

Mikko Peltonen

CO₂-JÄÄHDYTYSYKSIKÖN OHJAUKSEN RAKENNE JA VAATIMUKSET

Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Diplomityö
Toukokuu 2021

TIIVISTELMÄ

Mikko Peltonen: CO₂-jäähdytysyksikön ohjauksen rakenne ja vaatimukset
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Sähkötekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma
Toukokuu 2021

Tämän työn tavoitteena oli koota Huurteen jäähdytysyksiköiden säädinkehitykselle tarpeellinen pohjatieto yhteen tiiviiseen teokseen, sekä asettaa ohjauksen kannalta tärkeimmät vaatimukset säätimen alustan valinnalle ja ohjausten rakenteelle. Säädinkehityksen tarkoitus on lopulta tuottaa Huurteen käyttöön jäähdytysyksikkösäädin, jolla saadaan toteutettua toimintoja, joita ei kolmannen osapuolen yleismallisilla säätimillä saada tehtyä. Lisäksi kehitettävä säädin saadaan jo alusta asti rajapinnoiltaan Huurteen järjestelmäarkkitehtuuriin sopivaksi.

Työ alkaa teoriaosuudella, jossa esitetään keskeinen kylmätekniikan teoria ja kuinka analysoida jäähdytysjärjestelmän toimintaa p-, h -diagrammista. Lisäksi teoriaosuudessa esitetään, mitä erityisiä yksityiskohtia hiilidioksidin käyttö kylmäaineena järjestelmän ohjaamiseen sekä analysointiin tuo. Hiilidioksidin normaalilla jäähdytysprosessin toiminta-alueella sijaitseva kriittinen piste aiheuttaa jäähdytysprosessissa muista kylmäaineista poikkeavia tilanteita, jotka on huomioitava prosessin ohjaamisessa.

Säätimen alustavalinnan vaatimusten asettamiseksi käytiin jäähdytysyksikön keskeisimmät komponentit läpi yksityiskohtaisesti huomioiden niiden säädinkehitykseen tuomat erityisvaatimukset. Säädinalustan valintaan kerättiin eri ohjauskokonaisuuksien IO-pisteet ja niiden tyypit. Lisäksi tarkennettiin erityyppisten lähtöjen ja tulojen ominaisuuksien merkitystä jäähdytysyksiköiden säätämisessä.

Jäähdytysyksikön eri osien ohjauksesta laadittiin toimintakuvaukset ja ohjauskokonaisuuksien kehityspotentiaali arvioitiin, jotta kehitystä voidaan jatkossa priorisoida ja resursseja kohdentaa sinne, missä pystytään saavuttamaan suurin hyöty. Säätöpiirien kehityksessä lämmöntalteenotolla, ja siihen liittyvillä lisätoiminnoilla todettiin olevan erityisen suuri kehityspotentiaali. Hiilidioksidin ominaisuudet mahdollistavat lämmöntalteenoton erityisen tehokkaan toteuttamisen, mikäli prosessin ohjaus suunnitellaan huolellisesti.

Ohjausten ja mittausten ohjelmasyklin nopeuden vaatimusta arvioitiin teoreettisesti ja sille asetettiin alustava minimitaso. Tämän lisäksi olemassa olevia Huurteen käyttämiä säädinratkaisuja simuloitiin testipenkissä, jotta niiden mittausintervallista sekä hätäkatkaisujen reagointinopeudesta saatiin referenssitietoa säädinkehitykseen. Säädinkehitys jatkuu tuotekehitysprojektina uuden jäähdytysyksikkömallisarjan kehityksen rinnalla.

Avainsanat: CO₂ jäähdytysjärjestelmä, Jäähdytysyksikkö, jäähdytysyksikkösäädin

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Mikko Peltonen: CO₂ refrigeration unit control structure and requirements
Master of Science Thesis
Tampere University
Master's Degree Programme in Electrical Engineering
May 2021

The purpose of this thesis was to gather the necessary information for the refrigeration unit controller development and to set the requirements for controller platform selection and control function designing. The goal for the controller development is to produce a functional refrigeration unit controller for Huurre. The controller allows Huurre to implement functionalities that the currently used third party controllers are unable to do. Controller will also be designed to fit in the used automation and remote service architecture.

The thesis begins by explaining the relevant cooling process theory and how to analyze the cooling process with a p, h -diagram. The special characteristics of carbon dioxide as a refrigerant are introduced and the effects it has on the control systems are explained. The critical point of CO₂ is in the normal operating zone of the refrigeration system and that causes situations that must be considered when designing the control functions.

To set the controller platform requirements the most important components were analyzed in detail to detect the special requirements they set for the controller design. The IO points from each subsystem were listed and the properties of each input and output type were investigated. This was done to better understand the IO's effect on the control design.

To make the actual control software, the function descriptions for each sub-process were needed. The descriptions were made, and the development motivation was assessed separately for each subsystem. This way development resources can be directed to the right places. The most important sub-process is the heat recovery and systems around it. Properties of CO₂ allow the hot gas heat to be reclaimed with high efficiency if the control is designed properly.

The controller program cycle interval requirement was assessed theoretically based on the Nyquist-Theorem. Preliminary maximum program cycle interval was set to 1 second. The current third-party controllers were also tested in a test bench to see how fast they can react to an external high pressure cut. This can be used as a reference value for the controller platform selection. Controller designing continues as a product development project with a new refrigeration unit model development.

Keywords: CO₂ refrigeration, refrigeration unit, refrigeration unit controller

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

ALKUSANAT

Työn tekeminen alkoi 2019 Huurteelle Ylöjärvellä. Työ oli osa jäähdytysyksikkösäätimen kehitysprojektia ja sitä tekemään kasattiin ryhmä Huurteen Suomen ja Ruotsin asiantuntijoita. Haluaisinkin aivan ensimmäiseksi kiittää projektiryhmän jäseniä ja myös lähimpiä kollegoitani tuesta diplomityön eteenpäin viemisessä. Haluaisin erityisesti kiittää edellistä esimiestäni Jukka Hellmania, joka motivoi projektissa alusta asti eteenpäin ja tarjosi mahdollisuuden työskennellä projektin parissa, vaikka työtilanne ei aina olisi sitä mahdollistanut. Lisäksi projektiryhmän ulkopuolelta erityiskiitos myös Jussi Jokiselle, jonka kanssa on vuosien varrella käyty monet innostavat keskustelut kylmätekniikasta ja järjestelmien toiminnasta.

Kaksi viime vuotta on kulunut todella nopeasti ja maailmaa piinaava koronavirusepidemia sekä Huurteen omistajan vaihdos ovat osaltaan vaikuttaneet työn alkuperäisen aikataulun viivästymiseen. Tästä huolimatta työ kuitenkin saatiin vietyä loppuun onnistuneesti. Jäähdytysyksikkösäätimen kehitykselle saatiin hyvät lähtökohdat ja työn jälkeen voidaan siirtyä valitsemaan säätimelle prototyypialustaa, joka vastaa ominaisuuksiltaan työssä asetettuja vaatimuksia. Säädinkehitys otettiin osaksi Huurteen uutta jäähdytysyksikkösarjaa, jossa Huurteen ECO MINI -tuote on tarkoitus uudistaa vastaamaan entistä paremmin markkinoiden vaatimuksia.

Hiilidioksidijärjestelmän moderni digitaalinen ohjaaminen on kylmäalalla suhteellisen uutta ja siihen kuuluu vielä monia tutkimattomia yksityiskohtia. Yhtenä mielenkiintoisimmista alueista voidaan pitää korkeapaineen säätämistä siten, että järjestelmästä saadaan käyttökohteessaan paras kokonaishyötysuhde lämmöntalteenoton kanssa. Aiheesta on tehty tutkimusta kansainvälisesti ja tuloksia hyötysuhteen optimoinnista korkeapainetta säätämällä on saatu useissa eri tutkimuksissa.

Kangasalla, 10.5.2021

Mikko Peltonen

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	TEORIA	2
2.1	Kylmätekninen kiertoprosessi	2
2.2	Jäähdytysjärjestelmä	5
2.3	R744 kylmäaineena	7
2.4	CO ₂ -Jäähdytysyksikkö	9
2.4.1	Kompressorit	12
2.4.2	Lauhdutin ja kaasujäähdytin	13
2.4.3	Lämmöntalteenotto	17
2.4.4	Varaaja	20
3.	ALUSTA JA RAJAPINNAT	21
3.1	PT1000 Lämpötila-anturit	21
3.2	Painelähettimet	22
3.3	Digitaaliset liitynnät	23
3.4	Venttiilit	23
3.5	Sähkömoottorit	25
3.6	Muut IO-vaatimukset ja yhteenveto	26
4.	OHJAUKSEN RAKENTAMINEN	28
4.1	Kompressoreiden ohjaus	28
4.1.1	Ohjauksen rakenne	28
4.1.2	Eryitystilanteet	30
4.2	Lämmöntalteenoton ohjaus	31
4.2.1	Ohjaustilat	32
4.2.2	Käynnistys ja sammutus	33
4.2.3	Ohjauksen rakenne	34
4.3	Kaasujäähdyttimen ohjaus	35

4.3.1	Ohjaustilat.....	36
4.3.2	Ohjauksen rakenne.....	37
4.4	Korkeapaineventtiilin ohjaus	39
4.5	Varaajapaineventtiilin ohjaus	41
4.6	Ohjausten kehittämisen motivaatio	42
5.	OHJELMISTO- JA SUORITUSKYKY	43
5.1	Näytteenottotaajuus.....	43
5.2	Nykyisen alustan reagointinopeus	45
6.	YHTEENVETO.....	49
7.	LÄHTEET.....	51

LYHENTEET JA MERKINNÄT

ADC	engl. Analog to Digital Converter, AD-muunnin eli analogia-digitaalimuunnin
COP	engl. Coefficient of Performance, kylmäkerroin
CR	engl. Compressor Rack, kompressoriryhmä
EC	engl. Electronically Commutated, elektronisesti kommutoitu
FFT-muunnos	engl. Fast Fourier Transformation, nopea Fourier-muunnos
GC	engl. Gas Cooler, kaasujäähdytin
HFC	engl. Hydro-Fluoro-Carbon, fluorihilivedyt
HR	engl. Heat Recovery, lämmöntalteenotto
I/O	engl. Input/Output, Sisään- ja ulostulot.
LT	engl. Low Temperature. Lyhennettä käytetään jäähdytysyksikön alimmasta imupainetasosta
LTO	Lämmöntalteenotto
MT	engl. Medium Temperature. Lyhennettä käytetään jäähdytysyksikön imupainetasosta, joka on matalinta tasoa korkeampi
PID-säädin	Proportional-Integral-Derivative-säädin
R744	Hilidioksidin kylmäainetunnus
Rec	engl. Receiver, varaaja
SSR	engl. Solid State Relay, puolijohderele
UPS	engl. Uninterruptible Power Supply, varavirtalähde

1. JOHDANTO

Esineiden internet on tuonut lisää mahdollisuuksia järjestelmien käyttöön myös jäähdytystekniikassa. Erilaisten järjestelmien valvontaan ja analysointiin liittyvät lisäpalvelut voivat tuoda asiakkaalle merkittäviä säästöjä sekä suoraan, että välillisesti. Jäähdytysyksiköjä ohjataan niiden ohjaamiseen kehitetyillä säädinjärjestelmillä, jotka ovat kehittyneet melko hitaasti ja eivät usein ominaisuuksiensa puolesta sovi suoraan integroitavaksi nykyaikaiseen järjestelmäarkkitehtuuriin. Säätimet ovat usein myös hyvin rajallisesti modifioitavissa käyttäjän erityistarpeisiin ja sitä kautta syntyy tarpeita erillisten järjestelmien rakentamiseen olemassa olevien jäähdytysyksikkösäätimien rinnalle.

Tässä työssä on arvioitu hiilidioksidia käyttävien jäähdytysjärjestelmien aliohjauskokonaisuuksien kehittämisen mahdollisuuksia sekä koottu tarpeellinen pohjatieto säädinkehitykselle. Säädinkehitykseen lähdettiin siitä näkökulmasta, että kehitettävän säätimen avulla voitaisiin toteuttaa Huurteen toiminnassa vuosien varrella kehitettyjä ohjaustapoja sekä kehitteillä olevia uusia innovaatioita. Tavoitteena oli analysoida tärkeimmät jäähdytysyksikön ohjattavat kokonaisuudet muodostaen samalla vaatimukset niin alustalle kuin ohjaukselle. Työtä koottiin tekemään projektiryhmä, joka koostui Huurteen eri osa-alueiden osaajista. Projektin etenemiselle asetettiin välitavoitteet, joita arvioitiin projektiryhmän tapaamisissa.

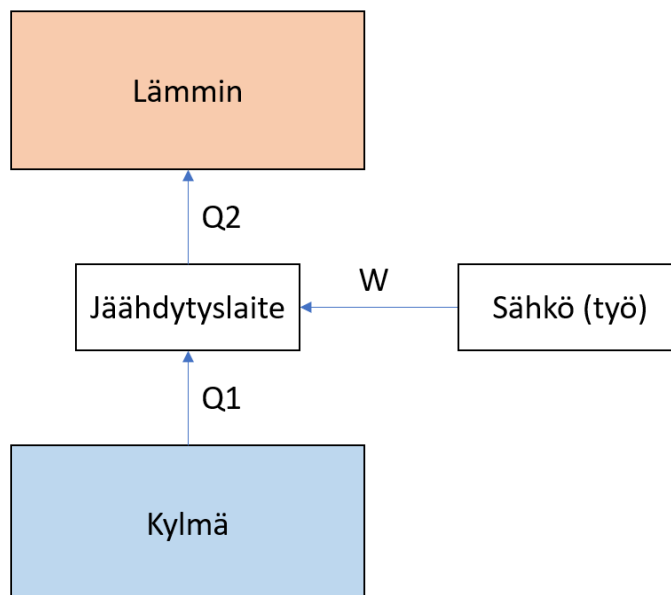
Työ alkaa tiiviillä teoriaosuudella, jossa kuvataan keskeinen kylmätekniikan teoria ja pohjatiedot. Teoriaosuus alkaa kylmäkiertoprosessin esittämisellä ja etenee kuvaamaan kokonaisen järjestelmän toimintaa. Teoriaosuuden lopussa on esitelty jäähdytysjärjestelmän keskeisimmät komponentit. Kolmannessa luvussa esitellään jäähdytysyksikön erilaiset liitynnät ja niihin kytketyt toimilaitteet kooten samalla yhteen liityntöihin liittyvät vaatimukset. Neljännessä luvussa on esitetty suunnitellut jäähdytysyksikön ohjauspiirien rakenteet ja toiminnot sekä arviot eri osuuksien kehityksen mahdollisuuksista. Viidennessä luvussa on tutkittu säätimen suorituskyvyn tarvetta ja asetettu alustava vaatimus mittaus- ja ohjaussyklin nopeudesta.

2. TEORIA

Jäähdytysyksikön säädintä kehitettäessä on oleellista tuntee jäähdytysyksikön erilaisten sisäisten ohjauspiirien toiminta ja niihin liittyvä teoria. Tässä kappaleessa on ensin avattu työssä hyvin keskeistä lämmönsiirtoprosessia ja sitten hiilidioksidin käyttöä kylmäaineena sekä sen tuomia erityistarpeita laitteistossa. Kylmäprosessin esitys laajenee teoriaosuuden edetessä kohti todellista esimerkkiä jäähdytysjärjestelmästä.

2.1 Kylmätekkinen kiertoprosessi

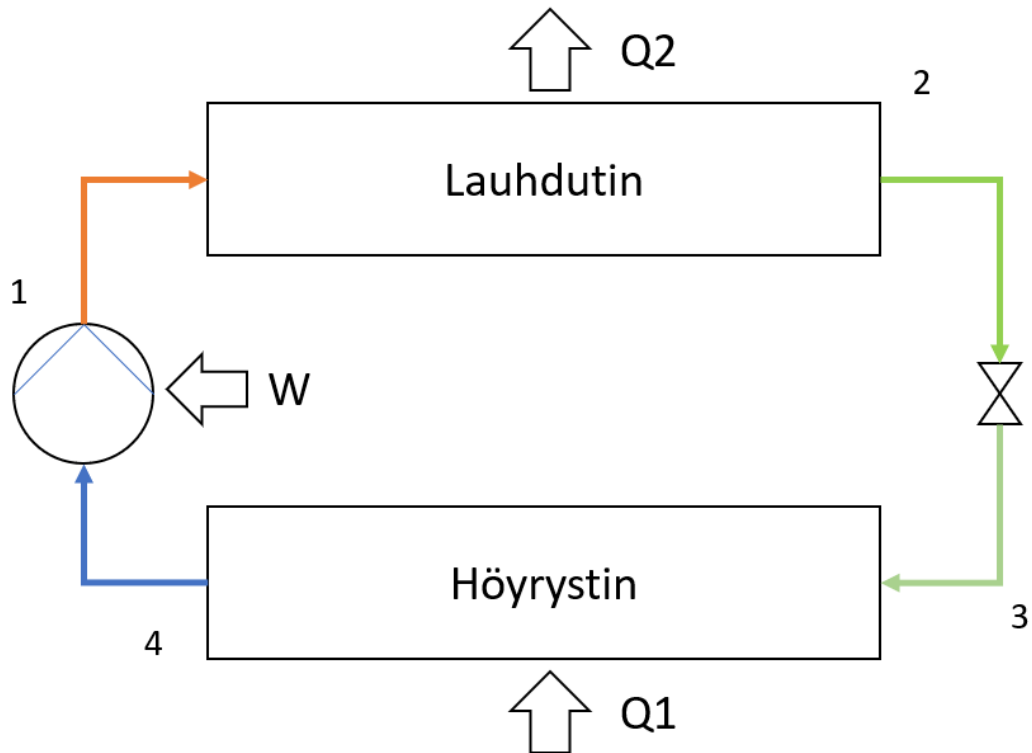
Jäähdytysjärjestelmä, joka toimii kylmätekkinä kiertoprosessia hyödyntäen, siirtää lämpöenergiaa järjestelmän kylmästä osasta lämpimään osaan hyödyntämällä työaineen olomuodonmuutoksia [1]. Olomuodonmuutos saadaan aikaiseksi systeemiin sen ulkopuolelta tuodun työn avulla. Kylmätekkinisessä kiertoprosessissa työn tekee sähkökäyttöinen kompressori. Seuraavassa kuvassa 1 on esitetty periaatekaavio kylmätekkinisestä kiertoprosessista. Jäähdytyslaitteeseen ulkopuolelta tehdyn työn avulla saadaan lämpöenergia (Q_1 ja Q_2) siirtymään kohti prosessin lämmintä osaa.



Kuva 1. Lämmön siirtyminen jäähdytysjärjestelmässä

Seuraavassa kuvassa 2 on esitetty edellisen kappaleen lämmön siirtymistä kuvaava kaavio laajennettuna kuvaamaan tarkemmin jäähdytysjärjestelmän toimintaa. Kierron

toiminta edellyttää, että järjestelmässä on kompressori (1), lauhdutin (2), höyrystin (4) ja paisuntaelin (3).

