttaa merkittävästi päätöksentekoprosessiin valittaessa kylmäainetta kylmäjärjestelmään. Energiatehokkuus vaikuttaa suoraan käyttökustannuksiin ja järjestelmän yleiseen suorituskykyyn.

Energiatehokkuutta voidaan arvioida kylmäkerroimella. Se edustaa jäähdytystä tilasta poistetun lämmön ja jäähdytyksen saavuttamiseen tarvittavan energian suhdetta. Korkeampi kylmäkerroin tarkoittaa parempaa energiatehokkuutta. Kylmäkerroin saadaan laskettua kaavalla 1 jakamalla höyrystimen sitoma lämpö kompressorin tekemällä työllä. (9, s. 10.)

$$\varepsilon = \frac{Q_0}{W} \quad (1)$$

$\varepsilon$  on kylmäkerroin

$Q_0$  on höyrystimen sitoma lämpö (kW)

$W$  on kompressorin tekemä työ (kW).

Lämpöpumppujen hyötysuhteen laskennassa käytetään lämpökerrointa, jossa höyrystimen sitoma lämpö korvataan lauhduttimen luovuttamalla lämmöllä  $Q_L$ , joka jaetaan kompressorin tekemällä työllä (kaava 2). (9, s. 10.)

$$\varphi = \frac{Q_L}{W} \quad (2)$$

$\varphi$  on lämpökerroin

$Q_L$  on lauhduttimen luovuttama lämpö (kW)

$W$  on kompressorin tekemä työ (kW).

Energiatehokkuuslaskennassa kylmäkertoimelle on yleistynyt termi EER ja lämpökertoimelle COP. Vakiintuneet termit keskimääräiselle hyötysuhteelle tietyllä aikavälillä ovat SEER ja SCOP (10).

### 4.3 Ympäristövaikutukset

Ilmastonmuutokseen ja ympäristön suojeluun liittyvien huolenaiheiden lisääntyessä alhaisen ympäristöjalanjäljen omaavan kylmäaineen valitsemisesta on tullut keskeinen seikka, joka vaikuttaa merkittävästi päätöksentekoprosessiin.

GWP-arvo kuvaa kylmäaineen kasvihuonehaitallisuutta tietyllä aikavälillä (yleensä 100 vuotta) verrattuna hiilidioksidiin, jonka GWP-arvo on 1. Kylmäaineilla, joilla on korkea GWP-arvo, on suurempi vaikutus ilmastonmuutokseen, jos niitä pääsee ilmakehään. Alhaisen GWP-arvon kylmäaineiden käyttö vähentää kasvihuonekaasupäästöjä ja hillitsee ilmaston lämpenemistä. (1, s. 32.)

Jotkut kylmäaineet aiheuttavat otsonikatoa, jos niitä vapautuu ilmakehään. Referenssilukuna käytetään kylmäaineen R11 ODP-lukua, jolle on annettu arvo 1,0. Kylmäaineet, joiden ODP-luku ei ole nolla, voivat johtaa otsonikerroksen ohenemiseen ja lisääntyneeseen ultraviolettisäteilyyn (UV) maan pinnalla. (1, s. 32.)

Myös vuotojen mahdollisuus järjestelmän elinkaaren aikana on ratkaisevaa. Kylmäainevuoto joko väärästä käsittelystä, järjestelmän huollosta tai onnettomuuksista johtuen aiheuttaa suoria päästöjä, jotka vaikuttavat ympäristöön. Näiden päästöjen minimoimiseksi suositellaan kylmäaineita, joilla on alhainen GWP ja pienempi vuotopotentiaali. (1, s. 32.)

Vuonna 1987 allekirjoitettu Montrealin pöytäkirja ja sen jälkeen julkaistu F-kaasuasetus, rajoittavat otsonikerrosta heikentävien ja korkean GWP:n omaavien kylmäaineiden käyttöä. Näiden määräysten noudattaminen ei ole vain lakisääteinen vaatimus, vaan se osoittaa myös sitoutumista ympäristövastuuseen. Ympäristöystävällisten kylmäaineiden valitseminen varmistaa pitkän aikavälin vaatimustenmukaisuuden ja samalla vältetään tulevat jälkiasennuskustannukset. (11; 12.)

#### 4.4 Turvallisuusnäkökohdat

Kylmäaineiden käyttöturvallisuuteen liittyvät näkökohdat, joihin sisältyvät mm. myrkyllisyys, syttyvyys ja yleiset turvallisuusvaikutukset, vaikuttavat myös päätöksentekoprosessiin, kun valitaan kylmäainetta kylmälaitokseen. Henkilöstön, ympäristön ja omaisuuden turvallisuuden varmistaminen on ensiarvoisen tärkeä huolenaihe, joka vaikuttaa suoraan järjestelmän suunnitteluun, rakentamiseen, käyttöön ja huoltoon. ASHRAE myöntää ja määrittelee kylmäaineiden viralliset turvallisuusluokitukset eli myrkyllisyyden ja syttymisherkkyyden. (1, s. 41–42.)