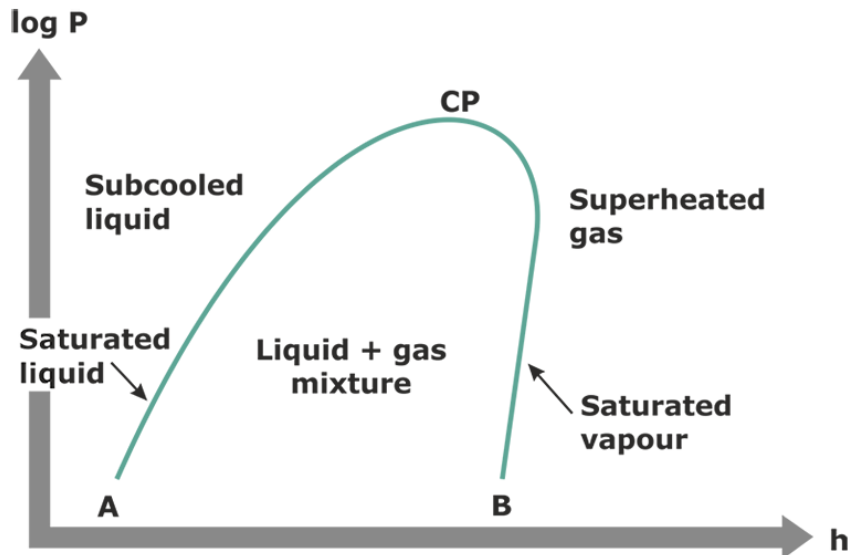


Kuva 2. Jäähdytyskierto

Kompressori puristaa kylmäainetta ja (1) luo ylitseen paine-eron. Kompressorin puristamaa kylmäainekaasua sanotaan kuumakaasuksi. Kompressorin lauhduttimen (2) puolella vallitsee järjestelmän korkein paine. Tätä kutsutaan myös lauhtumispaineeksi. Lauhtumispaine määrää lämpötilan, jossa kylmäaine alkaa lauhduttimessa tiivistyä nesteeksi. Kompressorin höyrystimen (4) puolella vallitsee imupaine. Imupaine määrää lämpötilan, jossa kylmäaine alkaa höyrystyä kaasuksi. Paisuntaventtiilillä (3) pidetään paine-ero näiden painetasojen välillä. Kompressori siis tekee työtä, jotta höyrystin ja lauhdutin saadaan olosuhteisiin, joissa olomuodonmuutos voi ottaa tai luovuttaa lämpöenergiaa. [2] [1]

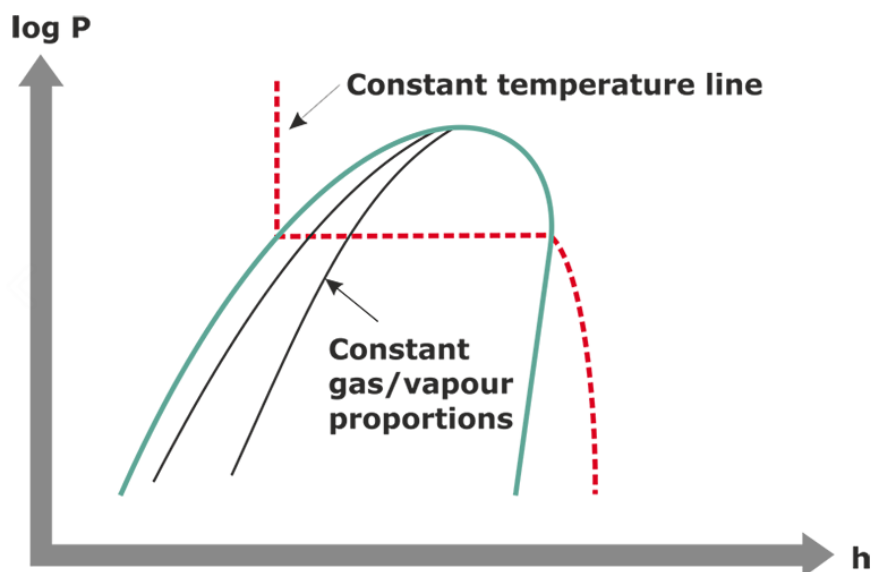
Kylmäteknisen kierto-prosessin kuvaamiseksi voidaan käyttää kuvassa 3 esitettyä p,h-diagrammia. P, h -diagrammista pystytään tarkastelemaan prosessisuureiden suhteita kylmäprosessin eri vaiheissa. Paine P on Y-akselilla logaritmisena ja entalpia h X-akselilla lineaarisena. Entalpia (kJ/kg) kuvaa kylmäaineen energiasisältöä painoyksikköä kohti. Vihreä kaari, joka alkaa pisteestä A ja päättyy B:hen rajaa alueen, jolla tapahtuu olomuodonmuutos kaasusta nesteeseen tai toisin päin. Kuvasta 4 nähdään miten kaaren sisällä vasemmalta oikealle mennessä nesteen ja kaasun suhde muuttuu. Kaaren oikealla reunalla kylmäaine on kylläistä höyryä (Saturated vapour). Kaaresta oikealle

kaasu on tulistunutta (Superheated gas). Tulistus kertoo, kuinka paljon kylmäaineen lämpötila on sen höyrystyslämpötilaan suurempi. Kaaren vasemmassa reunassa kylmäaine on kylläistä nestettä (Saturated liquid) ja kaaren vasemmasta reunasta vasemmalle neste on alijäähtynyttä (Subcooled liquid). [1]



Kuva 3. P,h diagrammi 1 [3]

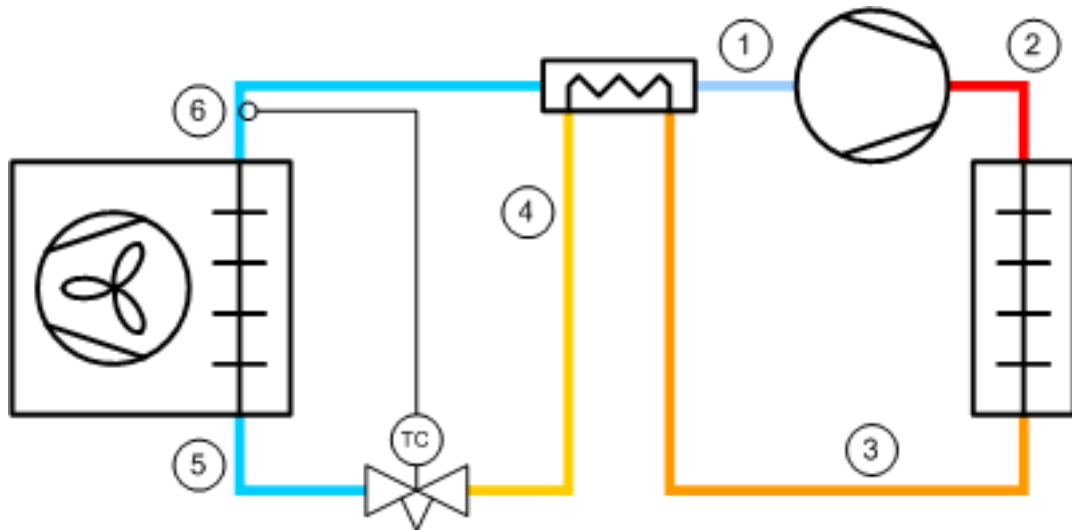
Paineen ja entalpiain lisäksi p, h -diagrammissa on lämpötila käyrinä (punainen katkoviiva). Näitä käyriä pitkin liikuttaessa lämpötila pysyy vakiona. Kuvasta 4 voidaan nähdä, kuinka vihreän kaaren sisällä X-akselin suuntaisesti liikuttaessa lämpötila pysyy vakiona. [1]



Kuva 4. P,h -diagrammi 2 [3]

2.2 Jäähdytysjärjestelmä

Tässä kappaleessa laajennetaan edellä esitetty periaate koskemaan simuloitua yksinkertaista jäähdytysyksikköä. Järjestelmää simuloitiin Simple one-stage CO₂ -ohjelmalla [4]. Seuraavassa kuvassa 5 on esitetty ohjelmalla simuloitun yksikön prosessikaavio.

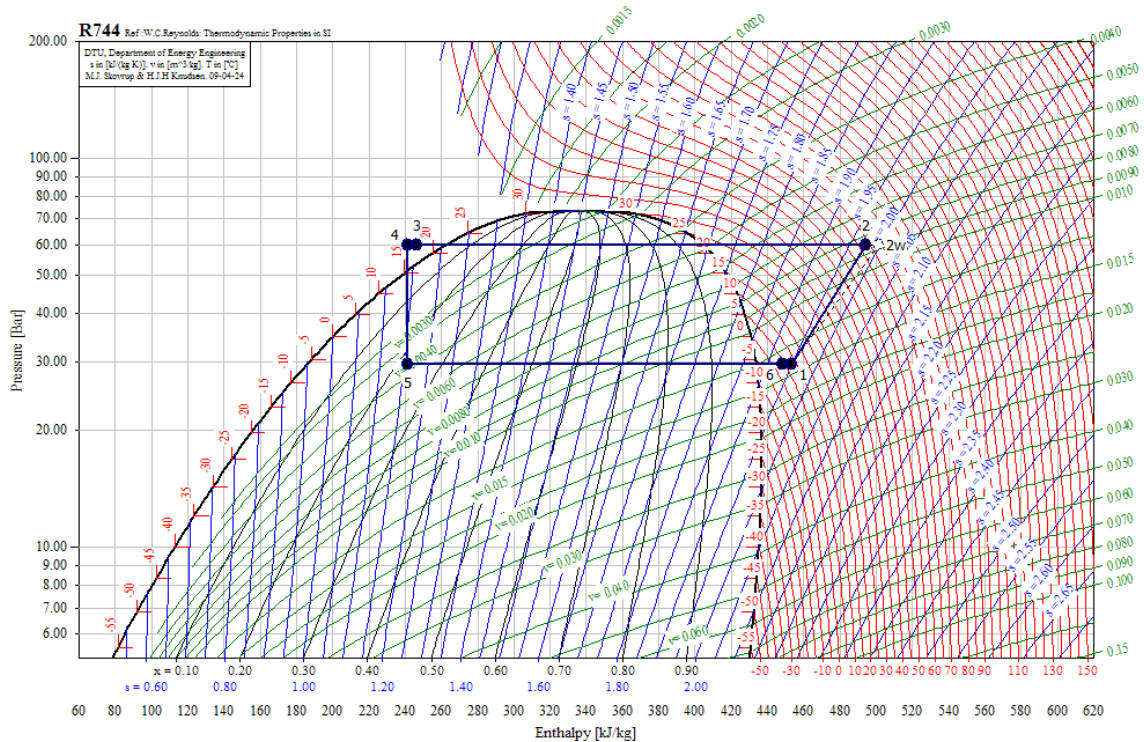


Kuva 5. Simple one-stage CO₂ prosessikaavio [4]

Kuvan 5 numeroituja pisteitä tarkastellaan samalla p, h -diagrammista kuvasta 6. Kompressorin puristaa kaasuna olevaa kylmäainetta pienempään tilavuuteen (1–2). Tällöin kylmäaineen lämpötila kohoaa ja paine kasvaa. Kompressorin puristuksessa kylmäaineen entalpia kasvaa kompressorin tekemän työn verran. Kylmäaine kulkee tämän jälkeen lauhduttimeen (2–3), jossa se tiivistyy altistuessaan lauhduttimen pinnan lämpötilalle, joka on matalampi kuin kylmäaineen kylläisen nesteen lämpötila kyseisessä paineessa. Lauhduttimessa kylmäaine muuttuu nesteeksi. Tiivistyessään kylmäaine luovuttaa lämpöä lauhduttimen pintaan, josta se johtuu toiseen massaan (Kuvassa 2, **Q₂**). Lauhduttimessa kylmäaineen entalpia pienenee sen viilentyessä (2–3). [5]

Lauhduttimesta kylmäaine kulkee paisuntaventtiilin tai muun paisuntaelimen läpi (4–5) höyrystimeen. Tässä kohtaa kylmäaineen tilavuus kasvaa ja paine laskee. Kylmäaineen entalpia pysyy samana. Höyrystimeen tullessaan kylmäaine on tilassa, jossa se lämpötilan noustessa alkaisi höyrystyä. Höyrystimessä kylmäaine altistuu höyrystimen pinnan lämpötilalle. Jos höyrystimen pinnan lämpötila on suurempi kuin kylmäaineen höyrystymislämpötila kyseisessä paineessa, alkaa kylmäaine höyrystyä (5–6) höyrystimen seinämällä. Lämpöenergia olomuodonmuutokseen siirtyy kylmäaineeseen höyrystimen seinämistä. Höyrystimen pinta viilenee ja sitä kautta höyrystimeen tulee lämpöenergiavaje verrattuna ulkoiseen massaan. Höyrystimen sisällä kaasumainen

höyrystynyt kylmäaine lämpenee vielä lisää, eli tulistuu, ennen höyrystimestä poistumista. [5]



Kuva 6. Simple one-stage CO₂ P, h -diagrammi [4]

P, h -diagrammista voidaan myös määrittää järjestelmän kylmäkerroin. Kylmäkerroin eli COP (Coefficient of Performance) on kylmäjärjestelmän suorituskyvyn mittari. Se kertoo tuotetun kylmätehon q ja sen tuottamiseen käytetyn työn W suhteen. Pelkän jäähdytysjärjestelmän kylmäkerroin on kaavan 1 mukainen. Kylmäkerrointa ei sanota lämmöntuoton hyötysuhteeksi, koska kylmäkerroin yleensä ylittää arvon 1. [5].

$$COP = q/W \quad (1)$$

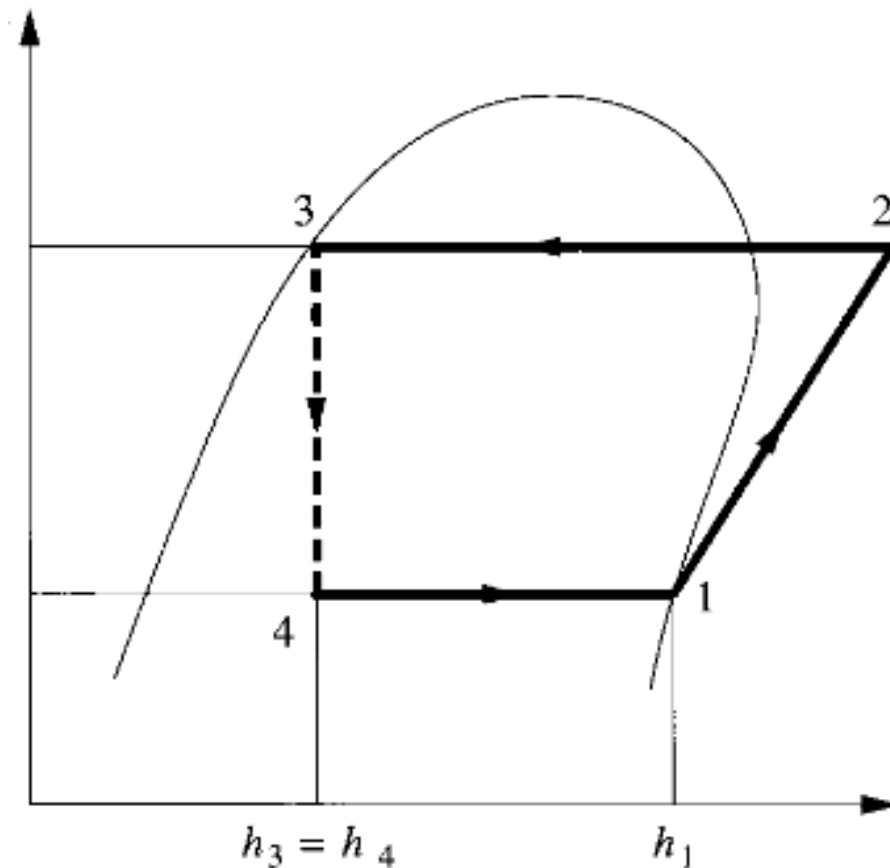
Kaavassa 1 esiintyvä kylmäteho q (W) on entalpia (kJ/kg) kerrottuna kylmäaineen massavirralla m (kg/s) (kaava 2). Kaavassa 2 ja 3 esiintyvät entalpiat h_1 , h_2 , h_3 ja h_4 on havainnollistettu kuvassa 7. h_1 on kylmäaineen entalpia höyrystimen jälkeen ennen kompressorin puristusta. h_4 on kylmäaineen entalpia sen paineen pudotessa paisuntaelimessä. h_1 ja h_4 erotus kuvaa entalpian muutosta kylmäaineen höyrystyessä höyrystimessä. [5]

$$q = m(h_1 - h_4) \quad (2)$$

Jos kylmäjärjestelmässä on lämmöntalteenotto ja oletetaan, että kaikki pisteen 2 ja 3 välinen lämpö saadaan talteen, on COP kuten kaavassa 3. Todellisuudessa yleensä läheskään kaikkea lämpöä ei saada hyödynnettyä. Kaavassa 3 on höyrystymisen ja

kylmäkaasun jäähtymisvaiheen entalpioiden summa jaettu kompressorin puristustyön entalpialla. [5]

$$COP_{hr} = \frac{h_2 - h_3 + h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \quad (3)$$

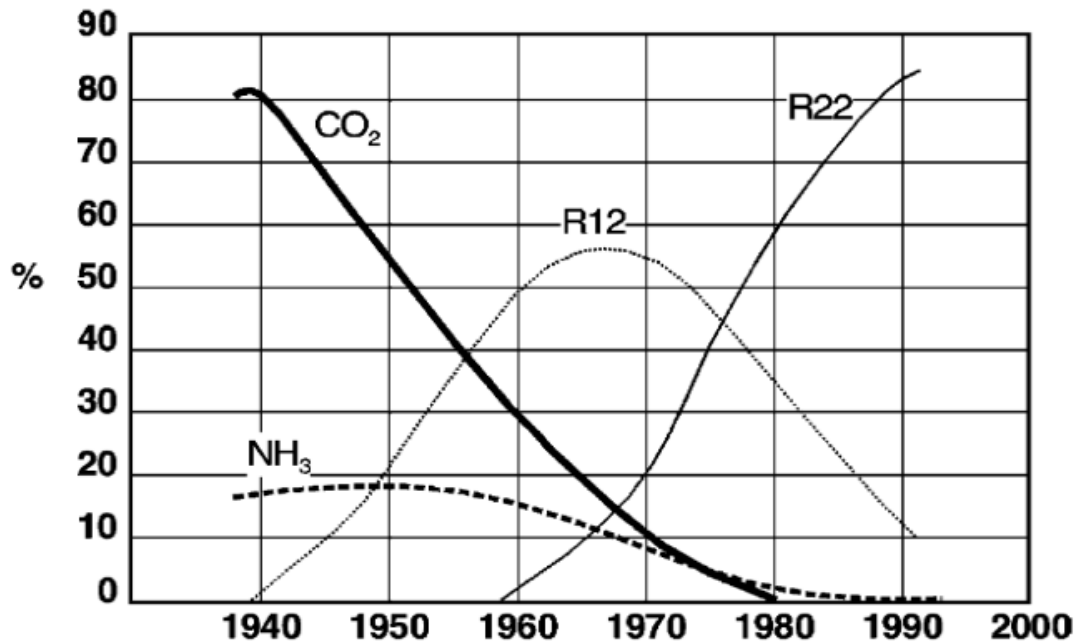


Kuva 7. P, h -diagrammi ja kylmäkerroin [5]

2.3 R744 kylmäaineena

Kylmäaine R744 eli hiilidioksidi on palamaton ja myrkytön luonnossa esiintyvä kaasu. Sitä alettiin käyttämään kylmäaineena jo 1800-luvulla monissa eri sovelluksissa aina yksittäisistä ruokakauppojen kalusteista ilmanvaihdon viilennykseen asti. Hiilidioksidia käytettiin, koska muut tuolloin tunnetut kylmäaineet, kuten ammoniakki ja rikkidioksidi oli todettu varsinkin asuinalueille liian vaarallisiksi niiden palavuuden ja myrkyllisyyden vuoksi. Kuten kuvasta 8 nähdään, alkoi hiilidioksidin käyttö vähentyä toisen maailmansodan jälkeen, kun markkinoille tuli erilaisia synteettisiä kylmäaineita, jotka mahdollistivat laitteiden halvemman hinnan matalampien käyttöpaineiden vuoksi. Hiljattain hiilidioksidin käyttö kylmäaineena on taas alkanut lisääntyä, koska se ei

kuormita ympäristöä kuten monet synteettiset kylmäaineet. Sen käyttöä on tutkittu ja sen hyvien ominaisuuksien vuoksi sitä on alettu käyttämään varsinkin kylmissä maissa. [6]



Kuva 8. Kylmäaineet 1900-luvulla [6]

Kylmäaineena hiilidioksidin merkittävimpiä ominaisuuksia ovat sen kriittinen piste (31,1 °C, 73,8 bar) sekä korkea lämpökapasiteetti tilavuuteen nähden. Normaalilla järjestelmän käyttöalueella sijaitseva kriittinen piste mahdollistaa tehokkaan lauhduttimen puolen lämpöenergian hyötykäytön eli niin sanotun lämmöntalteenoton. Hiilidioksidin korkea lämpökapasiteetti tilavuuteen nähden mahdollistaa saman tehon saamisen fyysisiltä mitoiltaan pienemmillä komponenteilla kuin useimmilla muilla kylmäaineilla. [6]

Kriittinen lämpötila on se piste, jonka yläpuolella ainetta ei saa enää puristettua nesteeksi painetta nostamalla. Tämän lämpötilan yläpuolella aineen molekyyleillä on niin paljon kineettistä energiaa, että molekyyleiden väliset voimat eivät riitä pitämään niitä kasassa. Kriittinen paine puolestaan on pienin paine, jolla aineen saa nesteeksi kriittisessä lämpötilassa. Nämä ominaisuudet yhdessä muodostavat kriittisen pisteen. [7]

Järjestelmän ohjaamisen kannalta hiilidioksidin tärkein ominaisuus on sen normaalilla käyttöalueella sijaitseva kriittinen piste. Normaaleissa käyttölämpötiloissa hiilidioksidijäähdytysjärjestelmä voi olla olosuhteitten mukaan subkriittisenä tai transkriittisenä. Kylmäkiertoprosessin sanotaan olevan transkriittinen, kun kylmäaine on lauhduttimessa kriittisen pisteen yläpuolella [6]. Lauhdutinta sanotaan kriittisen pisteen yläpuolella kaasujäähdyttimeksi, koska silloin ei tapahdu kylmäaineen tiivistymistä.

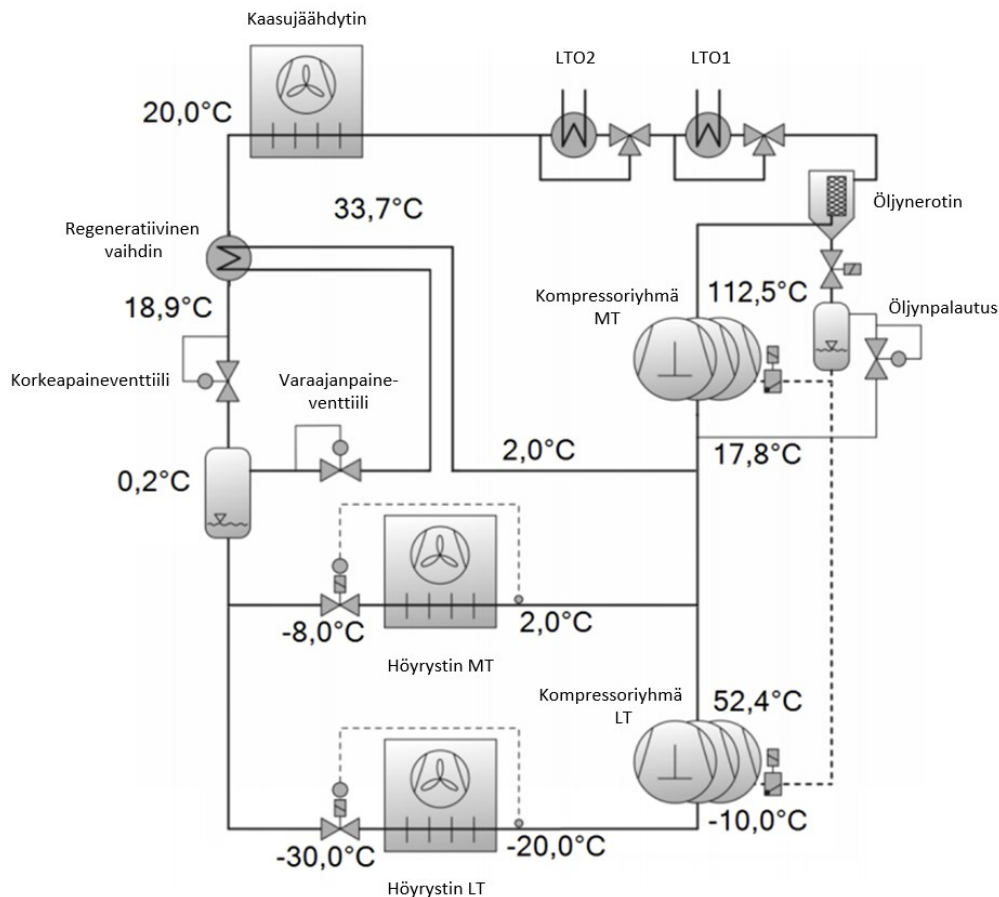
Transkriittisenä jäähdytysjärjestelmän kaasujäähdyttimessä paine ja lämpötila eivät ole sidoksissa toisiinsa. Kylmäkierto on subkriittinen, kun kylmäaine on koko kierron ajan alle kriittisen pisteen olosuhteiden. Subkriittisenä lauhduttimessa tapahtuu olomuodon muutos. Subkriittisenä lauhduttimen paine määrää kylmäaineen lämpötilan lauhduttimessa, mutta transkriittisenä kylmäaineen painetta ja lämpötilaa pitää hallita erikseen. [8]

Hiilidioksidijärjestelmässä kylmäaineen määrä korkeapainepuolella vaihtelee huomattavasti paineesta riippuen ja siksi hiilidioksidilla toimivassa järjestelmässä on käytännössä aina oltava puskurivaraaja, joka tarjoaa nestemäisen kylmäaineen tasaisella paineella höyrystimille [9]. Varaajan paineen tulee olla huomattavasti korkeapainetta alhaisempi hyvän hyötysuhteen saavuttamiseksi [9]. Transkriittisenä varaajan paineeseen saapuessaan kylmäaine kaasuuntuu ja osa siitä jää nesteeksi varaajaan. Kaasuuntunut kylmäaine nostaa varaajan painetta ja sitä on päästettävä varaajasta pois paineen pitämiseksi oikealla tasolla. Paine päästetään varaajanpaineventtiilillä joko kompressoriryhmän imuun tai erilliselle kompressorille, joka ylläpitää varaajan painetta.

2.4 CO₂-Jäähdytysyksikkö

Tässä kappaleessa laajennetaan edellä kappaleessa 2.2 esitetty jäähdytysyksikön kuvaus vastaamaan monimutkaisempaa esimerkkiä todellisesta järjestelmästä. Seuraavan kuvan 9 yksikkö simuloitiin Bitzerin kompressorien valintaohjelmalla osoitteessa <https://www.bitzer.de/websoftware>. Kuvassa on esimerkijärjestelmä, jossa on MT-kompressoriryhmä (medium temperature), LT-kompressoriryhmä (low temperature), kaksi lämmöntalteenottoapiiriä (LTO1 ja LTO2), kaasujäähdytin, korkeapaineventtiili, varaaja, varaajanpaineventtiili, alijäähdytin ja öljynkierron komponentit. Tämä esimerkijärjestelmä vastaa rakenteeltaan tyypillistä Huurteen toimittamaa jäähdytysyksikköä.

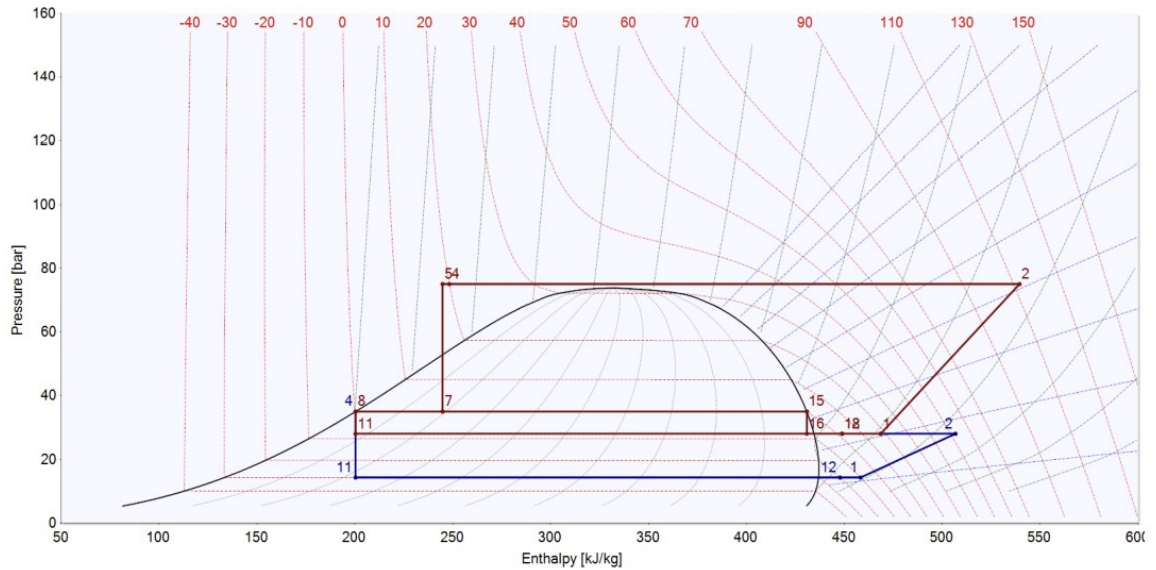
Kuvassa 10 on kuvan 9 järjestelmästä Bitzerin mitoitus työkalulla saatu p, h -diagrammi. P, h -diagrammista nähdään, että siinä on kuvan 6 kuvaajaan verrattuna huomattavasti enemmän vaiheita. Kuvassa sinisellä on piirretty LT-kompressoriryhmän kylmäkierto ja punaisella MT-kompressoriryhmän kylmäkierto.



Kuva 9. Jäähdytysyksikkö

Käsitellään kuvaajaa ensin ilman LT-kompressoriryhmän kiertoa (sininen). Tällöin järjestelmä on kuten kuvassa 9, mutta ilman LT-höyrystintä ja LT-kompressoriryhmää. Pisteessä 1–2 MT-kompressoriryhmä puristaa kylmäainekaasua. Kylmäainekaasun paine kasvaa ja se tulistuu. Tulistuksella tarkoitetaan höyrystymislämpötilan ja kylmäaineen lämpötilan eroa. Tulistuneen kaasun lämpötila on korkeampi kuin höyrystymislämpötila. Pisteessä 2 tulistuneen kylmäaineen lämpötila on noin 110 °C ja paine 75 baaria. Pisteestä 2 pisteeseen 4 kylmäainetta jäähdytetään kierrättämällä sitä ensin lämmöntalteenottopiirien läpi ja lopuksi kaasujäähdyttimellä. Kylmäaineelle ei tässä tapahdu tiivistymistä, sillä se on kriittisen pisteen yläpuolella. Alittaessaan kriittisen lämpötilan kylmäaine muuttuu tasaisesti nesteeksi, ilman tiivistymistä, jäähtyen tässä esimerkissä noin 20 °C lämpötilaan. [5]

Kaasujäähdyttimen jälkeen pisteestä 4 pisteeseen 5 kylmäaine kulkee alijäähdyttimen läpi. Tässä kylmäaine alijäähtyy 18,9 °C lämpötilaan. Alijäähtymisellä tarkoitetaan kylmäaineen jäähtymistä tiivistymispisteen alapuolelle. Alijäähdytin siis jäähdyttää entisestään varaajaan menevää kylmäainetta ja tulistaa samalla MT kompressoriryhmälle menevää kylmäainetta vaihtimen toisipuolella.



Kuva 10. Bitzer websoftware p, h -diagrammi

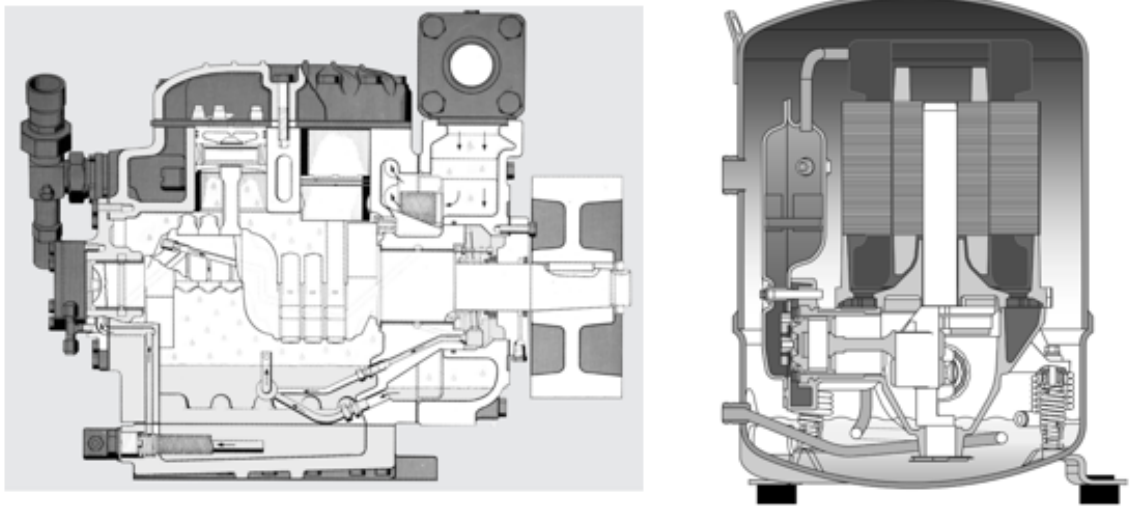
Pisteestä 5 pisteeseen 7 kylmäaine päästetään korkeapaineventtiilin läpi kylmäainevaraajaan. Tässä kylmäaineen paine laskee varaajan 35 baariin. Pisteestä 7 pisteeseen 15 osa kylmäaineesta höyrystyy varaajassa, koska 35 baarin paineessa höyrystymispiste on 0,2 °C ja varaajan korkeapaineventtiilin läpi tulevan kylmäaineen lämpötila on 18,9 °C. Kylmäaineen höyrystymiseen tarvittava lämpöenergia tulee kylmäaineesta itsestään, jolloin osa kylmäaineesta tiivistyy jäähtyessään nesteeksi varaajaan (7–8). Varaajanpaineventtiili päästää varaajassa kaasuuntunutta kylmäainetta takaisin MT-kompressoriryhmän imuun pitäen näin varaajan paineen halutulla tasolla (15–16). Tätä kaasua kutsutaan nimellä flash-kaasu ja se tuo MT-kompressoriryhmälle lisää kuormitusta ja huonontaa jäähdytyksen hyötysuhdetta sekä nostaa kompressorin kuumakaasun lämpötilaa.

Varaajasta nestemäinen kylmäaine kulkee myös MT höyrystimen paisuntaventtiilin läpi (8–11). Tässä nestemäinen kylmäaine päästetään varaajan 35 baarin paineesta kompressoriryhmän imun noin 27 baariin (-8,0 °C höyrystymislämpötila). Höyrystimessä (11–16) nestemäinen kylmäaine höyrystyy ja tulistuu (16–12). LT-kierrossa (11–11) kylmäaine menee varaajasta paisuntaventtiilin läpi LT kompressoriryhmän imupaineeseen (-30,0 °C höyrystymislämpötila) LT höyrystimen sisälle. Höyrystimessä (11–12) kylmäaine höyrystyy ja tulistuu (12–1). LT Kompressoriryhmä puristaa ja tulistaa kaasua (1–2). LT-kompressoriryhmän puristama kaasu etenee MT-kompressoriryhmän imuun tulistaen sitä (2–1).

2.4.1 Kompressorit

Kuten Kaappola *et al.* [1] kuvaa, on kompressoreiden tarkoitus tuottaa ylitseen paine-ero höyrystymispaineesta lauhtumispaineeseen. Paine-eron vuoksi kylmäaine siirtyy järjestelmässä korkeammilta painetasoilta kohti kompressorin imua. Kompressorissa sähkömoottorilla tuotettua vääntöä käytetään puristamaan kaasua. Kompressorit jaetaan käytännössä kolmeen eri ryhmään: avoimiin-, puolihermeettisiin- ja hermeettisiin kompressoreihin [1][2]. Kompressoreita on myös toimintaperiaatteeltaan erilaisia kuten mäntä-, ruuvi-, turbo- ja scroll-kompressorit. Huurteen yksiköissä käytetään pääasiassa mäntäkompressoreita, joita tässä työssä käsitellään tarkemmin. Suurin osa kompressoreiden ohjausteknisistä yksityiskohdista on kuitenkin eri kompressorityyppien välillä yhteisiä. Kaikkia tyyppejä käytetään sähkömoottorilla ja kaikkien ohjauksen tavoite jäähdytyksessä on säätää imupainetta.

Kuvassa 11 vasemmalla esitetyssä avoimessa kompressorissa käyttövoima tuodaan akselilla kompressorin kuoren läpi. Tämän vuoksi niitä käytetään mm. ajoneuvoissa, missä käyttövoima voidaan tuoda suoraan polttomoottorilta [1]. Avokompressoreiden yhtenä rakenteellisena haavoittuvuutena voidaan pitää kuoren läpi tulevan akselin tiivistettä. Tiiviste pitää olla valmistettu oikeasta materiaalista, ettei kylmäaine heikennä sen ominaisuuksia. [2]

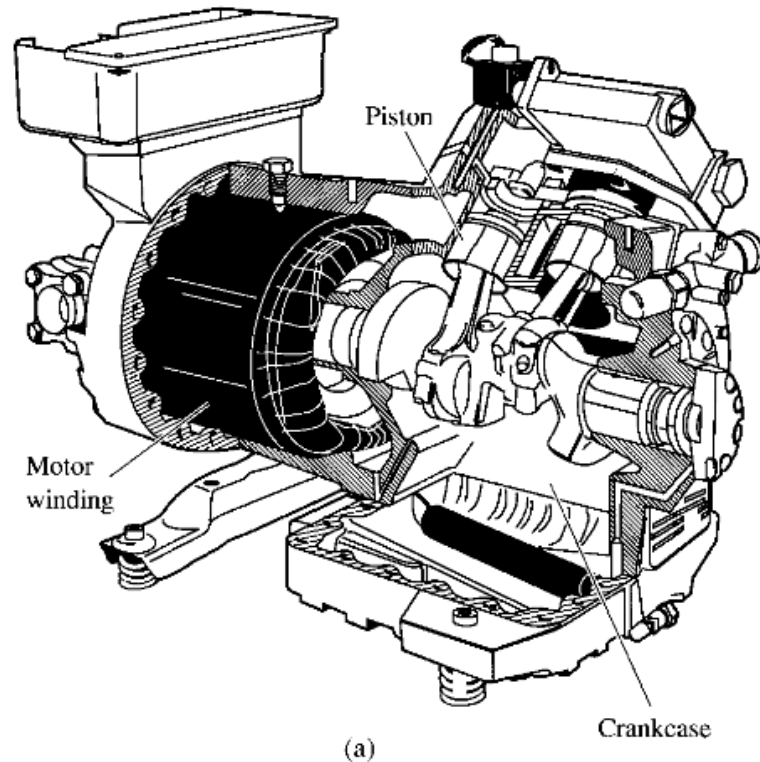


Kuva 11. Avoim [10] ja hermeettinen kompressorit [11]

Hermeettisessä kompressorissa kaikki kompressorin komponentit on suljettu täysin umpinaisen kaasutiiviin kuoren sisään. Hermeettiset kompressorit ovat yleensä pienitehoisia (n. 50 W – 50 kW) ja niiden hinta on usein muihin kompressorityyppeihin verrattuna edullinen, koska niitä valmistetaan suurissa sarjoissa [2]. Hermeettisiä kompressoreita ei ole usein tarkoitettu huollettaviksi, vaan ne vaihdetaan niiden

rikkoutuessa. Ne on kuitenkin saatu hyvin kestäviksi ja kestävät käyttöä jopa kymmeniä tuhansia tunteja. [2]

Puolihermeettisessä kompressorissa sähkömoottori ja sylinteri sijaitsevat kaasutiivin kuoren sisällä, mutta kompressorin kuori on kuitenkin avattavissa ja kompressorit tätä kautta huollettavissa. Tästä syystä niitä suositetaan suuremmissa teholuokissa. Huurteen valmistamissa jäähdytysyksiköissä kompressorit ovat melkein poikkeuksetta puolihermeettisiä. [2]



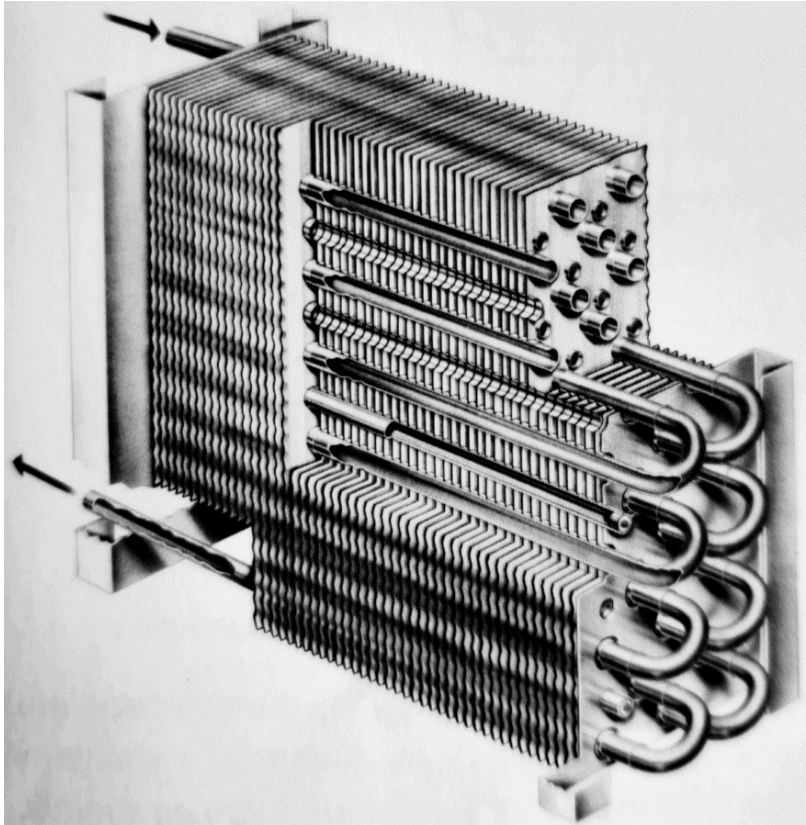
Kuva 12. Puolihermeettisen kompressorin leikkauskuva [5]

Kompressoreita voidaan käyttää sekä rinnakkain että sarjassa. Samassa imulinjassa rinnakkain olevat kompressorit toimivat samassa imuryhmässä työskennellen saavuttaakseen yhden yhteisen imupaineen. Samassa imulinjassa voi myös olla kompressoriryhmiä sarjassa. Tällöin puristustyö on jaettu kahden sarjassa olevan kompressoriryhmän yli ja saadaan useita imupainetasoja eri lämpötilatasoisille kalusteille ja huoneille.

2.4.2 Lauhdutin ja kaasujäähdytin

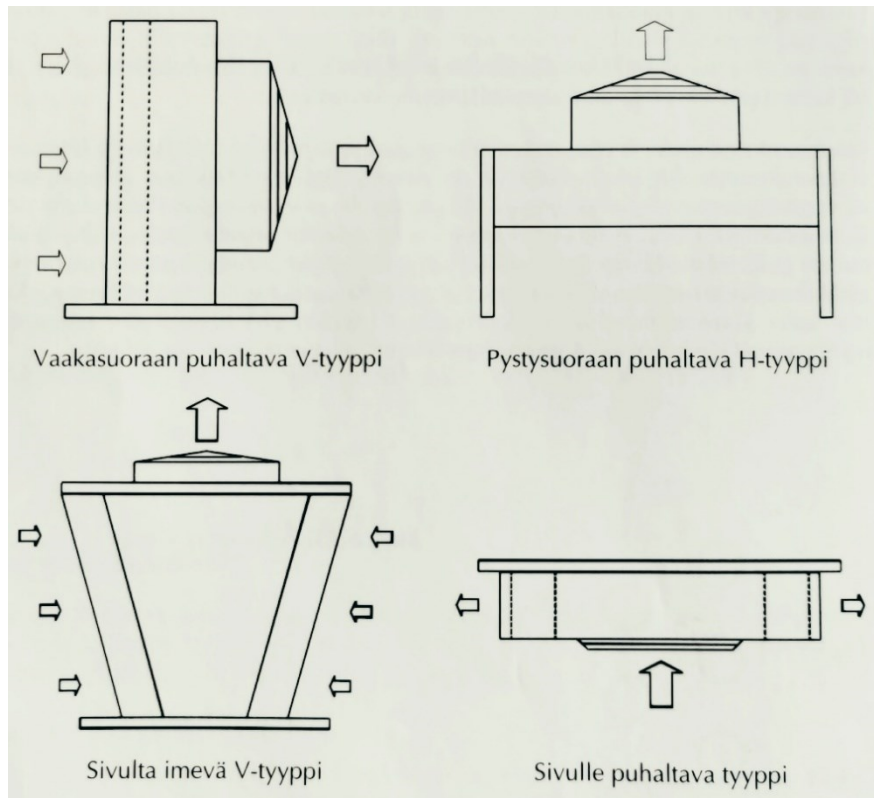
Lauhduttimen tarkoitus on jäähdyttää kylmäainehöyryä ja tiivistää se nesteeksi [1]. Lauhdutin voi olla nestejäähdytteinen tai ilmajäähdytteinen. Lisäksi lauhdutintyyppejä on erilaisia, kuten koaksiaalilauhdutin, säiliölauhdutin, moniputkilauhdutin, lamellilauhdutin

ja lankalauhdutin. Tässä työssä keskitytään ilmajäädytteiseen lamellilauhduttimeen, sillä se on yleisin lauhdutintyyppi Huurteen jäähdytysyksiköissä. Kuvassa 13 on esitetty tyypillinen lamellilauhduttimen rakenne. Ilmajäädytteinen lamellilauhdutin koostuu putkesta, johon on kiinnitetty lamelleja. Yleisintä on, että putki on kuparia ja lamelli alumiinia, koska niitä on helppo työstää ja ne johtavat hyvin lämpöä. Ilmajäädytteinen lamellilauhdutin on lähes aina pakkokiertoinen, eli sen läpi pakotetaan ilmaa puhaltimilla. Puhaltimien nopeutta säätämällä voidaan säätää lauhduttimen jäähdytystehoa. [1]



Kuva 13. Lamellilauhduttimen rakenne [2]

Seuraavassa kuvassa 14 on esimerkkejä erilaisista ilmajäädytteisten lauhduttimien rakenteista. Erilaisia konfiguraatioita käytetään riippuen asennuspaikasta. Esimerkiksi V-tyyppisellä rakenteella saadaan pienelle lattiapinta-alalle suuri määrä lamellipintaa ja jäähdytystehoa, jos tilaa on pystysuunnassa tarpeeksi. [5]



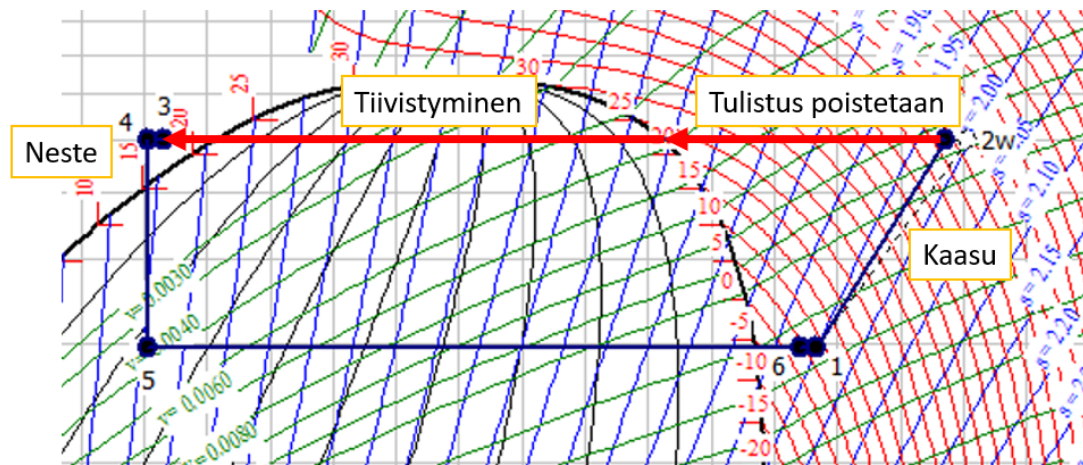
Kuva 14. Lauhdutintyypit [2]

Seuraavassa kuvassa 15 on Alfa Lavalin CO₂-kaasujäähdytin/lauhdutin V-konfiguraatiossa. Kuvan mallissa on 8 kpl nopeussäädettäviä elektronisesti kommutoituja puhaltimia eli (engl. electronically commutated) EC-puhaltimia, joilla voidaan säätää lamellilauhduttimien läpi virtaavan ilman määrää. EC-puhallin on tasavirralla toimiva puhallin, jossa on integroitu nopeudensäädin. EC-puhaltimen nopeutta voidaan säätää portaattomasti.