Myrkylliset kylmäaineet voivat aiheuttaa terveysriskejä henkilöille, jotka voivat joutua kosketuksiin niiden kanssa asennuksen, huollon tai vahingossa tapahtuvien vuotojen aikana. Myrkyllisyysluokituksia on kaksi. Ryhmään A kuuluvat kylmäaineet, joilla ei ole tunnettuja haitallisia vaikutuksia ihmisiin, kun kylmäaineen keskipitoisuus ilmassa on työpäivän ja -viikon aikana jatkuvasti vähintään tai yli 400 ppm. Ryhmään B kuuluvat kylmäaineet, joilla on tunnettuja haittavaikutuksia alle 400 ppm pitoisuuksillakin. Hiilidioksidi kuuluu ryhmään A ja ammoniakki ryhmään B. (1, s. 41–42.)

Syttymisherkkyydellä kuvataan kylmäaineen alemmaa syttymisrajaa. Syttymisisherkkyydsuokkia on kolme. Ryhmässä 1 on kylmäaineet, jotka eivät muodosta ilman kanssa palavaa seosta millään pitoisuudella. Hiilidioksidi kuuluu tähän ryhmään. Ryhmässä 2 on kylmäaineet, jotka muodostavat palavan seoksen ilman kanssa, kun pitoisuus ilmassa on  $\geq 3,5$  tilavuusprosenttia. Ammoniakki kuuluu ryhmään 2L. Tämän luokan tarkoituksena on erottaa yksikomponenttiset

ja sekoitetut kylmäaineet, jotka ovat vaikeasti syttyviä ja kestävät liekkejä, muista luokan 2 (ja luokan 3) syttyvistä kylmäaineista. (13.) Ryhmään 3 taas kuuluvat kylmäaineet, jotka muodostavat palavan seoksen ilman kanssa pitoisuuden ollessa alle 3,5 tilavuusprosenttia. (1, s. 41–42.)

Näistä kahdesta luokituksesta syntyy turvallisuusluokitus. Hiilidioksidilla tämä on A1 ja ammoniakilla B2L (1, s. 44; 13).

## 5 Laskentaohjelman kehittäminen

Ennen laskentapohjan kehittämistä on käytävä läpi laskentaohjelmalle asetettavat tavoitteet, ohjelmaan syötettävät lähtötiedot ja laskentaohjelman toimintatapa.

### 5.1 Tavoitteiden rajaaminen ja lähtötiedot

Hiilidioksidi- ja ammoniakilaitosten vertailu on vaikeaa, koska molemmilla kylmäaineilla on paljon erilaisia käyttösovelluksia. Insinööriyössä kehitettävän laskentapohjan täytyy ensin löytää lähtötietojen, kuten jäähdytystehontarpeen ja ulkolämpötilan perusteella kummallekin kylmäaineelle optimaaliset komponentit, ja sen jälkeen verrata kylmäaineita keskenään.

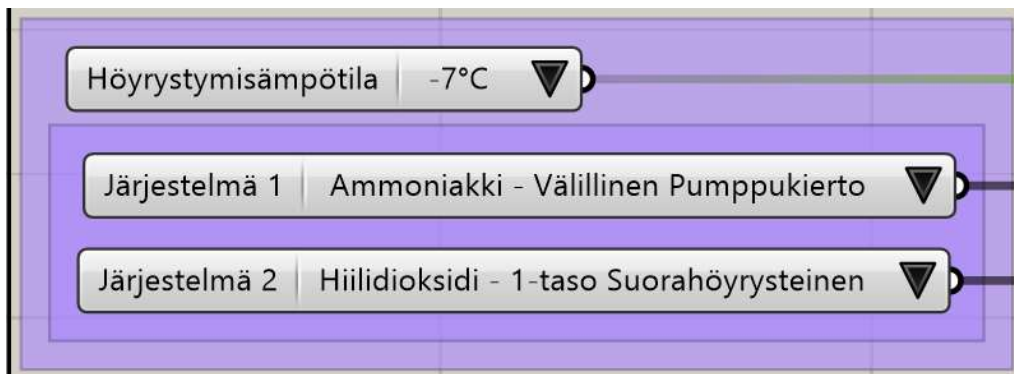
Laskentaohjelma rakennetaan Rhino3D-suunnitteluohjelmiston visuaalisen ohjelmointikielen eli grasshopperin pohjalta. Ohjelman on oltava mahdollisimman käyttäjäystävällinen ja helposti muokattavissa. Excelistä linkitettyinä lähtötietoina käytetään ulkolämpötiloja ja jäähdytystehontarvetta. Nämä tiedot saadaan energiasimuloinnista. Tämän jälkeen käyttäjä voi valita järjestelmän. Järjestelmät on kokonaan erotettu toisistaan ja vasta, kun käyttäjä on valinnut alavetovalikosta halutun järjestelmän, ohjelma katsoo järjestelmänumerot ja syöttää lähtötiedot eteenpäin haluttuun järjestelmään. Tällä järjestelyllä taataan ohjelman jatkokehitysmahdollisuus, koska tällöin voidaan helposti lisätä alavetovalikkoon uusi numero ja sitä vastaava järjestelmä. (Kuva 15.)



Kuva 15. Laskentapohjan järjestelmän valintavalikko.

Laskentaohjelmassa voidaan valita suorahöyrysteinen yksitasoinen ylikriittinen hiilidioksidilaitos tai välillinen pumppukiertoinen ammoniakkilaitos.

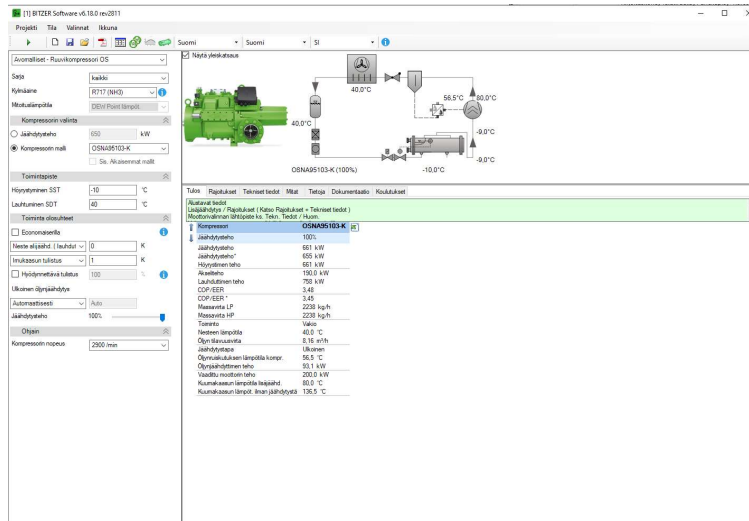
Koska suurin osa kompressoritiedoista tulee Bitzerin mitoitusohjelmasta, sieltä tulevat myös suurimmat rajoitukset. Laskentaohjelman hiilidioksidilaitoksella ei päästä pakkastilojen mitoitushöyrystymislämpötiloihin, joten mitoitushöyrystymislämpötilaksi voidaan valita vain  $-7\text{ °C}$  (kuva 16), joka on yksi mahdollinen kylmätilan mitoitushöyrystymislämpötila. Ammoniakilla ei ole samaa rajoitusta, joten jatkokehitystä varten laskentaohjelman ammoniakkikylmälaitos voidaan laskea myös pakkashuoneiden matalammilla höyrystymislämpötiloilla. Insinöörityössä ammoniakkilaitoksen höyrystymislämpötilaksi on valittu  $-10\text{ °C}$  ja siirtimen asteisuudeksi 3 K.



Kuva 16. Höyrystymislämpötilan valinta laskentapohjassa.

Höyrystymislämpötilalla  $-10\text{ °C}$  ja lauhtumislämpötilalla  $+40\text{ °C}$  yhden ison ammoniakkikompressorin jäähdytystehoksi saadaan 661 kW (kuva 17.).

Toimintavarmuuden ja helpon huollon kannalta kylmäjärjestelmissä on hyvä olla vähintään kaksi kompressoria. Hyvän osatehotoiminnan varmistamiseksi laskentaohjelmassa voidaan valita maksimissaan viisi rinnan kytkettyä kompressoria, eli kun laskenta tapahtuu, ohjelma valitsee kahden, kolmen, neljän ja viiden kompressorin järjestelmät ja vertailee niitä keskenään. Kompressorien määrää on mahdollista lisätä myöhemmin.



Kuva 17. Ammoniakkilaitoksen ruuvikompressorin mitoitusarvoja (14).

Jäähdytystehon rajoitus ei tule ammoniakkin, vaan hiilidioksidin puolelta. Kun hiilidioksidilaitoksen höyrystymislämpötila on  $-7\text{ °C}$  ja kaasunjäähdyttimeltä palaavan kaasun lämpötila  $+40\text{ °C}$ , saavutetaan 608 kW:n jäähdytysteho vasta 10 kompressorilla. Tämän takia hiilidioksidi kompressoreiden maksimimäärä on 10 (kuva 18.).