Kuva 15. Alfa Laval CO₂-kaasujäähdytin [12]

Kun kylmäaine saapuu lauhduttimeen, se on tulistunutta kaasua (Kuvassa 16 oikealla piste 2w). Kylmäaineen lämpötila on siis korkeampi kuin sen tiivistymispiste kyseisessä paineessa. Kuvasta 16 nähdään, että tiivistymispiste kuvan esimerkin tapauksessa on noin 20 °C ja kylmäaineen lämpötila pisteessä 2w, eli kompressorin ulostulossa, on noin 70 °C. Tulistusta on siis noin 50 K. Lauhduttimen alkupäässä kylmäaineen tulistus jäädytetään ja kylmäaine saavuttaa tiivistymispisteen. Tässä kohtaa lauhduttimen sisäpintaan muodostuu nestekalvo. SWEP:n jäähdytyksen käsikirjan [3] mukaan kylmäaineen lämpö määrästä suurin osa, jopa noin 70–80 %, luovutetaan lauhduttimen toisipuolelle (neste/ilma) tiivistymisvaiheessa. Lauhduttimen loppuosassa nestemäinen kylmäaine vielä alijäähtyy, jotta paisuntaelimelle/varaajaan menisi ainoastaan nestettä. [3]



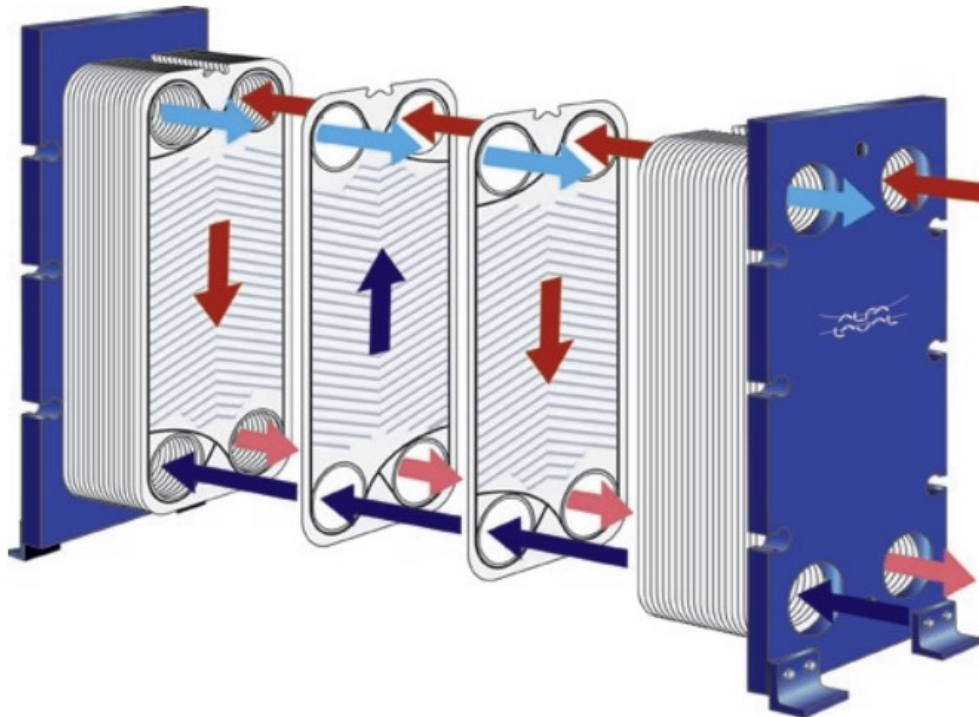
Kuva 16. Tiivistyminen lauhduttimessa

Kun kylmäaineena on hiilidioksidi, on lauhduttimelle erityisvaatimuksia. Hiilidioksidijärjestelmä voi toimia edellä kuvatulla tavalla subkriittisenä tai transkriittisenä kriittisen pisteen yläpuolella. Kriittisen pisteen yläpuolella lauhduttinta kutsutaan kaasujäähdyttimeksi. Painetasot voivat hiilidioksidijärjestelmässä kaasujäähdyttimessä olla järjestelmästä ja olosuhteista riippuen jopa 130–150 baaria. Tästä syystä lauhduttimen valmistus on hiilidioksidijärjestelmässä huomattavasti synteettisiä fluorihilivetyjä sisältäviä HFC-kylmäaineita (engl. Hydro-Fluoro-Carbon) monimutkaisempaa. Toisaalta hiilidioksidin HFC-kylmäaineita suurempi lämpökapasiteetti tilavuusyksikköä kohti mahdollistaa HFC-järjestelmiä pienemmän putkikoon.

2.4.3 Lämmöntalteenotto

Kuumakaasun tulistuslämpöä ja lauhtumislämpöä voidaan käyttää hyödyksi lämmityksessä lämmöntalteenoton avulla. Jäähdytysjärjestelmän näkökulmasta on yhdentekevää, minne kompressorin puristuksen seurauksena tullut lämpö menee, kunhan kylmäaine jäähtyy ja se saadaan tiivistymään nesteeksi. Hiilidioksidin matalan kriittisen pisteen vuoksi hukkalämpö on transkriittisenä mahdollista hyödyntää tehokkaasti [13].

Tyypillisesti lämmöntalteenotto toteutetaan Huurteen jäähdytysyksiköissä kuumakaasulinjaan ennen kaasujäähdytintä asennettavilla levylämmönvaihtimilla, joissa toisiopuolella kiertää jokin lämmönvälitysneeste ja ensiöpuolella kompressorilta tuleva kuuma kylmäainekaasu. Kuvassa 17 esitettyssä levylämmönvaihtimessa ensiö- ja toisiopuolen nesteet ovat erotettu tiivistein ja muotoilluin levyin, jotka ohjaavat kylmän nesteen läpi joka toisen levyvälin ja kuuman joka toisen (punainen ja sininen) [14]. Tarkoituksena on siirtää lämpöä kuumasta aineesta kylmään.

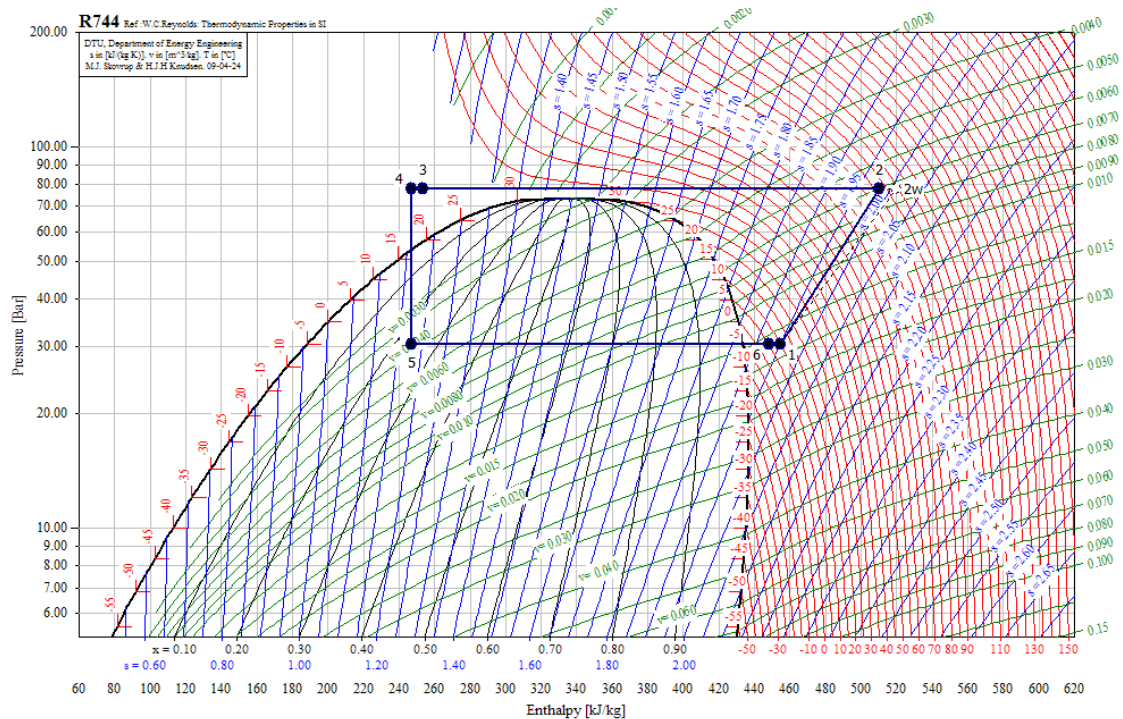


Kuva 17. Levylämmönvaihdin [14]

Lämmöntalteenottovaihtimet ovat kuumakaasulinjassa rinnakkain ohitusventtiilien kanssa kuten "LTO1" ja "LTO2" Kuvassa 9. Ohitusventtiileillä voidaan tarvittaessa kytkeä lämmöntalteenotto pois päältä tai säätää sen toimintaa.

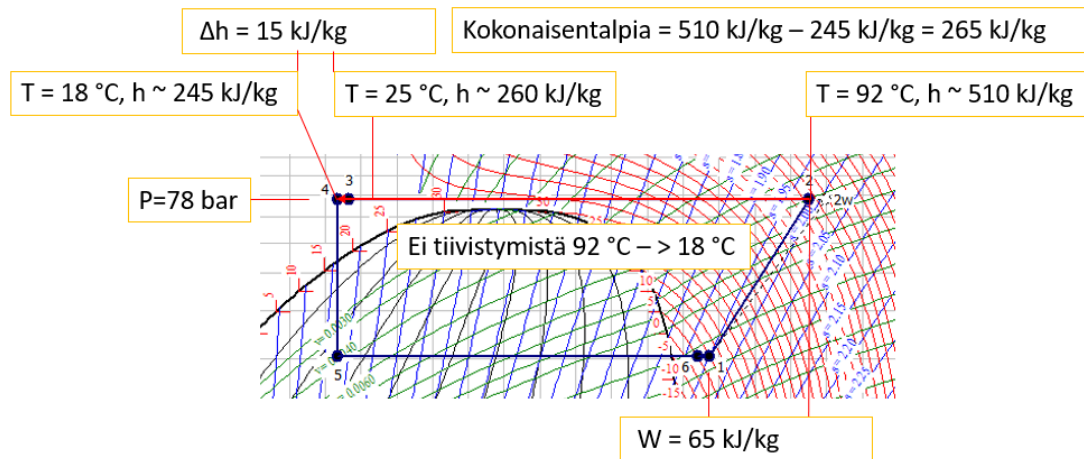
Kappaleen 8 kuvassa 16 nähdään, miten lauhtuminen tapahtuu olomuodon muutoksen vuoksi tasaisessa noin 20 °C lämpötilassa. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että jos kyseisessä kuvassa olevaa lauhdelämpöä haluttaisiin hyödyntää, täytyy lämmitettävän kohteen olla joitain asteita alle 20 °C, jotta lauhdelämpöä saadaan siirrettyä. Kuvassa X-akselilla on kylmäaineen entalpia kiloa kohti ja tästä nähdään, että tulistuslämpö sisältää huomattavasti vähemmän energiaa kuin lauhdelämpö. Koska 20 °C ei riitä moneen kiinteistön tavalliseen lämmityskohteeseen, on sille hyvin hankala löytää käyttöä ja lämpöenergiasta suurin osa menee todennäköisesti hukkaan lauhduttimessa.

Hiilidioksidijäähdytysjärjestelmää voidaan käyttää transkriittisenä puristamalla kompressorilla kaasua hieman enemmän, jolloin lauhduttimessa, tai tässä tapauksessa kaasujäähdyttimessä, ei tapahdu tiivistymistä. Tilanne simuloitiin Simple one-stage CO₂-ohjelmalla kuvassa 18. Transkriittisenä kylmäaineen lämpötila (punaiset viivat) muuttuu aina paisuntaventtiilille kuvan pisteeseen 4 asti.



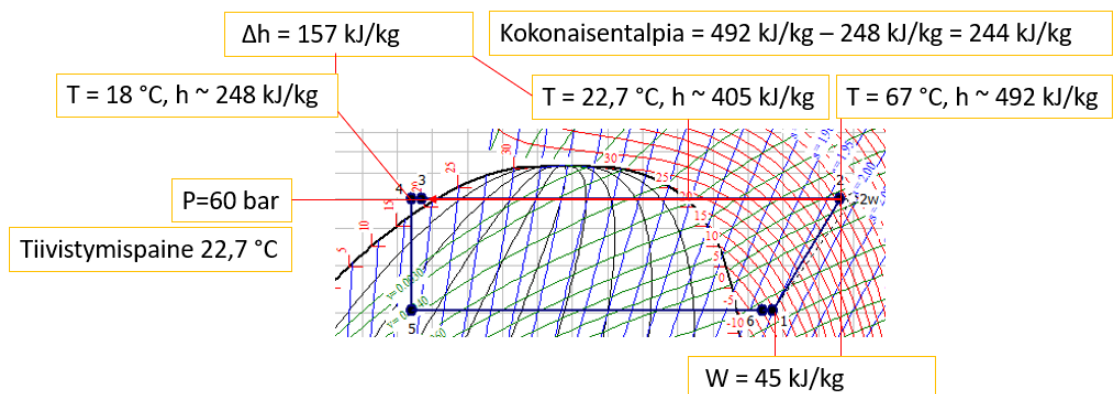
Kuva 18. CO₂ järjestelmä transkriittisenä – Simple one-stage CO₂ [4]

Kuvassa 19 nähdään, että jos lämpöä voitaisiin hyödyntää esimerkiksi lattialämmityksissä 25 °C asti, saadaan transkriittisenä kokonaisentalpiasta 265 kJ/kg talteen 250 kJ/kg ja hukkaan menee kaasujäähdyttimessä 15 kJ/kg. Kaikesta tuotetusta lämpöenergiasta saadaan siis talteen noin 94 %. Kompressorin joutuu tekemään työtä noin 65 kJ/kg.



Kuva 19. Lämmöntalteenotto transkriittisenä

Verrataan vielä edellä käsitellyä transkriittistä tilannetta subkriittiseen. Simple one-stage CO₂ -ohjelmassa laskettiin korkeapaine 60 baariin. Seuraavassa kuvassa 20 näemme simuloinnin 60 baarissa subkriittisenä. Käyttökohteessa pystytään oletetusti optimiolosuhteissa hyödyntämään lämmönvaihtimissa jopa 25 °C vettä, joten tulistuslämmön osuus $492 \text{ kJ/kg} - 405 \text{ kJ/kg} = 87 \text{ kJ/kg}$ pystytään hyödyntämään ja hukkaan menee 157 kJ/kg. Kokonaislämpöenergiasta on siis mahdollista ottaa talteen noin 36 %. Noin 64 % menee hukkaan lauhduttimessa kylmäaineen tiivistyessä nesteeksi 22,7 °C:ssa. Oletus kaiken lämmön hyödyntämisestä pohjautuu siihen, että talteenoton lämmönvaihtimet on suunniteltu sopiville lämpötila-alueille, jotta ne kattavat koko lämpötila-alueen.



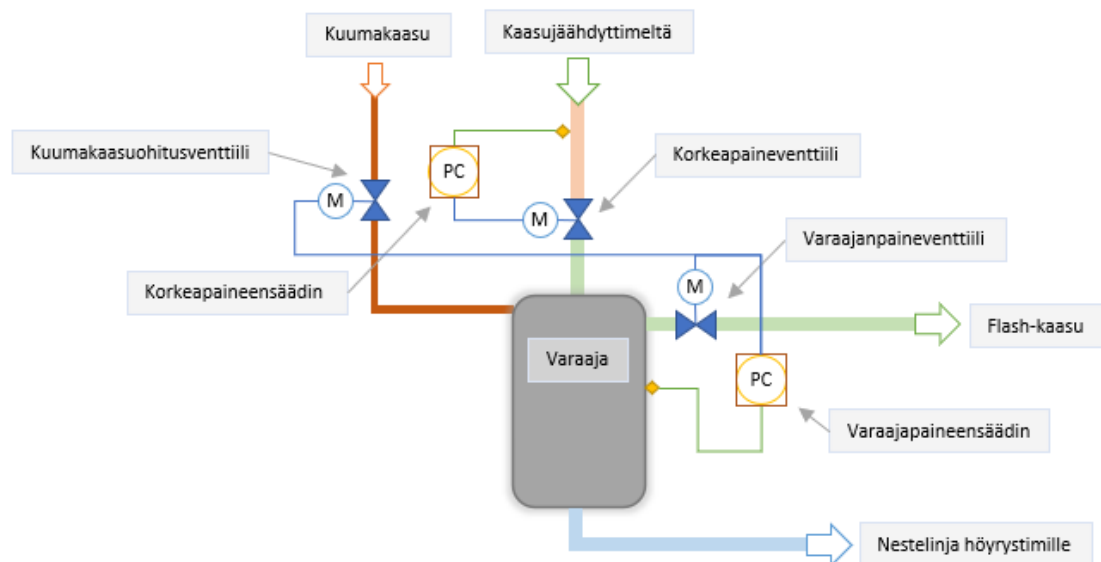
Kuva 20. Lämmöntalteenotto subkriittisenä

Tässä subkriittisessä esimerkissä kompressoritekeä työtä 45 kJ/kg verrattuna transkriittisen 65 kJ/kg. Korottamalla korkeapainetta ja sitä kautta käyttämällä 20 kJ/kg enemmän kompressoritehoa, saadaan sama 20 kJ/kg enemmän kokonaisentalpiaa, mutta lämmöntalteenotossa hyödyntämispotentiaalia on 164 kJ/kg enemmän. Tästä nähdään, että käyttökohteesta riippuen voi olla hyödyllistä käyttää hieman enemmän

sähköenergiaa kompressoreilla, jotta kohteessa muiden huonommalla hyötysuhteella toimivien lämmöntuottomuotojen, kuten sähkölämmityksen, käyttöä voidaan vähentää.

2.4.4 Varaaja

Varaaja tai "Flash tank" toimii hiilidioksidijärjestelmässä kylmäaineen varastona sekä nesteen ja kaasun erottimena [15]. Flash-kaasun syntyminen aiheuttaa varaajan paineen kasvua ja sitä päästetään hallitusti MT-kompressoriryhmän imuun varaajan yläosan yhteestä varaajanpaineventtiilin läpi. Järjestelmässä, jossa varaajan paine on sama kuin imupaine, ei tarvita varaajanpaineventtiiliä. Varaajaan tiivistynyttä nestettä tarjotaan järjestelmän höyrystimille varaajan alaosasta. Seuraavassa kuvassa 21 on esitetty varaajan liitynnät ja yleisimmät sen säädössä käytetyt venttiilit.



Kuva 21. Varaaja

Varaajan paine tulee pitää korkeammalla kuin imupaine, jotta kylmäaine virtaa höyrystimille ja järjestelmässä oikeaan suuntaan. Toisaalta varaajan paine ei saa nousta liian korkeaksi varaajan tai muiden komponenttien vaurioitumisen välttämiseksi. Varaajan paineelle halutaan kiinteä asetusarvo, jota sen ohjaus pyrkii seuraamaan.

3. ALUSTA JA RAJAPINNAT

Jäähdytysyksikön ohjauksen suunnitteluun lähdettiin tutustumalla ensin tarkemmin Huurteen nykyisiin jäähdytysyksiköihin. Oli luonnollista lähteä liikkeelle jäähdytysyksikön ohjattavista toimilaitteista ja erilaisista mittauksista. Tässä kappaleessa on esitetty yleisimmät ohjattavat toimilaitteet sekä anturit. Antureiden ja toimilaitteiden tunteminen luo pohjan tulo- ja lähtömoduulien eli I/O-moduulien (engl. input/output Module) valinnalle. Analogisten lähtöjen ja tulojen erottelukyvystä tehtiin alustava vaatimus perustuen aikaisempiin kokemuksiin sekä olemassa olevien laitteiden erottelukyvyyhin.