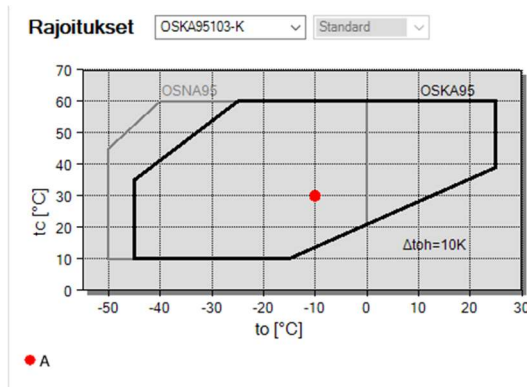






Kuva 19. Lauhtumislämpötilan valinta laskentaohjelmassa.

Lauhtumislämpötilan laskua rajoittaa myös kompressorin. Kuvassa 20 näkyy kompressorin OSKA95103-K lämpötilarajoitukset.



Kuva 20. Esimerkki kompressorin käyttöalueesta, jossa  $t_o$  on höyrystyslämpötila ja  $t_c$  on lauhtumislämpötila (14).

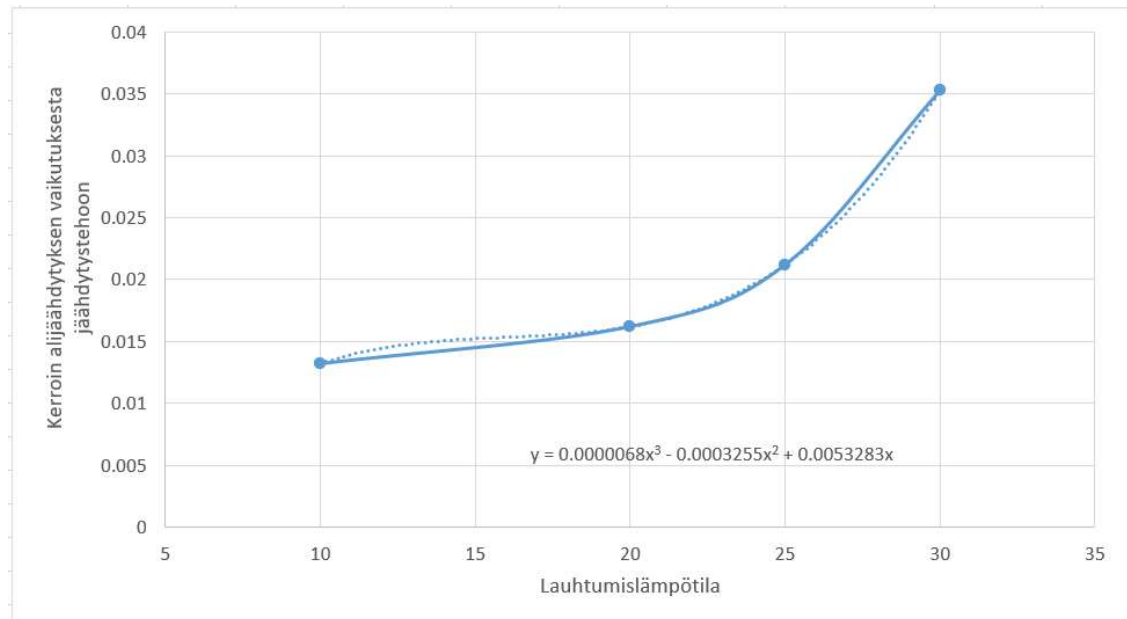
Laskennassa on siis huomioitava kompressoreiden väliset erot, ja lauhtumislämpötilan on mentävä sen mukaan. Esimerkiksi, kun mitoitusjäähdytystehontarve on 1200 kW, höyrystyslämpötila on  $-10\text{ °C}$  ja mitoituslauhtumislämpötila on  $30\text{ °C}$ , laskentaohjelma todennäköisesti valitsee kahden kompressorin järjestelmälle OSKA95103-K-kompressorit. Tämän jälkeen järjestelmä katsoo kyseisen kompressorin rajoitukset, ja kuten kuvassa 20 havaitaan, minimilauhtumislämpötila on  $15\text{ °C}$ . Kun tähän huomioidaan 11 K lämpötilaero, alhaisin ulkolämpötila, jonka ohjelma ottaa huomioon tähän järjestelmään, on  $4\text{ °C}$ .

Rajoitukset ovat erilaiset eri kompressorimalleissa, joten ohjelmaan lisätään komponentti, joka huomioi nämä erot.