3.1 PT1000 Lämpötila-anturit

PT1000-anturit ovat ohjausjärjestelmissä hyvin yleisiä ja niitä käytetään myös Huurteen jäähdytysyksiköissä. PT1000 on platinasta valmistettu vastuslämpötila-anturi. Sen resistanssi muuttuu lämpötilan mukaan ja resistanssi 0 °C lämpötilassa on 1000 Ω. Platinasta valmistetuilla vastuslämpötila-antureilla on useita hyviä puolia, joiden vuoksi ne ovat suosittuja teollisuuden mittauksissa. Platina on metalli, jolla on matala kemiallinen aktiivisuus ja korkea sulamispiste. Koska platina ei reagoi herkästi muiden aineiden kanssa, säilyvät sen ominaisuudet pitkään muuttumattomina ja siitä seuraa anturin pitkä elinikä. Korkea sulamispiste mahdollistaa korkeiden lämpötilojen sovellukset. Seuraavassa kuvassa 22 on esitetty Huurteen yksiköiden kaksi yleisintä anturityyppiä. [16]



Kuva 22. Danfoss AKS21 ja AKS11 -lämpötila-anturit [8]

PT1000-anturi vaatii sille suunnitellun resistanssia mittaavan etuasteen. PT1000-anturin käytössä haasteena on se, että mittausvirta lämmittää anturia ja vääristää mittaustulosta. Tästä johtuen suositeltu mittausvirta PT1000-anturilla on 0,1–0,3 mA [17]. Tätä

ongelmaa pyritään kiertämään monessa mittauslaitteessa sillä, että PT1000-anturia mitataan esimerkiksi 2 kertaa sekunnissa hyvin lyhyillä mittausvirtapulsseilla. PT1000-anturin läpi johdetaan mittausvirta ja sen yli olevaa jännitettä mitataan. Tästä saadaan laskettua resistanssi. Pelkkä tavallinen I/O-moduulin jännitemittaus ei usein riitä, sillä niiden analogia-digitaalimuuntimen eli AD-muuntimen mittausalue on skaalattu liian laajalle alueelle, jolloin tarkkuus ei riitä resistanssin mittaamiseen tarvittavalla tarkkuudella. Mittaukselle riittävänä erottelukykynä päätettiin pitää 0.1 celsiusastetta.

3.2 Painelähettimet

Jäähdytysyksikössä mitataan painetta erilaisilla painealueilla ja riittävän mittaustarkkuuden saavuttamiseksi tarvitaan eri painealueille tarkoitettuja painelähettimeä. Korkeapainelinjassa kompressorin ulostulon puolella paine voi nousta jopa 150 baarin. Toisaalta korkeapaineventtiilin jälkeen varaajassa paineet eivät yleisesti nouse yli 60 baarin. Huurteen valmistamissa yksiköissä käytetään esimerkiksi oikealla kuvassa 23 esiteltyä Danfossin AKS2050 painelähetintä. AKS2050:ssä on pietsoresistiivinen paineanturi yhdistettynä ratiometriseen etuasteeseen. Ratiometrisessä analogiasignaalisissa mittauksen lähtösignaali on suhteessa käyttöjännitteeseen.



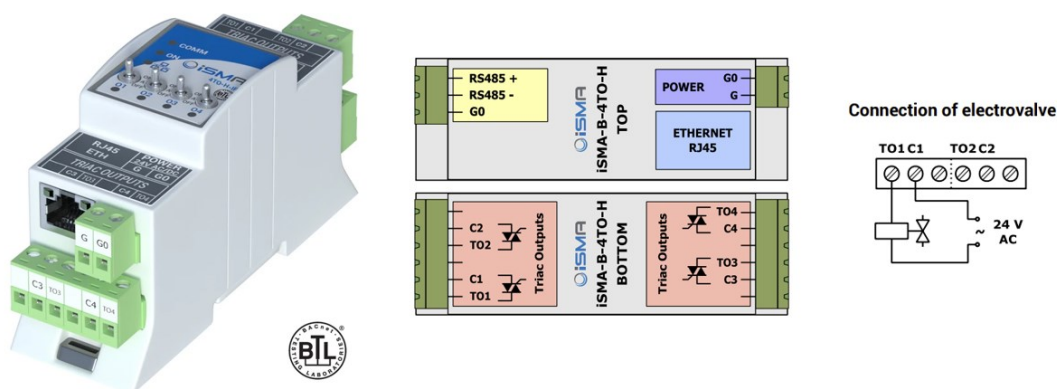
Kuva 23. MBS 8250 ja AKS 2050 [18]

Säädinkehityksen näkökulmasta painelähettimeiden on käytännöllistä olla varustettu 4-20mA ulostulolla ratiometrisen sijaan, koska IO-moduulien sisääntulot harvemmin tukevat suoraan ratiometrisen jännitesignaalin lukemista. Virtaviestillä toimiva AKS2050:aa vastaava painelähetin on esimerkiksi MBS 8250. Painemittaukselle riittävänä erottelukykynä päätettiin pitää 0,1 baaria.

3.3 Digitaaliset liittynät

Jäähdytysyksikössä tulee pystyä lukemaan potentiaalivapaiden releiden kärkeä ja ohjaamaan releitä kiinni ja auki. Potentiaalivapaan releen kärjen lukeminen onnistuu helposti ja on yksi yleisimmistä IO-moduulien sisääntulotyypeistä. Releiden ohjaukseen on käytännöllistä käyttää IO-moduuleja, joissa on sisäänrakennettuja 230 VAC -releitä. Näin säästetään tilaa ja tehdään johdotuksesta yksinkertaisempaa.

Releiden ohjauksen lisäksi tarvitaan puolijohdereleulostulo eli SSR-ulostulo (solid state relay) tai triac-ulostulo esimerkiksi nestesuukutuksen magneettiventtiin ohjaukseen. SSR-ulostulot ovat tasajännitteelle ja triac-ulostulot vaihtojännitteelle. Magneettiventtiileitä kytketään jatkuvasti päälle ja pois, jolloin tavallisen releen käyttäminen niiden sähköistyksessä ei aina tule kysymykseen. Tämä kuitenkin huomioidaan tapauskohtaisesti riippuen siitä, kuinka usein venttiin tilaa vaihdetaan. Seuraavassa kuvassa 24 on esimerkki I/O-moduulista triac-lähdöillä.



Kuva 24. iSMA-B-4TO-H-IP, Triac-kytkentä ja liitännät [19]

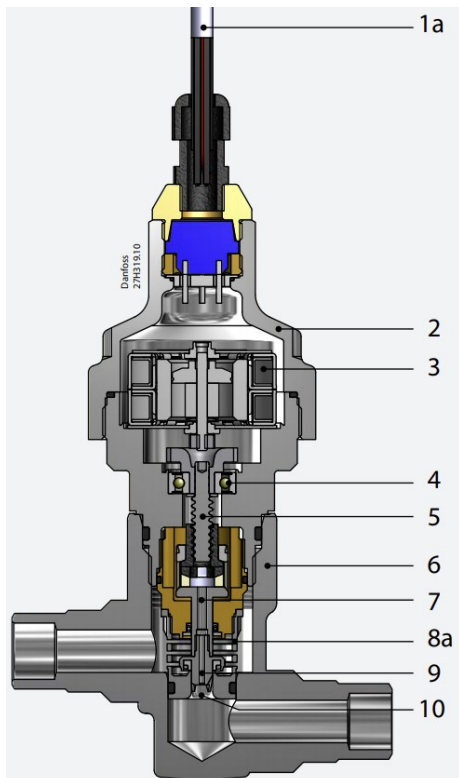
3.4 Venttiilit

Huurteen jäähdytysyksiköissä on liityntöjen näkökulmasta kolmen eri tyyppin venttiilejä: magneettiventtiilejä, säätäviä moottoriventtiilejä ja kaksiasentoisia moottoriventtiilejä. Magneettiventtiilejä käytetään muun muassa öljynpalautuksessa ja nestesuukutuksessa. Moottoriventtiilejä LTO:n ja kaasujäähdyttimien ohituksissa sekä korkea- ja varaajapaineventtiileissä. Moottoriventtiileinä on käytetty muun muassa Danfossin CCMT-venttiilejä (kuvassa 25 vasemmalla) ja ICMTS-venttiilirunkoja yhdistettynä Danfossin ICAD-toimilaitteisiin. Molemmat moottoriventtiilit toimivat askelmoottoreiden avulla.



Kuva 25. CCMT-venttiilit ja ICAD toimilaitte [18]

CCMT-venttiileissä, kuvassa 26, on venttiilirunko yhdistetty valmiiksi rungolle sopivaan askelmoottoriin. CCMT-venttiili ei sisällä mitään elektroniikka, vaan askelmoottorin (3) käämien päät on tuotu suoraa venttiilin kaapelin (1a) liittimiin.



Kuva 26. CCMT-venttiilin poikkileikkaus [18]

CCMT-venttiileiden käyttämiseksi tarvitaan askelmoottorille sopiva moottorinohjain. Moottorinohjaimena voidaan käyttää esimerkiksi Danfoss EKE 1P -askelventtiilin

ohjainta. EKE 1P voidaan asetella esimerkiksi 2–10 V sisääntuloalueella käyttämään venttiiliä avaamalla 0–100 %.

Kuvassa 25 oikealla esitettyä ICAD-toimilaitetta voidaan käyttää yhdessä ICMTS-venttiilirunkojen kanssa. Toimilaitetta voidaan ajaa suoraan 0–10 V tai 4–20 mA ohjaussignaaleilla. Ohjaussignaalin erottelukyvyn tulee olla vähintään 1/1000 käytetystä ohjaussignaalin alueesta eli 0–100 % avaumasta 0,1 %. ICAD-toimilaitte sisältää kehittyneitä toimintoja, kuten tarkan avauman tunnistamisen optisen enkooderin avulla sekä automaattisen askelmoottorin kalibroinnin. Tämä yhdistelmä on myös Huurteen yksiköissä hyvin yleinen. ICMTS-venttiili ICAD-toimilaitteella on kuitenkin CCMT-venttiiliä kalliimpi ja sitä käytetään tapauskohtaisesti vaativammissa olosuhteissa. Venttiilien käyttämisessä tulee huomioida, että sovelluksesta riippuen ne täytyy ajaa kiinni tai auki käyttöjännitteen katketessa. Tähän voidaan käyttää esimerkiksi UPS:ää (engl. Uninterruptible Power Supply) eli varavirtalähdettä tai moottoriventtiilin eteen asennettavaa magneettiventtiiliä. Magneettiventtiileinä on käytetty muun muassa Danfossin AKV-venttiileitä. AKV-venttiili on sähköinen paisuntaventtiili, jossa sähkömagneetti pitää venttiiliä aktiivisena auki, jolloin venttiili päästää kylmäainetta lävitsensä. Kelan sähköistyksen katketessa venttiilin karan jousi painaa venttiilin kiinni. AKV-venttiileitä saa 24VAC ja 230VAC käämeillä. Käämien tehonkulutus tulee huomioida I/O-moduulin lähdön valinnassa. Lähtönä voidaan käyttää esimerkiksi digitaalista triac-lähtöä.

3.5 Sähkömoottorit

Jäähdytysyksikössä on erilaisia ohjausta tarvitsevia sähkömoottoreita. Kompessoreissa sähkömoottorit on yleensä rakennettu kompressorin yhteyteen. Puhaltimissa, kuten kaasujäähdyttimen puhaltimissa, käytetään joko taajuus tai suoraikäyttöisiä puhaltimeen integroituja moottoreita. Nopeussäädettävät puhaltimet ovat nykyään lähes poikkeuksetta EC-puhaltimia. Kompessoreita ohjataan joko kytkemällä niitä kontaktorin avulla päälle ja pois tai antamalla kompressorin taajuusmuuttajalle nopeuspyynti ohjaussignaalina.

Suoraikäyttöisen kompressorin kontaktorin kelan sekä suoraikäyttöisten puhaltimien sähköistykseen vaaditaan 230 VAC jännitteen kytkeminen. Se voidaan tehdä ulkoisella releellä käyttämällä tavallista digitaalista tasajänniteulostuloa, IO-moduulin sisäänrakennetulla 230 VAC relelähdöllä tai digitaalisella triac-lähdöllä. Digitaalista lähtöä valitessa on varsinkin triacin tapauksessa huomioitava kontaktorin tai releen kelan aktivointiin tarvittava virta ja kytkentätapahtuman reaktiiviset komponentit.

Kompressoreille on käytetty muun muassa Danfoss VLT FC 103 -taajuusmuuttajia. Kyseinen taajuusmuuttaja on konfiguroitavissa toimimaan Modbus RTU:n ja analogisen virta- sekä jänniteviestin avulla. Huurteen yksiköissä käytettyjen EC-puhaltimien nopeutta ohjataan 0-10V jännitesignaalilla. Nopeusohjattavien puhaltimien ja kompressoreiden nopeuden ohjaamisen erottelukyvyn tulee olla 1/1000 ohjaussignaalin alueesta eli 0,1 % kapasiteetista 0–100 %

3.6 Muut IO-vaatimukset ja yhteenveto

IO-moduuleilta vaaditaan watchdog-toimintoa, eli väyläyhteyden katketessa täytyy ulostulo pystyä asettamaan turvalliseen tilaan. Tästä hyvä esimerkki on nesteisku imulinjaan. Jos nesteiskutuksen magneettiventtiili jää ongelmatilanteessa vetäneeksi, voi siitä seurata imulinjan täyttyminen nesteellä ja nesteisku kompressorissa.

Tämän lisäksi vaaditaan vähintään Modbus RTU tai Modbus TCP yhteensopivuus ulkoisten kenttälaitteiden kytkentää varten. Väylätekniikoiden valinta tulee arvioida erikseen tämän työn ulkopuolella siten, että säädin sopii kommunikointiprotokolliltaan Huurteen nykyiseen järjestelmäarkkitehtuuriin ja iTOP-etävalvonnan taustajärjestelmiin.

Seuraavassa taulukossa 1 on koottu yhteen edellä käsitellyjä eri liitännätyyppien yksityiskohtia ja vaatimuksia. IO-moduulia valitessa tulee huomioida tässä käsitellyt yksityiskohdat sekä kustannustehokkuus.

Taulukko 1. Yhteenveto IO-vaatimuksista

Lämpötilamittaukset	Anturityyppinä PT1000 resistanssianturit ja IO-mittauksen resoluutio vähintään 0,1 astetta. Mittausvirta maksimissaan 0,3 mA.
Painemittaukset	Mittasignaalinä käytetään 4–20 mA ja erottelukyky vähintään 0,1 bar.
Analogiset ulostulot	Ohjaussignaalinä toimilaitteille käytetään 0-10V ohjaussignaalinä tai Modbus RTU / TCP-väylää. Ohjaussignaalin erottelukyvyn tulee olla vähintään 0,1 % säätöalueesta.
Analogiset sisääntulot	Analogisena sisääntulona käytetään 4 - 20 mA. Mittasignaalin erottelukykynä vähintään 0,1 % mittausalueesta.
Digitaaliset sisääntulot	Potentiaalivapaan releen luku. Lukusykli vähintään kuten se on määritetty kappaleessa 6.
Digitaaliset ulostulot	Rele-, SSR- tai Triac -lähtö riippuen toimilaitteen kytkentäsyklien määrästä ja ohjattavan releen käämin kuormituksesta.

4. OHJAUKSEN RAKENTAMINEN

Tässä kappaleessa on kuvattu kunkin jäähdytysyksikön osakokonaisuuden ohjausperiaate. Toimintojen kuvaus perustuu työryhmän kokemukseräiseen tietoon, työnaikaiseen selvitystyöhön, nykyisten yksiköiden toimintaan sekä komponentti- ja säädinvalmistajien dokumentointiin.

4.1 Kompressoreiden ohjaus

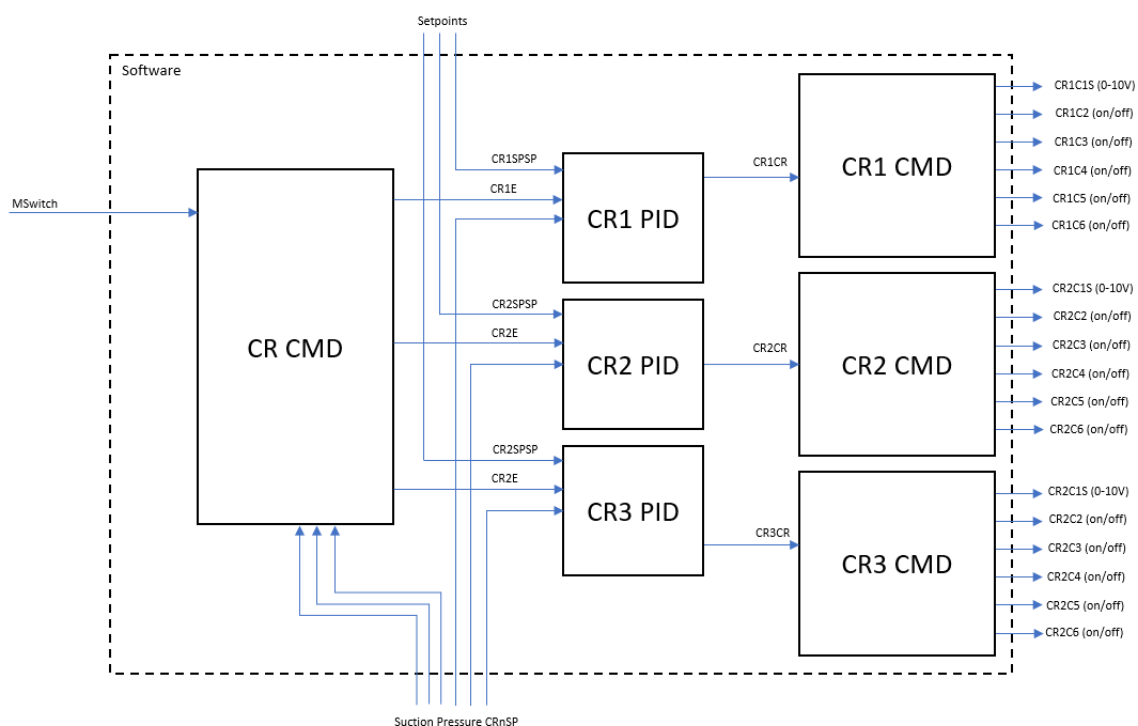
Kompressoreiden ohjauksen kehitykselle ei nähty erityistä potentiaalia. Kompressorit ylläpitävät haluttua imupainetta ja nykyiset säätimet suoriutuvat tehtävästä kokemuksen mukaan kohtuullisen hyvin. Joissakin erikoistapauksissa on tullut vastaan tilanne, jossa kompressorin säätö on käytetyllä konesäätimellä ollut liian hidas ja ei ole pystynyt vastaamaan muun järjestelmän nopeisiin muutoksiin tarpeeksi nopeasti. Tällaisissa järjestelmissä on esimerkiksi ollut ainoastaan yksi höyrystin suhteellisen suurikokoisen jäähdytysyksikön perässä ja esimerkiksi paisuntaventtiilin sulkeutuessa täydestä kuormasta suoraan kiinni on imupaine karannut fyysisten varolaitteiden katkaisurajalle muutamissa sekunneissa. Tältä osin nopeammasta ja suorituskykyisemmästä säätimestä voitaisiin saada hyötyä.

Kompressoreita voidaan käyttää suoraan verkkoon kytkettyinä tai taajuusmuuttajakäyttöisinä kohteen vaatimusten mukaan. Suorakäyttöisen kompressorin sähkömoottoria kytetään päälle ja pois. Taajuusohjatuissa kompressoreissa kompressorin sähkömoottoria ajaa taajuusmuuttaja. Taajuusmuuttajan taajuutta säätämällä pystytään kompressorin pyörintänopeutta ja sitä kautta paineen sekä massavirran tuottoa hallitsemaan portaattomasti. Taajuuskäyttöisissäkin kompressoreissa on kuitenkin huomioitava, että kompressoreilla on jokin pienin ja suurin käyttönopeus. Kompressoreiden säädön perusajatus on saada ohjattua kompressoriryhmän imupainetta mahdollisimman tarkasti ja tasaisesti. Kompressoriryhmässä voi olla useita eri kompressoreita, jotka ovat teholtaan eri suuruisia.

4.1.1 Ohjauksen rakenne

Ohjaus rakennetaan kuvan 27 mukaisesta rakenteesta. Ensimmäisenä vasemmalla oleva lohko "CR CMD" päättää, milloin kompressoriryhmä aktivoidaan käyttöön. CR on

lyhenne englanninkielisistä sanoista "Compressor Rack" eli kompressoriryhmä. Jokaisella kompressoriryhmällä on oma PID-säädin (Proportional-integral-derivative-säädin). PID-säädin laskee, paljonko kapasiteettia halutaan käyttää, jotta saavutetaan PID-säätimelle asetettu imupaineen asetusarvo. "CR1 PID" -lohko mittaa imupainetta ja antaa "CR1 CMD" -lohkolle kapasiteettipyynnin (0–100 %) pyrkien saamaan imupaineen asetusarvoonsa. "CR1 CMD" -lohko oikealla päättää, mikä ryhmän kompressoreista käynnistetään, jotta päästään tavoiteltuun kapasiteettipyyntiin. "CR1 CMD" -lohko pyrkii tuottamaan mahdollisimman lineaarisen kapasiteetin 0–100 % pyyntiviestille. Tämä rakenne on helposti muutettavissa sopimaan isompaan tai pienempään kompressorikonfiguraatioon.



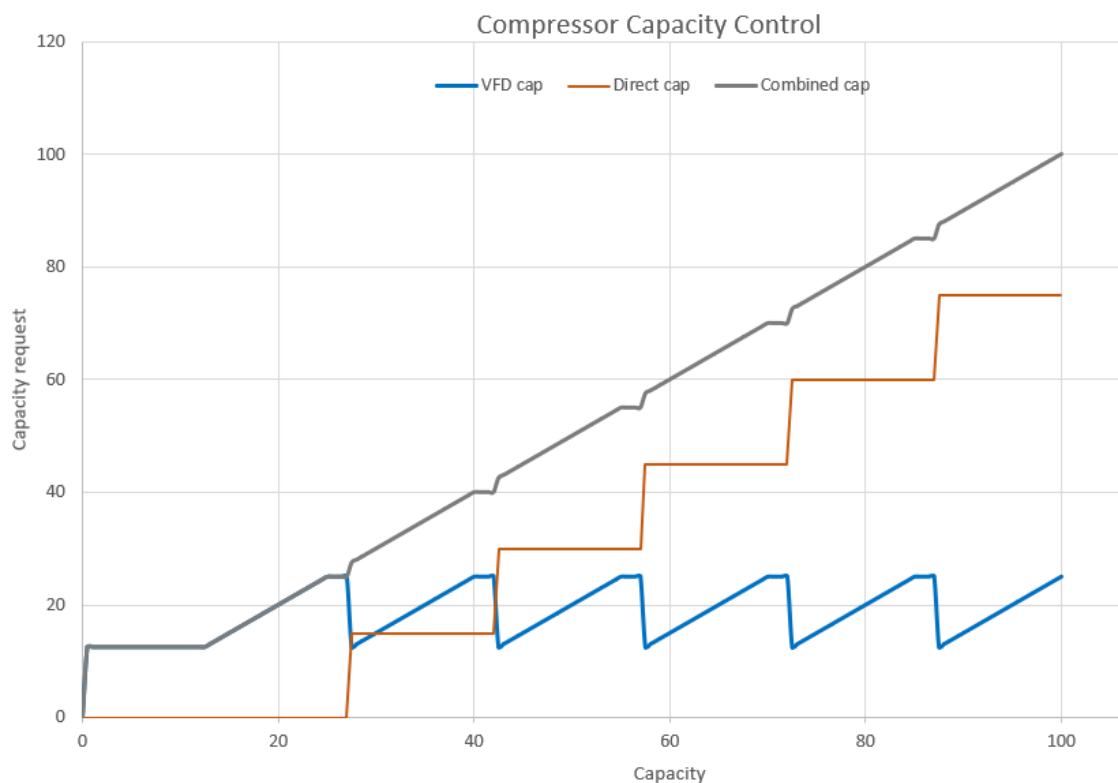
Kuva 27. Kompressoreiden ohjauskaavio

Kuviossa 1 on havainnollistettu kompressoriryhmän kapasiteetin ohjausfunktion "CR1 CMD" toimintaa. Kuvaajan esimerkkitapauksen kompressoriryhmässä on 1 taajuuskäyttöinen kompressori ja 5 suorakäyttöistä kompressoria. Kompressorit ovat teholtaan yhtä suuria.

Ohjausfunktion hahmotteluun käytettiin MS Exceliä. Funktio laskee sopivan määrän kompressoreita ja taajuusohjatun kompressorin nopeuden kapasiteettipyynnön täyttämiseksi. Ohjauksella pyritään siihen, että kompressorien yhteiskapasiteetti pystyisi vastaamaan mahdollisimman pieniin kapasiteetin tarpeen muutoksiin. Ohjauksessa täytyy lisäksi huomioida suorakäyttöisten kompressorien vuorottelu käyntiaikojen

mukaan sekä se, ettei kompressoreita uudelleen käynnistetä heti käymisjakson jälkeen. Tarvitaan aseteltavissa oleva kompressorikohtainen uudelleenkäynnistysviive.

Kuviossa harmaa käyrä kuvaa kompressoriryhmän yhteenlaskettua todellista käyntivastetta verrattuna lineaariseen pyyntiramppiin. Oranssi käyrä kuvaa suorakäyttöisten kompressoreiden yhteenlaskettua kapasiteettia ja sininen taajuuskäyttöisen kompressorin kapasiteettia. Kuvaajassa esitelty Excelissä luotu funktio on kohtuullisen helppo siirtää lopulliselle alustalle. Ohjelmaan syötetään parametreina kompressorin koko, taajuusalue sekä käyttötyyppi (taajuus- tai suorakäyttöinen).



Kuvio 1. Kompressorin kapasiteetin ohjaus

4.1.2 Erityistilanteet

Kompressorien ohjaamisessa on huomioitava muutamia erikoistilanteita, joissa kompressoreiden normaali ohjaus täytyy ohittaa ja suorittaa kapasiteetin vähentämistä tai kompressoreiden sammutus. Nämä toiminnot tarvitaan, jotta epänormaalissa käyttötilanteessa ei synny järjestelmän komponenttien rikkoutumisen vaaraa.

Jos kompressorin tuottama paine nousee liian korkeaksi, katkaistaan tuottopaineanturin mittauksen mukaan kompressoriryhmän käynti, kunnes paine on palannut sallittujen rajojen sisälle. Uudelleenkäynnistykselle tarvitaan aseteltavissa oleva viive. Liian

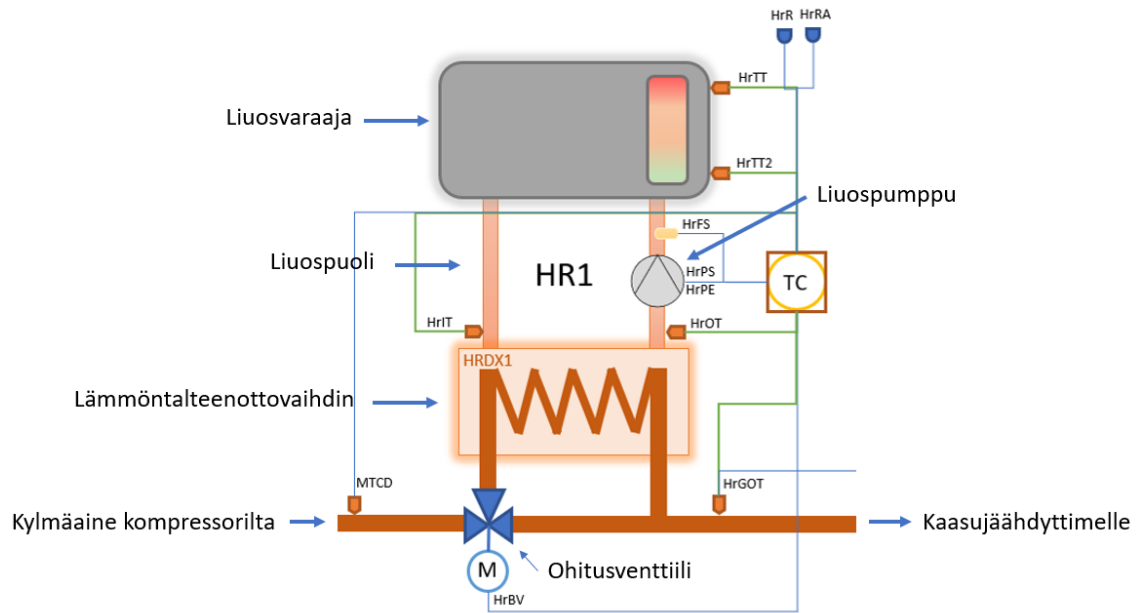
korkeaksi kohonnut paine voi aiheuttaa putkiston tai muiden komponenttien vaurion ja sitä kautta vaaratilanteen.

Jos kompressoriryhmän imupaine laskee alle asetellun minimiarvon, täytyy kompressoriryhmän käynti katkaista. Kompressorit voidaan taas palauttaa käyntiin aseteltavan uudelleenkäynnistysviiveen jälkeen, jos ryhmän imupaine on taas palannut sallittujen rajojen sisään. Liian matala imupaine voi aiheuttaa komponenttien rikkoutumisen ja höyrystimet voivat esimerkiksi jäätyä poikkeuksellisen nopeasti.

4.2 Lämmöntalteenoton ohjaus

Lämmöntalteenotto on yksi CO₂-jäähdytysyksikön tärkeimpiä prosesseja. Lämmöntalteenoton paineenkorotuksen tarkasta ja optimoidusta hallinnasta on hyötyä järjestelmän kokonaisyötysuhteen parantamisessa. Kuten jo kappaleessa 9 on havainnollistettu, saadaan pienellä paineenkorotuksella subkriittisestä transkriittiseksi paljon hyötyä lämmöntalteenotossa. Paineen kelluva automaattinen säätö voisi olla paineen ohjauksen seuraava kehitysaskel.

Lämmöntalteenotossa lämmönvaihtimien ulkopuoliseen järjestelmään tuottamaa lämpötehoa hallitaan ohjaamalla lämmönvaihtimien kylmäainepuolen ohitusventtiiliä, kuumakaasulinjan painetta sekä toisiopuolen liuospumun nopeutta. Seuraavassa kuvassa 28 on esitetty yksittäisen lämmöntalteenottopiirin ohjauksen kannalta keskeiset komponentit. Kuuma hiilidioksidikaasu kulkee kylmäaineputken kautta ohitusventtiilille. Ohitusventtiilillä voidaan säätää, kuinka paljon virtaamaa lämmönvaihtimen kautta kulkee. Lämmöntalteenottovaihtimen toisiopuolella virtaa liuos, jolla lämpöä kuljetetaan esimerkiksi liuosvaraajaan. Varaajasta sitä käytetään erilaisiin lämmitystarpeisiin. Liuospiirissä on pumppu, jolla voidaan hallita liuoksen massavirtaa, sekä virtausvahti, jonka rele vetää, jos liuospiirissä virtaa liuosta.



Kuva 28. Lämmöntalteenoton ohjaus

4.2.1 Ohjaustilat

Lämmöntalteenottojärjestelmien ohjausmenetelmät riippuvat lämpöä vastaanottavan lämmitysjärjestelmän suunnitelluista toimintaperiaatteista. Jäähdytysyksikkö voi ohjata joko ainoastaan kylmäainepiirin toimintoja tai sekä kylmäainepiirin, että liuospuolen toimintoja. Jos jäähdytysyksikkö ohjaa ainoastaan kylmäainepuolen toimintoja, vaaditaan lämmöntuoton kapasiteetin säätelyyn ulkoinen ohjausviesti, jotta jäähdytysyksikön toiminta voidaan säätää kuhunkin tilanteeseen sopivaksi.

Tankki-tila

Tankki-tilassa lämmöntalteenoton asetusarvoksi otetaan lämmityksen kohteena olevan liuosvaraajan toivottu asetusarvo. Asetusarvona voidaan käyttää myös muuta järjestelmän lämpötilaa, jos se on järjestelmän rakenteen kannalta kannattavampaa. Joissain tapauksissa voi olla kannattavampaa hallita esimerkiksi lämmönvaihtimelta lähtevän liuksen lämpötilaa. Asetusarvo voidaan tuoda esimerkiksi ulkoisesta taloautomaatiojärjestelmästä tai se voidaan asettaa kiinteästi säätimelle. Ohjausjärjestelmä pyrkii saamaan tankkianturin (kuva 28, HrTT ja HrTT2) lämpötilan asetusarvoon ohjaamalla lämmöntalteenottojärjestelmän toimilaitteita. Tässä tilassa jäähdytysyksikkö ohjaa korkeapaineen korotusta, lämmöntalteenottovaihtimen ohitusventtiiliä, liuospuolen pumpun nopeutta. Lisätoimintona lämmöntalteenotto voidaan ohjata päälle ja pois ulkoisella kärkitiedolla.

Ulkoinen ohjaus -tila

Ulkoinen ohjaus -tilassa jäähdytysyksikkö säätää ulkoisen säätöviestin perusteella lämmöntalteenoton tehoa. Tehoa säädetään ohitusventtiilin ja korkeapaineen paineenkorotuksen avulla. Tässä tilassa oletetaan, että ulkoinen järjestelmä antaa tarvittaessa myös sammutuskäskyn erityisissä ongelmatilanteissa.

4.2.2 Käynnistys ja sammutus

Lämmöntalteenoton käynnistämiseksi on reunaehtojen täytyttävä. Jotta lämpöä voidaan tuottaa, on kompressoreita oltava käynnissä ja lämmölle tarvetta. Lämmön tarpeena voidaan toimintotilan mukaan käyttää joko säätimen sisäisen lämmön kapasiteettisäätimen ohjausviestiä tai ulkoista pyyntiviestiä. Jos edellä mainitut ehdot täyttyvät, on kuumakaasun oltava kuumempaa kuin vaihtimen toisiopuolella palaavan liuoksen lämpötila. Muuten liuos lämmittää kylmäainetta eikä kylmäaine liuosta. Lisäksi vaihtimelta lähtevän kylmäaineen lämpötilan tulee olla korkeampi kuin tiivistymislämpötila vallitsevassa paineessa. Siten vältetään kylmäaineen nesteytyminen ja jääminen lämmöntalteenottovaihtimeen. Ehdot järjestyksessä:

1. Vähintään yhden kompressorin tulee olla käynnissä
2. Lämmölle pitää olla tarvetta
3. Kompressorilta lähtevän kylmäaineen lämpötilan tulee olla korkeampi kuin palaavan liuoksen
4. Vaihtimelta eteenpäin lähtevän kylmäaineen lämpötilan tulee olla tiivistymislämpötilan yläpuolella.

Kun edellä mainitut ehdot toteutuvat, on mahdollista alkaa käyttämään lämmöntalteenoton toimilaitteita lämmön tuottamiseksi. Lämmöntalteenotto pitää pysäyttää tiettyjen ehtojen täytyessä. Jos jokin käynnistysehdoista on epätosi, tulee lämmöntalteenotto ajaa pysähdyksiin. Pysäyttäminen tarkoittaa, että ohitusventtiili on kiinni, liuospumppu on pysähdyksissä ja mahdollinen kuumakaasun paineenkorotus otetaan pois käytöstä. Tämän lisäksi on kaksi erikoistilannetta, joissa pitää toimia eri tavalla.

Virtausvahti

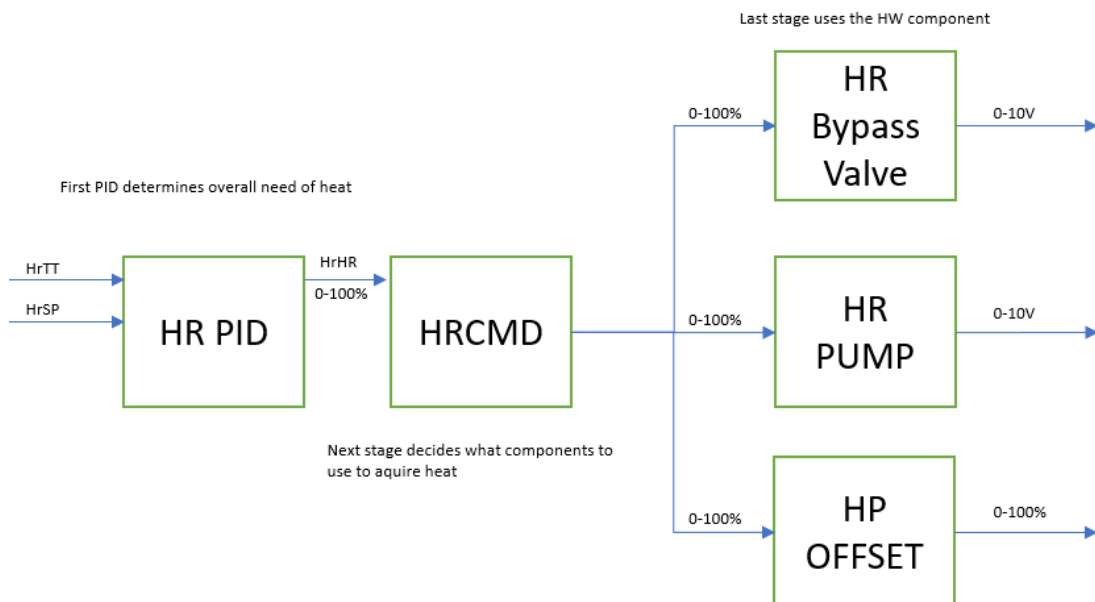
Jos liuospuolella virtausvahti ei pumpun käydessä näytä virtausta säädettävän viiveen ajan, on lämmöntalteenotto pysäytettävä ja tilanteesta annetaan eteenpäin hälytys.

Kiehumishälytys

Jos jokin liuospuolen mittauksista näyttää yli kiehumishälytyksen rajan, esimerkiksi 95 °C, tulee lämmöntalteenotto pysäyttää ja jättää liuospumppu pyörimään aseteltavan ajan verran täydellä nopeudella.

4.2.3 Ohjauksen rakenne

Kun käynnistys ehdot täyttyvät, liuospumppu käy maksimikiirroksilla vähintään aseteltavan viiveen ajan, tai kunnes liuospiirin virtauskytkin havaitsee virtausta. Samaan aikaan lämmöntalteenoton ohitusventtiili ja paineenkorotus alkaa toimia. Seuraavassa kuvassa 29 on esitetty ohjauksen rakenne.

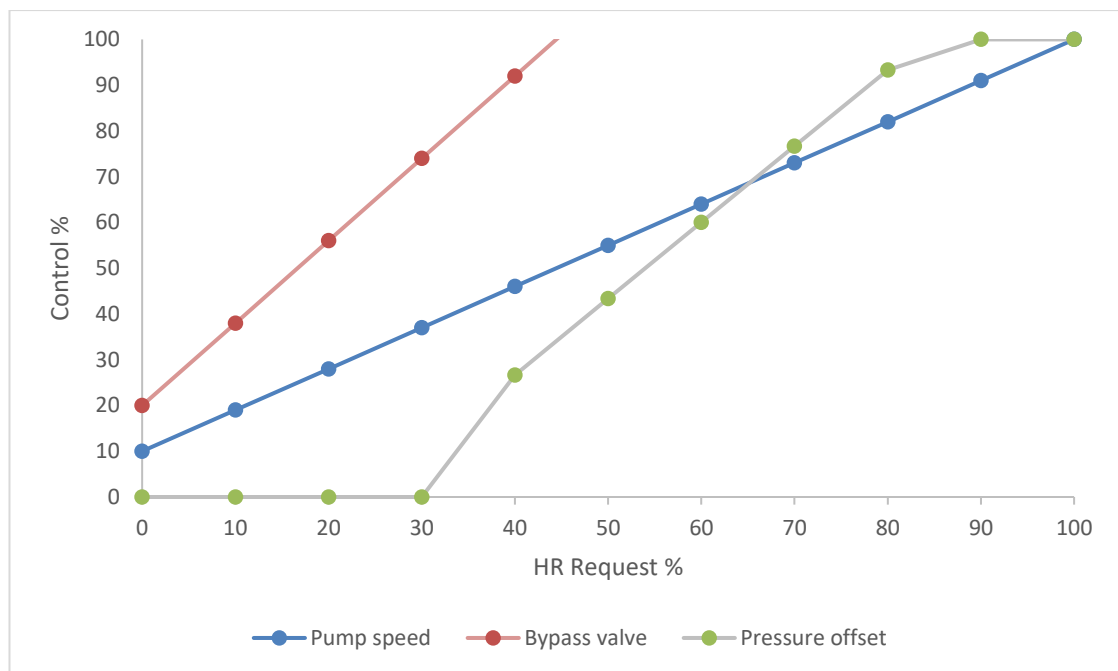


Kuva 29. Lämmöntalteenoton ohjaus -kaavio

Kuvan 29 rakennekuvassa vasemmalla "HR PID" -lohko määrää lämmöntalteenoton pyynnin $HrHR$ (0–100 %). HR on lyhenne englanninkielisistä sanoista "Heat Recovery" eli lämmöntalteenotto. Lohko on käytännössä PID-säädin, jolle annetaan tarvittava asetusarvo ja mittausarvo. Esimerkiksi tankki-tilassa mittausarvoksi valitaan $HrTT$ eli tankki-anturi, ja asetusarvoksi $HrSP$ eli lämmöntalteenoton asetusarvo. Asetusarvo voidaan esiasettaa tai tuoda ulkoisesta järjestelmästä. Seuraava lohko "HRCMD" määrää $HrHR$ mukaan, kuinka eri toimilaitteita käytetään. "HRCMD" ohjaa toimilaitteita seuraavassa kaaviossa esitetyn säädettävän ohjauskartan mukaan. Lisätoimintona liuospumppu voidaan ohjata omalla PI-säätimellä tai ulkoisella säätimellä niin, että se

pitää tiettyä lähtölämpötilaa tai lämpötilaeroa valittujen prosessimuuttujien välillä. Projektiryhmässä oltiin yhtä mieltä siitä, että tällainen rakenne mahdollistaa monipuolisen erilaisiin toteutuksiin mukautettavan ohjauksen.

Lämmöntalteenottoapiirejä voi olla jäädytysyksikön kuumakaasulinjassa useita peräkkäin. Edellä mainittuja ohjauspiirejä voi siis olla useita ja siksi paineenkorotus pitää voida jättää toisesta piiristä pois, tai sitä pitää voida ohjata esimerkiksi usean eri piirin paineenkorotuslähdeistä suurimman mukaan.

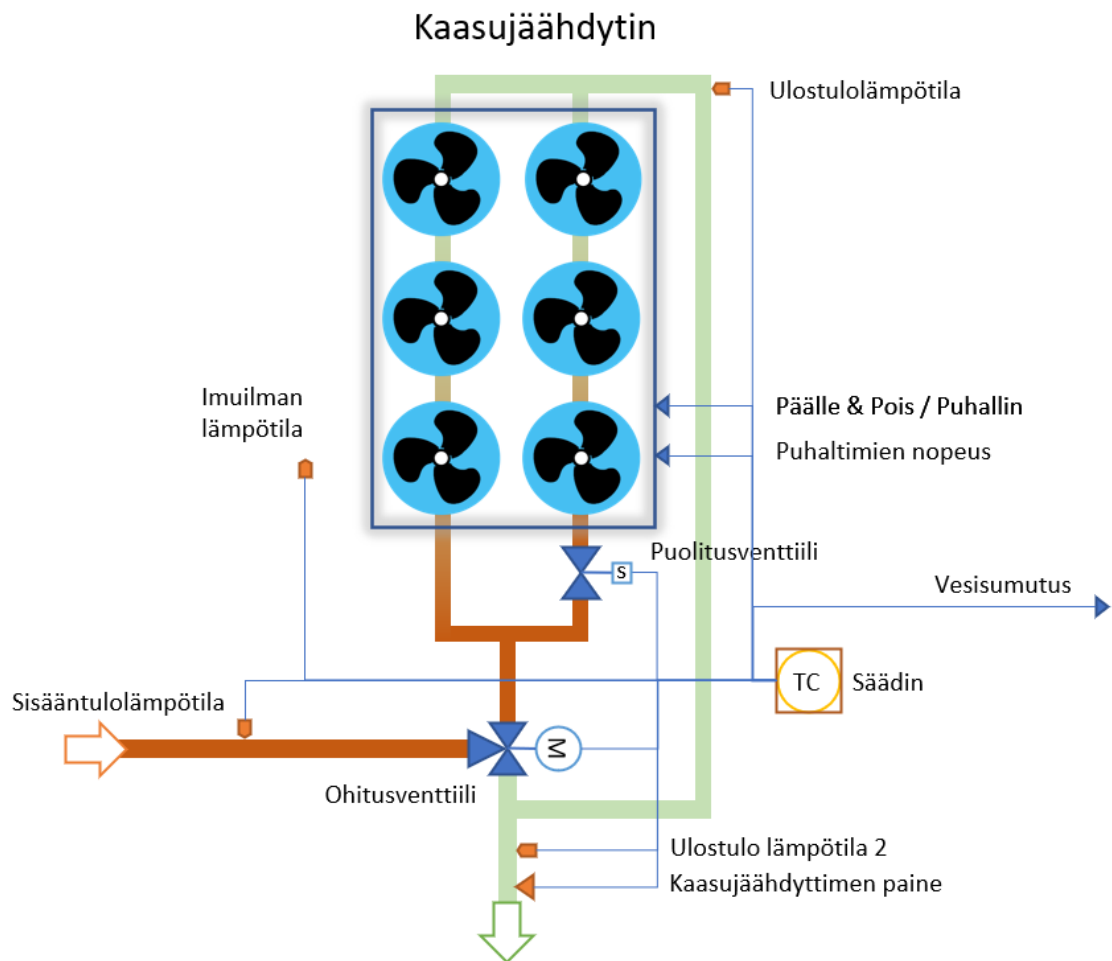


Kuvio 2. HRCMD ohjauskartta

4.3 Kaasujäähdyttimen ohjaus

Kaasujäähdyttimen ohjaus toimii yhdessä lämmöntalteenoton ohjauksen kanssa ja sen ohjauksen kehittämisellä on sitä kautta kehityspotentiaalia. Kaasujäähdyttimellä pystytään hallitsemaan varaajaan menevän kylmäaineen lämpötilaa. Mitä lämpimämpänä kuumakaasu menee varaajaan, sitä enemmän syntyy flash-kaasua. Mitä enemmän flash kaasua syntyy, sitä enemmän kompressorit joutuvat käymään imupainetta ylläpitääkseen. Kompressorien lisäkuormitus johtaa kuumakaasun lämpötilan kohoamiseen ja sitä kautta saadaan lisää lämpöä lämmöntalteenottoapiiriin. Kaasujäähdyttimen ja lämmöntalteenoton toimintaa pitäisi jatkokehittää siihen suuntaan, että järjestelmä osaisi optimoida koko järjestelmän energian käyttöä automaattisesti.