## 5.2 Laskentaohjelman rakentaminen

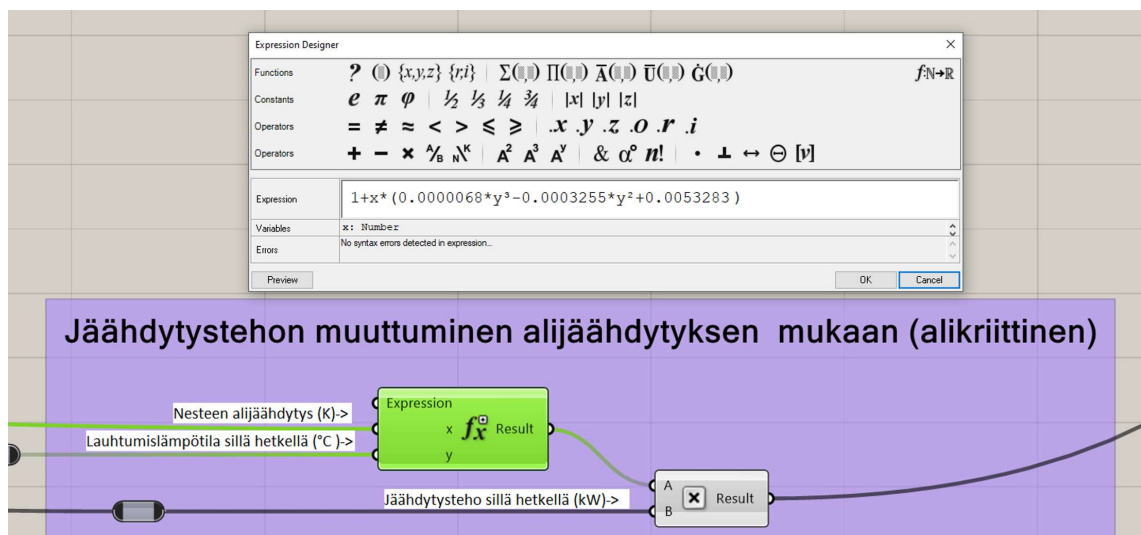
Laskentaohjelman rakentaminen alkaa keräämällä tiedot kompressoreiden toiminnasta eri tilanteissa. Bitzerin Bitzer Software- laskentaohjelmassa voidaan valita kompressorin ja selvittää sen ottama sähköteho sekä sen tekemä jäähdysteho eri tilanteissa. Tulokseen vaikuttaa monta tekijää: kompressorin malli, höyrystyslämpötila, lauhtumislämpötila, alijäähdytys ja imukaasun tulistus. Pelkästään säätämällä lauhtumislämpötilaa ja vaihtamalla kompressorin mallia tulee ammoniakissa 600 kpl ja hiilidioksidissa 583 kpl eri arvoa jäähdytys- ja sähköteholle. Jäljelle jäävien tekijöiden vaikutukset arvioidaan Excel-ohjelmassa tehdyissä kaavioissa, joista saadaan selville vaikutukset jo saatuihin jäähdytys- ja sähkötehoihin.

Kuvassa 21 näkyy sovite, joka antaa lauhtumislämpötilan mukaan kertoimen jäähdystehon laskentaan alijäähdytyksen perusteella. Esimerkiksi lauhtumislämpötilalla 20 °C kerroin on 0,0162. Kun alijäähdytys 4 K kerrotaan kuvasta saadulla kertoimella ja lopputulokseen lisätään 1, saadaan jäähdytyskerroimeksi 1,0648. Kun jäähdysteho 100 kW kerrotaan kertoimella 1,0648, saadaan 4 K:in alijäähdytyksellä ja 20 °C:n lauhtumislämpötilalla todelliseksi jäähdystehoksi 106,48 kW.



Kuva 21. Kuvaaja lauhtumislämpötilan vaikutuksesta alijäähdytykseen.

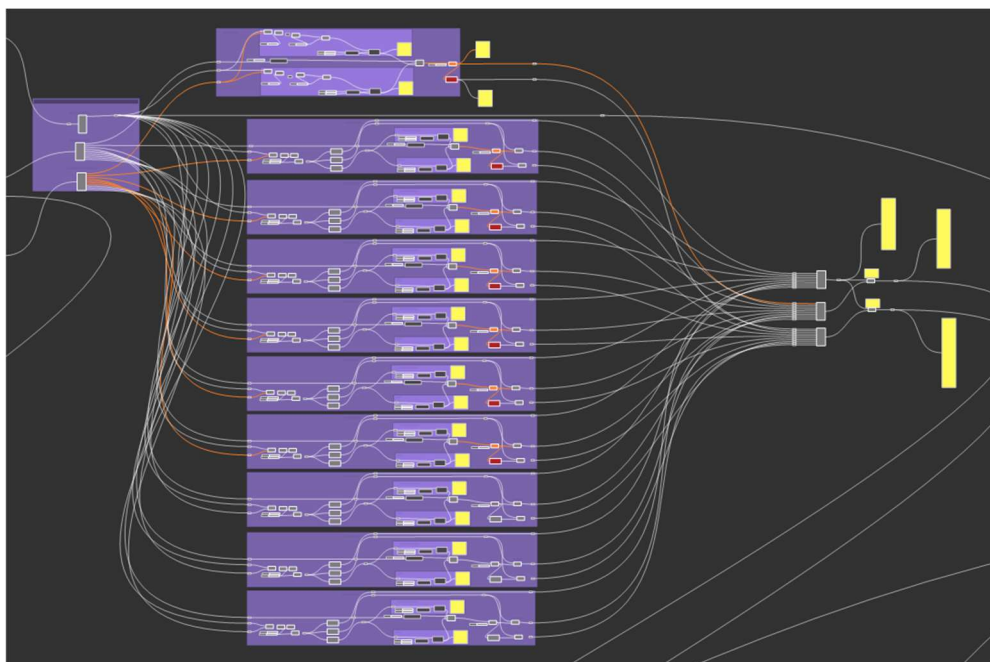
Kuvassa 22 nähdään, miten funktio yhdistyy ohjelman laskentaan. Samantyyppisiä funktioita käytetään myös tulistus- ja osateholaskennassa.



Kuva 22. Funktio laskennan osana.

Osateholaskennassa ohjelma katsoo valitun kompressorimallin ja määrän, sen jälkeen ohjelma arvioi hetkellisen lauhtumislämpötilan ja jäähdytystehontarpeen mukaan monta kompressoria pitäisi olla samaan aikaan päällä ja päällä olevien

kompressoreiden osatehot. Ohjelmassa on käytetty oletusta, että mahdollisimman monta päällä olevista kompressoria käy 100 % teholla ja yhtä kompressoria käytetään tehonsäätöön. Jos kuitenkin tämän yhden kompressorin osateho laskee alle 75 %, loputkin kompressorit alkavat käymään osatehoilla, ennen kuin voidaan kytkeä lisää kompressoreita kokonaan pois päältä. Tällä tavalla saadaan mahdollisimman pieni sähkönkulutus. Kuvassa 23 näkyy laskentaohjelman hiilidioksidikompressoreiden osateholaskentamoduuli.



Kuva 23. Hiilidioksidikompressoreiden osateholaskentamoduuli.

Kompressorimalleissa on eroja osatehotoiminnan suhteen. Tämän takia tulee tilanteita, jolloin kompressori tuottaa ns. enemmän jäähdytystehoa, kuin mitä vaaditaan, varsinkin kun käytössä on vain muutama kompressori. Tällaisessa tilanteessa EER laskenta vääristyy, sillä vaadittuun jäähdytystehoon pääsevissä kompressoreissa on silloin pienempi jäähdytysteho. Vääristymisen estämiseksi laskentaohjelmaan on lisätty painike, jota painamalla kompressori, joka ei pääse vaadittuun osatehoon, käy vain pätkittäin.

### 5.3 Laskenta ja lopputulos

Seuraavaksi käydään läpi valmiin laskentaohjelman käyttämistä. Ensimmäiseksi syötetään lähtötiedot kuvan 24 mukaisesti. Höyrystyslämpötilaksi valitaan alavetovalikosta  $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Lauhtumis- ja ulkolämpötilan väliseksi eroksi valitaan 11 K, mikä koskee vain alikriittistä jäähdytystä ja vaikuttaa hiilidioksidikylmäiläitoksen laskennassa yli- ja alikriittisen toiminnan rajaan. Lauhtumislämpötila voi laskea -valikko on tarkoitettu lähinnä ohjelman jatkokehitystä varten silloin, kun esimerkiksi käytetään välillistä lauhdutusta. Seuraavaksi valitaan halutut järjestelmät ja laitetaan EER korjaus päälle. Ulkolämpötilat ja jäähdytystehontarpeet lisätään erilliseen Excel -tiedostoon, josta laskentaohjelma tuo tiedot laskentaan.

**Lähtötiedot**

Höyrystyslämpötila  $-7^{\circ}\text{C}$

Lauhtumis- ja ulkolämpötilan välinen ero 11

Lauhtumislämpötila voi laskea Kyllä

Järjestelmä 1 Ammoniakki - Väillinen Pumppukierto

Järjestelmä 2 Hiilidioksidi - 1-taso Suorahöyrysteinen

EER Korjaus True

Laskenta päällä True

Kuva 24. EER korjaus ja lauhtumislämpötilan laskentavalikko.