Kaasujäähdyttimellä jäähdytetään kuuma kylmäainekaasu ennen sen paluuta kylmäainevaraajaan. Kaasua jäähdytetään lauhduttimella, jonka tehoa voidaan säätää lauhduttimen puhaltimien nopeutta säätämällä. Puhallinkonfiguraatioita voi olla erilaisia. Kaasujäähdytyn voidaan ohittaa ohitusventtiilillä tai se voidaan puolittaa sulkemalla toinen puoli kaasujäähdyttimestä kiinni. Seuraavassa kuvassa 30 on esitelty kaasujäähdyttimen komponentit ja mittaukset. Kuvan kaasujäähdytyn on kaksiosainen ja siinä on kuusi puhallinta. Kylmäainekaasun virtaamaa voidaan ohjata puolitusventtiilillä ja ohitusventtiilillä.



Kuva 30. Kaasujäähdyttimen ohjaus

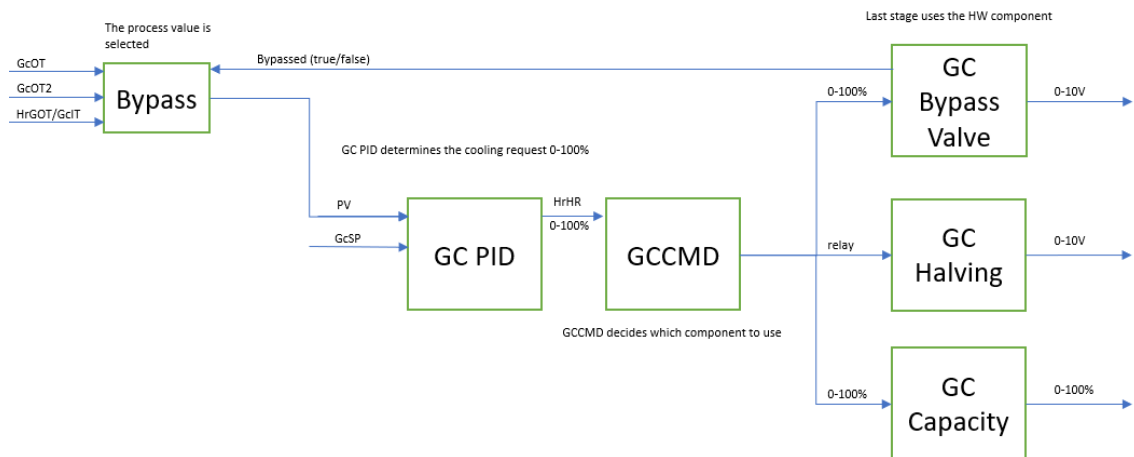
4.3.1 Ohjaustilat

Kaasujäähdyttimellä on kaksi ohjaustilaa: ohitettu- ja kaasujäähdytys-tila. Kaasujäähdytys-tilassa kylmäainekaasu ohjataan ohitusventtiilillä kaasujäähdyttimen läpi ja jäähdytyksen kapasiteettia hallitaan ulostulolämpötilan perusteella ("ulostulolämpötila" kuvassa 30). Tässä tilassa jäähdytyksen kapasiteettia hallitaan käyttämällä puhaltimia, puolitusta, ohitusventtiiliä sekä vesisumutusta

Ohitettu-tila aktivoituu, kun jäähdytyksen pyynti on tarpeeksi pitkään alle asetettavan kynnyksarvon. Ohitettu-tilassa kylmäainekaasu ohjataan kaasujäähdyttimen ohi. Ohitettu-tila voi olla aktiivinen vain asetettavan ajan, jonka jälkeen sen on oltava pois päältä aseteltu aika ennen uutta aktivointia. Ohitettu-tilassa kaasujäähdyttimen kapasiteettia ohjataan "ulostulolämpötila2" -anturin mukaan.

4.3.2 Ohjauksen rakenne

Kaasujäähdytys on käytössä aina, kun järjestelmä on pääkytkimestä käynnissä ja yksikin järjestelmän kompressori on käynnissä. "GC" on lyhenne englannin kielen sanoista "Gas Cooler". Seuraavassa kuvassa 31 esitetään, kuinka kaasujäähdyttimen ohjaus voitaisiin ylätasolla toteuttaa. "GC PID" on pääsäädinlohko, joka pyrkii pääsemään asetusravoon GcSP. Se tekee sen antamalla jäähdytyskapasiteettipyynnin (0–100 %) "GCCMD" lohkolle, joka päättää, kuinka eri toimilaitteita käytetään.

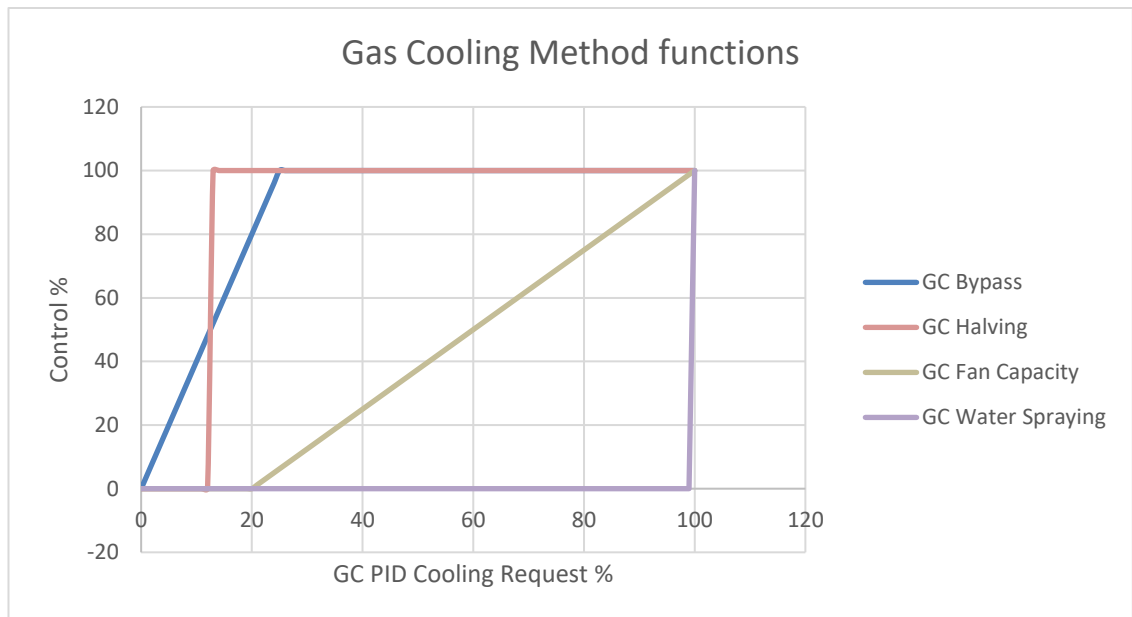


Kuva 31. Kaasujäähdyttimen ohjausrakenne

Bypass lohko valitsee tilanteeseen sopivan mittausarvon "GCPID"-lohko antaman kapasiteettipyynnön ja sisääntulolämpötilan mukaan 30. Jos sisääntulolämpötila alittaa asetettavan raja-arvon, voidaan kaasujäähdyttimen ohitus toteuttaa.

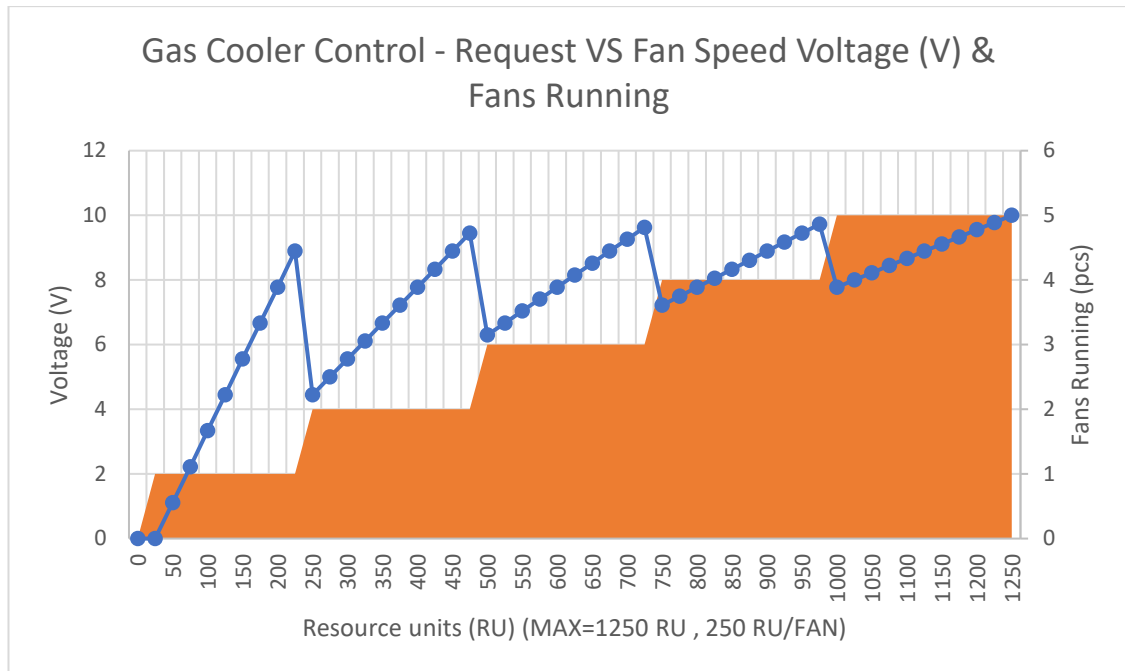
"GCCMD"-lohko käyttää toimilaitteita saavuttaakseen "GC PID" -lohkon antaman kapasiteettipyynnin mukaiset käyntiarvot. "GCCMD" antaa viestit toimilaitteiden lohkoille. Seuraavassa kuvassa 3 on esitetty esimerkkikartta siitä, miten "GCCMD" ohjaa toimilaitteita. Kuviossa on x-akselilla "GC PID" -lohkon kapasiteettipyynti. Eri värisillä käyrillä on esitetty, miten kunkin toimilaitteen tulee käyttäytyä kyseisellä kapasiteettipyynnin arvolla. Kartta on muokattavissa kuhunkin tarpeeseen sopivaksi. Esimerkkikartassa, kun kuumakaasu alkaa tarvita jäähdytystä, alkaa kaasujäähdyttimen ohitusventtiili ensimmäisenä avautua kohti kaasujäähdytintä. Seuraavaksi puolitus

poistuu käytöstä. Sitten lisätään lineaarisesti puhallinten kapasiteettia. Viimeisenä otetaan käyttöön vesisumutus. Vesisumutukselle asetetaan lisäehto, että kapasiteetin on pitänyt olla yli aseteltavan kapasiteettirajan yli aseteltavan ajan.



Kuvio 3. GCCMD toiminta

"GC Capacity" -lohko ohjaa kaasujäähdyttimen puhaltimia. Kaasujäähdyttimessä voi olla useita puhaltimia ja se pitää olla helposti aseteltavissa erilaisiin konfiguraatioihin. Seuraavassa kuviossa 4 on esitetty esimerkkitapaus, jossa "GC Capacity" ohjaa viittä puhallinta pyrkien luomaan mahdollisimman lineaarisen jäähdytyskapasiteetin vasteen lineaarisesti kasvavaan kapasiteetin pyyntiin. Puhaltimilla on yksi yhteinen nopeusviesti ja jokaiselle puhaltimelle erikseen oma käynnistyskäsky. Kuviossa sininen viiva kuvaa yhteistä nopeusviestiä ja oranssi palkki käynnissä olevien puhaltimien määrää. Esimerkkitapauksessa jokainen puhallin antaa 250 kuvitteellisen resurssiyksikön jäähdytyskapasiteetin. Yhteensä jäähdyttimessä on siis 1250 resurssiyksikköä jäähdytyskapasiteettia. Esimerkin ohjausfunktio tehtiin taulukkolaskentaohjelmalla ja on helposti siirrettävissä prototyyppialustalle. Edellä kuvattu rakenne on helposti muunneltavissa sopimaan erilaisiin kokoonpanoihin.



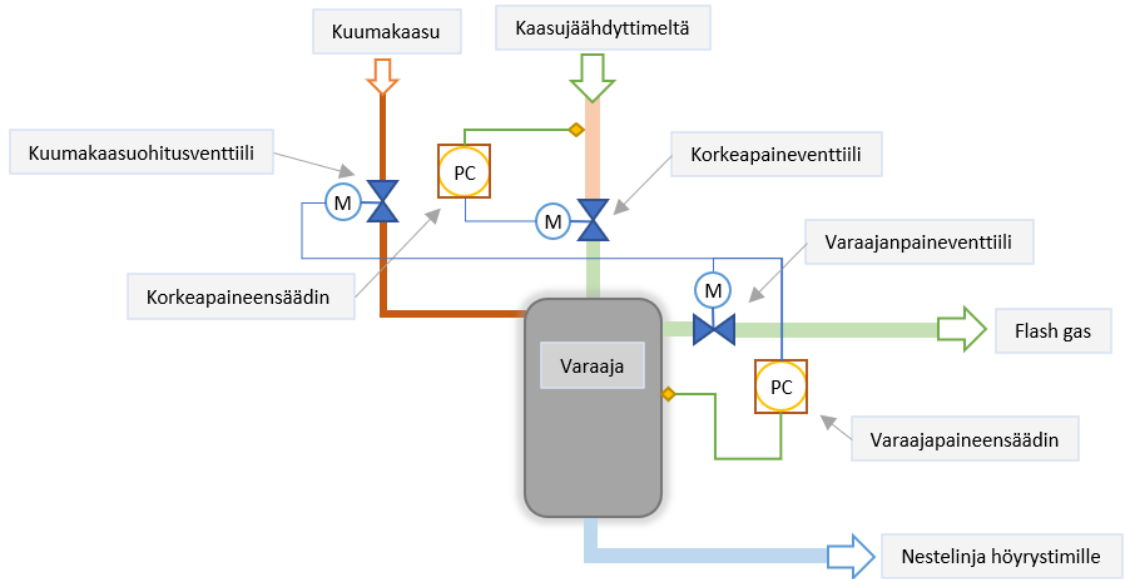
Kuvio 4. Kaasujäähdyttimen puhaltimien ohjaus

4.4 Korkeapaineventtiilin ohjaus

Korkeapaine vaikuttaa koko järjestelmän energiatehokkuuteen sekä kylmän tuotannon hyötysuhteen että lämmöntalteenoton tehokkuuden kautta. Ohjausta tulisi kehittää siihen suuntaan, että kokonaistehokkuutta saataisiin optimoituja automaattisesti esimerkiksi erilaisten käyttö- ja kausivaihteluiden aikana.

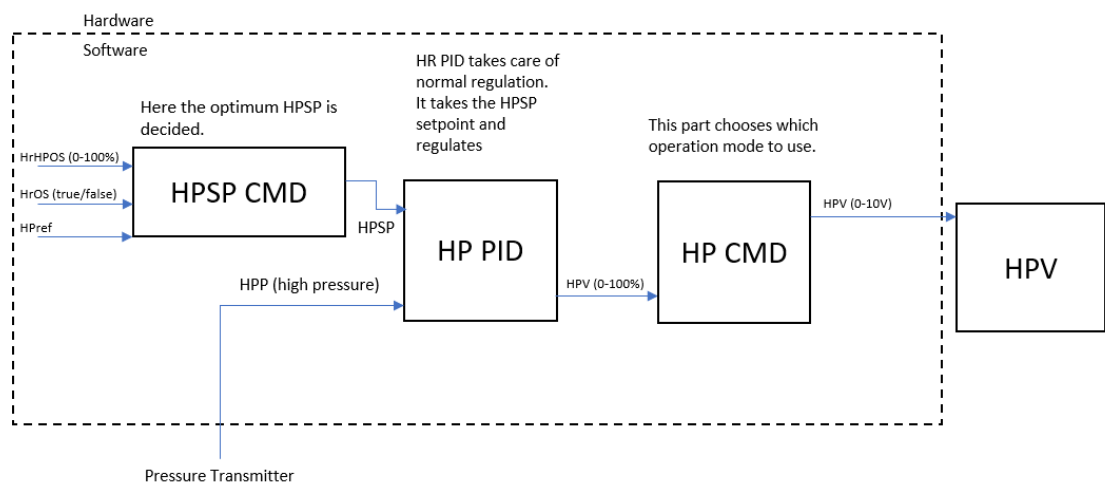
Korkeapaineventtiilillä padotaan painetta kaasujäähdyttimen puolelle. Korkeapaineventtiilin tarkoituksena on pitää paine halutulla tasolla asetusarvossaan. Asetusarvo valitaan järjestelmäkohtaisesti kiinteäksi. Jos lämmöntalteenotto on käytössä, niin korkeapaineen asetusarvo otetaan lämmöntalteenottosäädöltä. Korkeapaineventtiilin avaumaa ohjataan 0-10V ohjaussignaalilla ja korkeapainetta mitataan heti kaasujäähdyttimen jälkeen ennen korkeapaineventtiiliä. Seuraavassa kuvassa 32 on esitetty varaajan ympärillä olevat ohjauksen kannalta tärkeät komponentit. Kuvassa 33 on esitetty ohjauksen rakenne lohkokaaviotasolla.

Korkeapaineventtiilin säätö on käytössä aina, kun järjestelmä on pääkytkimestä käynnissä. Kun järjestelmä sammutetaan pääkytkimestä tai siitä katkaistaan sähkö, täytyy venttiili ajaa kiinni.



Kuva 32. Korkea- ja varaajanpaineventtiilin ohjaus

"HPSP CMD" -lohko päättää korkeapaineen asetusarvon. Jos lämmöntalteenotto on käytössä, poikkeutetaan korkeapaineen asetusarvoa sen mukaan aseteltujen rajojen puitteissa. Muussa tapauksessa pidetään järjestelmälle valittu korkeapaineen asetusarvo vakiona. "HP PID" on korkeapaineensäädön pääsädin, joka pyrkii saamaan korkeapaineen mittausarvon asetusarvoonsa. PID-säädin antaa kapasiteettiviestin "HP CMD" -lohkolle, joka päättää miten venttiiliä säädetään. "HP CMD" säätää korkeapaineventtiiliä 0-10V jännitesignaalilla.

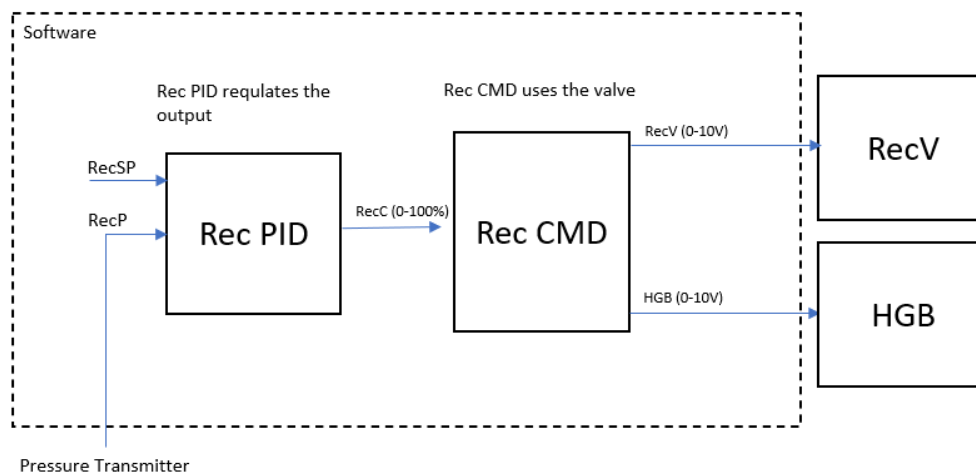


Kuva 33. Korkeapaineen ohjauskaavio

4.5 Varaajapaineventtiilin ohjaus

Varaajapaineventtiilillä ohjataan varaajan painetta. Varaajan paineeseen voidaan vaikuttaa muuttamalla varaajapaineventtiilin avaumaa sekä muuttamalla kuumakaasun ohitusventtiilin avaumaa. Varaajaan virtaa kylmääainetta korkeapaineventtiilin läpi ja sopiva paine säädetään vapauttamalla painetta varaajapaineventtiilillä takaisin kompressorien imuun. Kuumakaasun ohitusventtiilillä voidaan hätätapauksessa nostaa varaajan painetta. Varaajan ohjauksessa arvioitiin olevan hyvin vähän

Seuraavassa kuvassa 34 on esitetty periaatekaavio varaajapaineen ohjaamisesta. ”Rec” on lyhenne englannin kielen sanasta ”receiver”. ”Rec PID” säättää varaajan paineen säädön pyyntiä. Se antaa säätöviestin ”Rec CMD” lohkolle, joka puolestaan käyttää toimilaitteita pyynnin mukaisesti.