Viimeisenä vaiheena syötetään vielä järjestelmäkohtaiset lähtötiedot kuvan 25 mukaisesti. Kaikkia arvoja voi muuttaa käyttösovelluksen mukaiseksi. Tästä voi säätää korkeampaa lämpötilaeroa kaasujäädyttimelle, muuttaa mitoituksen tulistus- tai alijäähdytysarvoja, tai vaihtaa lämmönsiirtimen asteisuutta. Kun lähtötiedot on syötetty, ohjelman laskenta voidaan laittaa päälle. Ohjelma vie lähtötiedot laskentaan ja noin 70 sekunnin kuluessa saadaan laskentatulokset

### Hiilidioksidi 1-taso ylikriittinen

Ulkolämpötilan ja kaasujäähdyttimeltä tulevan kaasun lämpötilan ero (K)

Imukaasun tulistus (ylikriittinen) (K)

Tulistus (alikirittinen) (K)

Alijäähdytys (alikirittinen) (K)

---

### Ammoniakki - Välillinen Pumpputkierto

Tulistuminen (K)

Alijäähdytys (K)

Häviö lämmönsiirtimessä (K)

Kuva 25. Näkymä laskentaohjelmasta, kun kaikki lähtötiedot on syötetty ohjelmaan.

Lopuksi lopputulos (kompressorimäärä, kompressorimalli, sähkönkulutus ja EER) kootaan yhteen ja esitetään kuvan 26 mukaisesti. Lopputuloksena nähdään kaikki yhteensopivat kompressorikonfiguraatiot ja niiden ottama sähköteho. Näillä käyttökustannustiedoilla voidaan tehdä kylmäainevalinta.

Kompressorin akseliteho annetussa aikavälissä Ammoniakki	
1	Kompressori: 523 MWh OSKA95103-K SEER 2.93
2	Kompressoria: 361 MWh OSKA8581-K SEER 4.23
3	Kompressoria: 368 MWh OSKA8561-K SEER 4.16
4	Kompressoria: 361 MWh OSKA7462-K SEER 4.24
5	Kompressoria: 357 MWh OSKA7452-K SEER 4.28

Kompressorin sähköteho annetussa aikavälissä Hiilidioksidi	
8	Kompressoria: 388 MWh 6DTE-50K SEER 3.95
9	Kompressoria: 388 MWh 6DTE-50K SEER 3.95
10	Kompressoria: 387 MWh 6FTE-50K SEER 3.96

Kuva 26. Laskentaohjelman tulostama yhteenveto laskentatuloksista vertailtavilla järjestelmillä.

Lopputuloksesta nähdään, että annetuilla lähtötiedoilla ammoniakki on taloudellisempi valinta. Pelkästään yhden kompressorin

ammoniakkikylmälaitoksessa on huonompi SEER, kuin kaikissa jäähdytystehontarpeen saavuttavissa hiilidioksidikylmälaitoksessa. Tässä kannattaa muistaa, että yhden kompressorin järjestelmiä ei käytetä normaalitilanteissa huonon käyttövarmuuden ja huollon takia.

Seuraavaksi vuorossa on hankintakustannuksien laskeminen. Pelkästään katsomalla käyttökustannuksia päätettäisiin, että viiden kompressorin ammoniakkikylmäjärjestelmä on paras vaihtoehto alhaisimman sähkönkulutuksen takia. Kuitenkin käytännössä saattaa olla, että järjestelmän hankintahinta neljän kompressorin järjestelmään verrattuna on sen verran suurempi, että paremman käyttökustannuksen tuoman arvon saisi vasta kompressoreiden käyttöään ulkopuolella. Kun takaisinmaksuajat ja hankintahinnat ovat selvineet, on aika esittää tilaajalle nämä eri vaihtoehdot.

## 6 Yhteenveto

Insinööriyön tavoitteena oli käydä läpi ammoniakki- ja hiilidioksidikylmälaitosten eroja ja luoda laskentaohjelma, jolla voidaan selvittää, kumpi kylmälaitos on so-pivampi käyttökustannusten perusteella.

Työssä selvitettiin hiilidioksidi- ja ammoniakkikylmäjärjestelmien useita eroavai-suuksia. Vertailussa käytiin läpi myös erilaisten laitostekniikoiden, ympäristövai-kutusten ja toimintaolosuhteiden vaikutukset kylmäainevalintaan.

Insinööriyön tuloksena kehitettiin laskentapohja, jolla voidaan vertailla välillisen pumppukiertoisen ammoniakkilaitoksen ja suora-höyrysteisen hiilidioksidilaitok-sen käyttökustannuksia tietyissä toimintaolosuhteissa. Laskentaohjelma on ra-kennettu Rhino3D-suunnitteluohjelmiston visuaalisen ohjelmointikielen eli grasshopperin pohjalta. Laskentapohjaan voidaan jatkossa lisätä komponent-teja, joilla laskentaa saadaan tarkemmaksi. Tällaisia komponentteja olisivat esi-merkiksi liukuva lauhtumislämpötilan ja ulkoilman lämpötilan välinen ero sekä tulistuminen ja alijäähtyminen, joiden liukuma riippuisi aina sen hetken olosuh-teista. Sen lisäksi ohjelmaan saadaan lisättyä suhteellisen helposti lisää



höyrystymislämpötiloja ja erilaisia kylmäjärjestelmiä sekä muokattua osateho-laskentaa. Isoin komponentti, joka ohjelmasta puuttuu, on luonnollisesti hankintakustannuksien laskeminen. Sen lisääminen on ohjelman jatkokehityksen kannalta suurin tavoite.

Insinööriyössä luotu ohjelma hyödyttää Rambollin kylmäsuunnittelua, jossa pyritään kestävämpiin, taloudellisempiin ja tehokkaampiin kylmätekniikan ratkaisuihin. Ohjelman kehittäminen edelleen parantaa ohjelmasta saatavaa hyötyä.

## Lähteet

- 1 Kaappola, Esko; Hirvelä, Aulis; Jokela, Matti & Kianta, Jani. 2020. Kylmätekniikan perusteet. Helsinki: Opetushallitus.
- 2 Refrigeration Overview. Verkkoaineisto. Hillphoenix. <<https://www.hillphoenix.com/services/learning-center/refrigeration-overview/>>. Luettu 16.6.2023.
- 3 Screw Compressors. Verkkoaineisto. Bitzer SE. <<https://www.bitzer.de/gb/en/screw-compressors/>>. Luettu 20.7.2023.
- 4 CO2 refrigerant for Industrial Refrigeration. DKRCI.PZ.000.C1.02 / 520H2242. 2007. Artikkel. Danfoss A/S.
- 5 Kylmäaineiden jaottelu. 2019. Verkkoaineisto. Darment. <<https://www.darment.fi/kylmaaineinfo/kylmaaineiden-jaottelu/>>. Päivitetty 15.3.2019. Luettu 18.06.2023.
- 6 Haukås, Hans T. Julkaistu 2016. CO2 (R744) kylmäaineena. Suomentanut Suomen kylmäyhdistys ry 2020. Helsinki: Suomen kylmäyhdistys ry.
- 7 Alijoki, Tapio; Pulkki, Laura & Puputti, Timo. 2022. Ammoniakki kylmäaineena. Helsinki: Suomen Kylmäyhdistys ry.
- 8 Carl von Linde. 2023. Verkkoaineisto. Encyclopedia Britannica. <<https://www.britannica.com/biography/Carl-Paul-Gottfried-von-Linde>>. Luettu 8.7.2023.
- 9 Hakala, Pertti & Kaappola, Esko. 2020. Kylmälaitoksen suunnittelu. Helsinki: Opetushallitus.
- 10 Ilmalämpöpumppu ABC. Verkkoaineisto. Vattenfall. <<https://www.vattenfall.fi/ilmalampopumppu/ilmalampopumppu-abc/>>. Luettu 20.7.2023.
- 11 Kerttula, Saara. 2017. Montrealin pöytäkirja pelasti otsonikerroksen. Verkkoaineisto. KylmäExtra. <[https://www.kylmaextra.fi/lehdet/kylma-extra\\_2\\_2017/montrealin\\_poytakirja\\_pelasti\\_otsonikerroksen](https://www.kylmaextra.fi/lehdet/kylma-extra_2_2017/montrealin_poytakirja_pelasti_otsonikerroksen)>. 31.10.2023. Luettu 18.08.2023.
- 12 Uusi F-kaasuasetus tuo rajoituksia kylmäaineiden käyttöön. 2014. Verkkoaineisto. Tukes. <<https://tukes.fi/-/uusi-f-kaasuasetus-tuo-rajoituksia-kylmaaineiden-kaytto-1>>. 5.6.2014. Luettu 31.10.2023.

- 13 Addition Of Subclass 2L Refrigerants Proposed For ASHRAE Refrigerant Safety Standard. 2015. Verkkoaineisto. ASHRAE. <<https://www.ashrae.org/about/news/2015/addition-of-subclass-2l-refrigerants-proposed-for-ashrae-refrigerant-safety-standard>>. Luettu 18.08.2023.
- 14 Bitzer Software. Versio 6 18.0 rev 2812. 2023. Bitzer.