Kuva 34. Varaajapaineventtiilin ohjauskaavio

Kuumakaasuohitus, eli HGB (engl. Hot Gas Bypass) kuvassa 34, on liityntä kompressorin jälkeisestä kuumakaasuputkesta venttiilin välityksellä suoraan varaajaan. Venttiili voidaan avata tapauksessa, jossa varaajan paine pääsee esimerkiksi kylmän kelin vuoksi jäähtymään suunniteltua alemmalle tasolle. Tällöin on riski, että paine-ero ei riitä höyrystimen paisuntaventtiilin normaaliin toimintaan. Venttiilin avautumiselle tarvitaan muutettavissa oleva paineraja. Paineraja kuvaa imupaineen ja varaajan paineen välistä eroa. Aseteltavissa olevan viiveen jälkeen venttiili avataan ja palautetaan kiinni paineen palauduttua normaalille tasolle. Kuumakaasuohitus on valinnainen lisätoiminto.

Nesteruiskutusta voidaan käyttää kompressorien jäähdyttämiseen. Nesteruiskutuksessa varaajan pohjasta otetaan nestettä ja se päästetään magneettiventtiilillä

kompressoriryhmän imulinjaan. Kuumakaasun ollessa ylitse aseteltavissa olevan rajan aletaan nesteruiskutusventtiiliä avaamaan pulssinleveysmoduloidulla signaalilla. Pulssinleveyttä kasvatetaan lineaarisesti kuumakaasun lämmitessä aseteltavissa olevaan ylärajaan asti. Toiminto tarvitsee ohjelmoitavan aloitusviiveen.

4.6 Ohjausten kehittämisen motivaatio

Eri osa-alueiden ohjausten kehittäminen ei ole keskenään yhtä tärkeää. Toisissa toiminnoissa on huomattavaa kehityspotentiaalia ja toiset ovat ainoastaan järjestelmän perustoimintojen ylläpitämistä. Seuraavassa taulukossa 2 on koottu työssä esitettyjen yksityiskohtien perusteella arvio eri ohjauskokonaisuuksien kehitysmahdollisuuksista.

Taulukko 2. Ohjausten kehittämisen motivaatio

Osa-alue	Huomiot	Kehitysmotivaatio
Lämmöntalteenotto	<ul style="list-style-type: none"> - Eniten potentiaalia - Suora hyöty asiakkaalle - Energiatehokkuuden parantaminen 	Korkea
Kaasujäähdytin	<ul style="list-style-type: none"> - Toimii yhdessä lämmön talteenoton kanssa - Kaasujäähdyttimen ohitus lämmöntalteenoton tehostamiseksi - Yksinkertainen toteuttaa 	Korkea
Korkeapaine	<ul style="list-style-type: none"> - Toimii myös yhdessä lämmön talteenoton kanssa - Paineen hallinnan ohjaus yksinkertaista - Paineen hallinnalla vaikutus koko järjestelmään 	Keskiverto
Varaajan paine	<ul style="list-style-type: none"> - Järjestelmän perustoiminto - Ei merkittävää parantamisen potentiaalia 	Matala
Kompressorit	<ul style="list-style-type: none"> - Mahdollisesti monimutkaisin ohjaus (paljon erilaisia kokoonpanoja) - Ei merkittävää parantamisen potentiaalia 	Matala

Ohjausten kehityksessä suurin motivaatio on selvästi lämmöntalteenoton ja sen toimintojen säätämässä. Kaasujäähdyttimen säätö sekä korkeapaineen säätö ovat tähän oleellisesti kytköksissä. Korkeapaineen säädöstä kylmäkertoimen optimoimiseksi löytyy useita tutkimuksia [20][21][22]. Hill Phoenixille on myös 2020 myönnetty patentti korkeapaineen säätöön kylmäkertoimen optimoimiseksi kaasujäähdyttimen ulostulolämpötilaa hyödyntäen [23]. Lämmöntalteenotto yhdistettynä korkeapaineen säätöön on erittäin potentiaalinen kehityskohde.

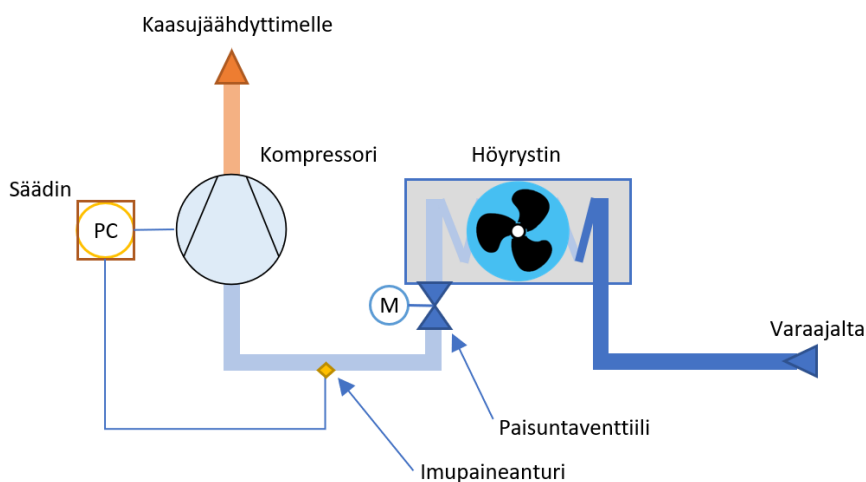
5. OHJELMISTO- JA SUORITUSKYKY

Alustan valintaan vaikuttaa merkittävästi, millaisella näytteenottotaajuudella mittauksia tarvitaan sekä kuinka nopea ja tasainen ohjelman suoritusajan tulee olla. Tässä kappaleessa on esitetty arvio tarvittavasta näytteenottotaajuudesta ja suoritusajasta. Ensin tehtiin teoreettinen analysointi olemassa olevan mittausdatan perusteella. Tämän jälkeen tehtiin kokeellinen analyysi nykyisen ohjausjärjestelmän suorituskyvystä. Koska nykyinen järjestelmä suoriutuu suorituskykynsä perusteella ongelmitta suurimmasta osasta erilaisia järjestelmiä, voidaan sitä pitää referenssinä uusien vaatimusten määrittämisessä.

5.1 Näytteenottotaajuus

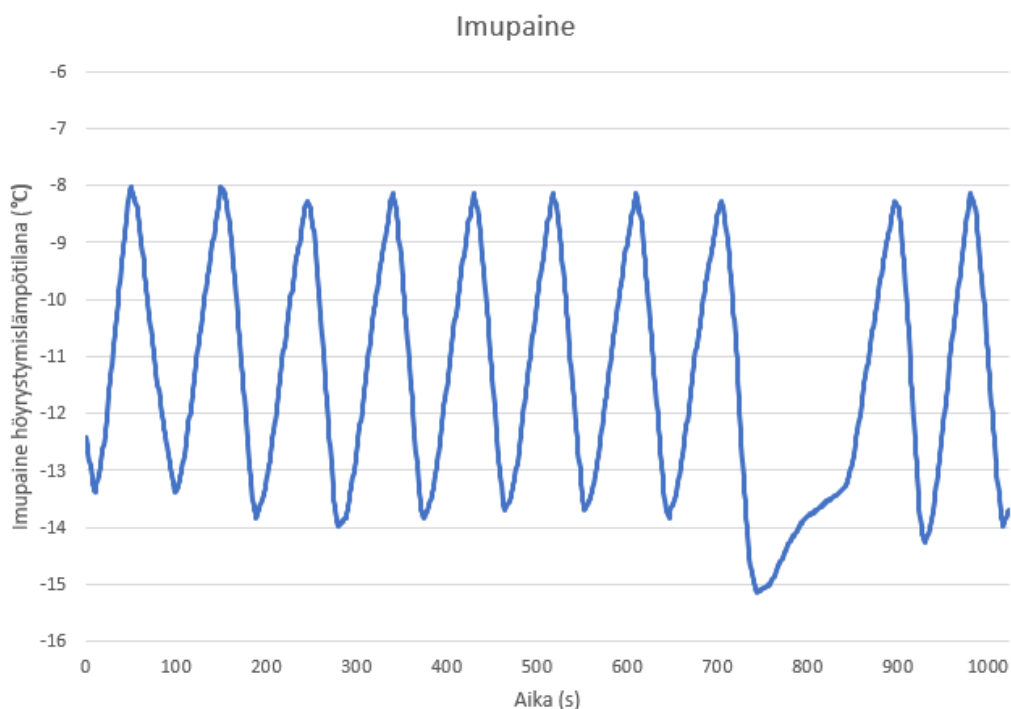
Näytteenottotaajuuden tiheyden vaatimus päätettiin tehdä analysoimalla eräästä jäähdytysjärjestelmästä sen kompressorin imupainetta. Mittausarvosta otetaan olemassa olevalla tiedonkeruulaitteistolla sopiva näyte ja siitä tehdään Fast Fourier Transformation (FFT) – analyysi. Esimerkkijärjestelmäksi valittiin eräs suurtalouskeittiö, jossa yksittäistä höyrystintä käytetään yhdellä kompressorilla puolihhermeettisellä mäntäkompressorilla. Tämä sopi esimerkkijärjestelmäksi, koska sen painetasot vaihtelevat erittäin nopeasti.

Seuraavassa kuvassa 35 on esitetty esimerkkijärjestelmän rakenne. Järjestelmä sisältää yhden taajuusohjatun kompressorin, joka pyrkii ylläpitämään imupainetta asetusravossa.



Kuva 35. Esimerkkijärjestelmä

Kuvan järjestelmän imupaineanturi sijaitsee kompressorin imuputkessa. Imuputken tilavuus on suhteellisen pieni ja sitä kautta prosessi suhteellisen nopea. Kompressorin nopeutta ohjaavalta säätimeltä vaaditaan nopeaa reagointikykyä, jotta imupaine pysyisi mahdollisimman tasaisena ja kompressorin käyntiä katkottaisiin mahdollisimman vähän. Seuraavassa kuvassa 36 on esitetty järjestelmään imupaineesta otettu näyte. Näyte otettiin hetkeltä, jossa höyrystimellä oli kuormitustilanne. Tässä tilanteessa kompressorin imupaine huojuu huomattavasti. Kuvan näyte on otettu 1 sekunnin näytteenottovälillä.

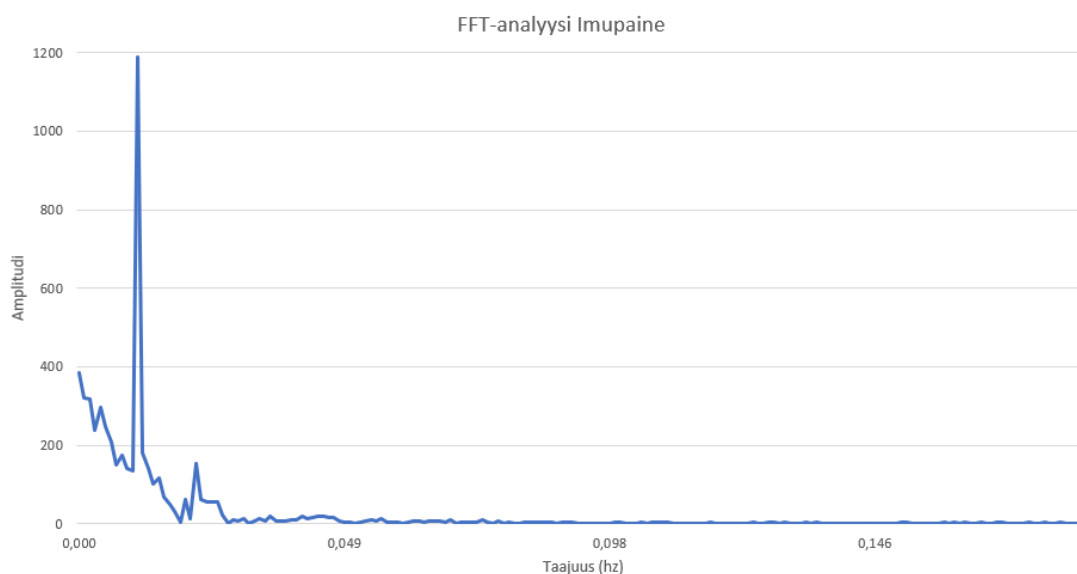


Kuva 36. Esimerkkijärjestelmän imupaine

Yhden sekunnin mittausintervalli aiheuttaa rajoitteensa analysointiin. Tällöin mittaustaajuus on 1 Hz ja Nyquistin teoreeman mukaan suurin ilman laskostumista havaittava taajuus on 0,5 Hz. Kuvan 36 mittausnäyte otettiin ulos tiedonkeruulaitteiston tietokannasta ja siitä tehtiin Excelissä FFT analyysi Excelin Fourier Analyysi -työkalulla. Tulokseksi saatiin kuvan 37 mukainen tulos. Ensin FFT analyysin tuottamien amplitudivektoreiden pituudet laskettiin ja niille asetettiin mittausvälin mukaiset taajuusportaavat. Viimeisenä tuloksista poistettiin DC komponentti. Lopputuloksesta luotu kuvaaja on esitetty kuvassa 37.

Tuloksesta nähdään, että prosessin 1024 mittauksen näyte sisältää hyvin matalia taajuuksia. Eniten näyte sisältää alle 0,05 Hz taajuuksia. Suurin taajuussisältö oli odotetusti noin 0,01 Hz kohdalla. Tämä voitiin nähdä helposti jo kuvasta 36, sillä suurimman jaksottaisen vaihtelun jaksonaika on silmämääräisesti noin 100 s. Seuraava

piikki taajuussisällöstä löytyy noin 0,02 Hz kohdalta. 0,05 Hz yläpuolella yksittäisten taajuuskomponenttien osuus verrattuna 0,01 Hz taajuuteen on alle 1 %. 0,1 Hz yläpuolella enää noin 0,1–0,2 %.



Kuva 37. FFT analyysi imupainenäytteestä

Nyquistin teoreeman mukaan mitattavan signaalin taajuuteen verrattuna tarvitaan kaksinkertainen näytteenottotaajuus, jotta signaali ei ala laskostua. Jos edellä kuvatusta FFT analyysistä sanottaisiin korkeimman ohjaukselle merkityksellisen taajuuden olevan n. 0,1 Hz, riittäisi näytteenottotaajuudeksi noin 0,2 Hz eli näyte 5 sekunnin välein. Tämä olisi kuitenkin teoreettinen minimivaatimus ja näytteitä kannattaa ottaa tätä nopeammin, jotta ohjauksesta saadaan mahdollisimman hyvä. Minimivaatimuksena voitaisiin pitää esimerkiksi 2 sekunnin mittaus- ja ulostulon päivitysintervallia.

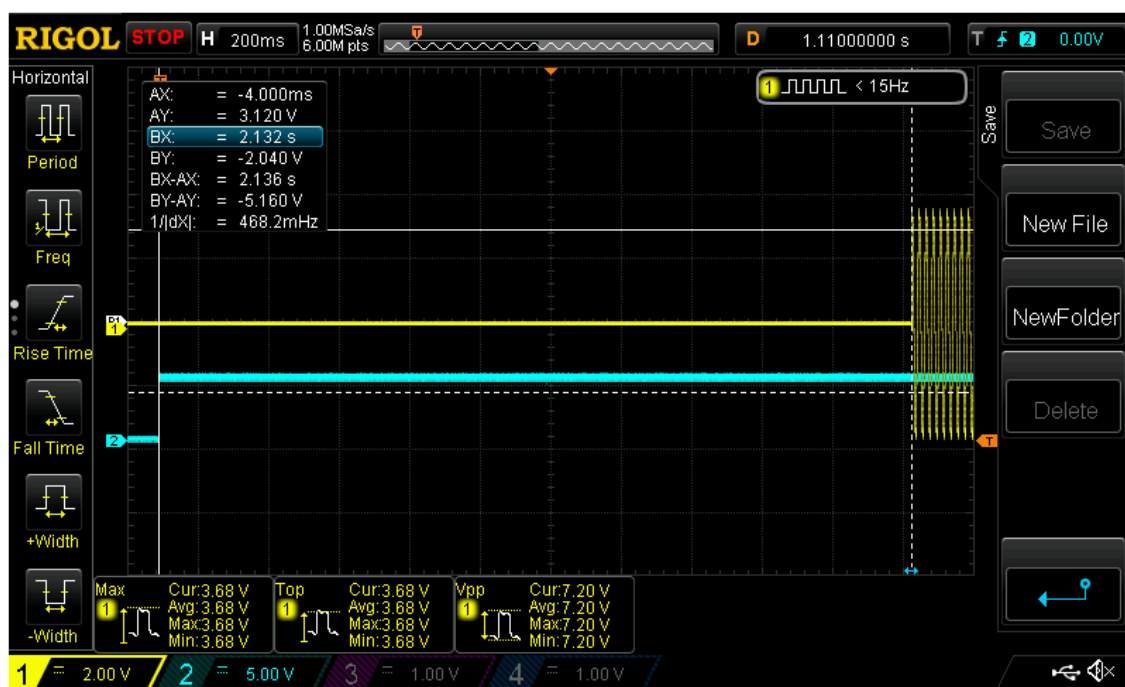
5.2 Nykyisen alustan reagointinopeus

Nykyisissä Huurteen jäähdytysyksiköissä käytetään pääasiassa Danfossin jäähdytysyksikkösäätimiä. Tätä projektia varten testipenkkiin kytkettiin AK-PC 782A- ja Carel pRack 300T -säätimet. AK-PC 782A on tämän työn kirjoitushetkellä Danfossin malliston kehittynein jäähdytysyksikkösäädin ja sopii siksi hyvin referenssiksi suorituskyvyn ja nopeuden tarkastelussa. PRack 300T valittiin testiin, koska sitä on käytetty muutamissa Huurteen yksiköissä. Säätimet kytkettiin testipenkkiin, ne konfiguroitiin ohjaamaan yksinkertaista kuviteltua yksikköä, jossa on korkeapaineensäätö, varaajanpaineensäätö, kaasujäähdyttimen ohjaus ja kompressoriryhmän ohjaus.

Suoritetun testin tarkoitus oli mitata, kuinka nopeasti nykyiset säätimet reagoivat esimerkiksi liian korkeaan kompressorin ulostulopaineeseen. Huurteen yksiköissä käytetään säätimien lisäksi fyysisiä turvalaitteita, kuten tähän tilanteeseen sopiva korkeapaineen pressostaatti, mutta säätimissä on myös omat rajat, joiden pitäisi katkaista kompressorin käynti, kun asetettu paineraja ylittyy. Testaamalla katkaisurajojen toimintaa pyrittiin saamaan karkea kuva, kuinka luotettavasti säätimen turvarajat toimivat.

Ensin testattiin pRack 300T. PRack oli kytketty säädinvalmistajalta hankittuun testikeskukseen. Testikeskus sisältää painonapit digitaalisten tulojen simulointiin ja ledit digitaalisten lähtöjen simulointiin. Analogisia tuloja simuloidaan keskuksessa olevilla kääntökytkimillä, jotka luovat säätimelle analogisen virtaviestin tai jännitesignaalin simuloiden näin mittalaitteita. Analogisten lähtöjen tila oli esitetty pienillä näytöillä.

Säätimen korkeapainekatkaisun digitaaliseen sisääntuloon kytkettiin Rigol DS1054 oskilloskoopin toinen kanava. Toinen kanava kytkettiin kompressorin käyntireleeseen. Seuraavassa kuvassa 38 on esitetty kuvankaappaus ensimmäisestä korkeapainekatkaisun mittauksesta.



Kuva 38. PRack 300T korkeapainekatkaisu

Alemmassa sinisessä signaalissa näemme sisääntuloon kytketyn napin painalluksen tuottaman 5 V jännitteen ja sen nousureunan. Ylempi keltainen signaali esittää lähtöreleen yli olevaa kytkentää. Kun rele aukeaa, ilmestyy oskilloskooppikuvaan 50hz

häiriö. Nappulan painalluksen ja katkaisun välinen viive mitattiin oskilloskoopin kursoritoiminnolla. Mittauksessa saatiin seuraavat taulukon 3 tulokset viiden mittauksen sarjassa.

Taulukko 3. Prack 300T katkaisuviive

Mittaus	Katkaisuviive
1	2.1 s
2	1.8 s
3	2.1 s
4	1.1 s
5	1.9 s

Seuraavaksi testattiin Danfossin AK-PC 782A vastaavalla mittaustavalla. AK-PC 782A varten rakennettiin pieni mittauskeskus, jossa AK-PC 782A analogisia ja digitaalisia sisääntuloja syötettiin Carel c.pCOe IO-moduulilla. Rigol oskilloskooppi kytkettiin AK-PC 782A säätimen lähtöihin ja tuloihin vastaavasti kuin edellisessä mittaussarjassa Carelin pRack 300T:n kanssa. Danfossin säätimestä saatiin seuraavat taulukon 4 tulokset.

Taulukko 4. AK-PC 782A katkaisuviive

Mittaus	Katkaisuviive
1	2,9 s
2	3,0 s
3	1,7 s
4	2,6 s
5	1,9 s

Tuloksista nähdään, että katkaisuviiveissä on huomattava hajonta. Näin lyhyestä mittaussarjastakin nähdään jo, että viiveen ero voi todennäköisesti olla molemmissa säätimissä jopa useita sekunteja. Tähän voi vaikuttaa usea asia, kuten säätimen ADC- ja DAC-muuntimien käyttötapa sekä kuinka säätimen mikroprosessorin ohjelma on rakennettu. Tuloksista voidaan arvioida, että säätimen ohjelman rakentamisessa ei ole

mahdollisesti erityisesti pyritty saamaan säätimen ohjauksen ohjelmakiertoa intervalliltaan tasaiseksi ja reaaliaikaiseksi.

Edellä esitetyt suorituskyvyn tarpeen arviot eivät pysty antamaan täysin yksiselitteistä mittaria tarvitusta suorituskyvystä. Niistä voidaan kuitenkin arvioida alustava suunta sille, millaista alustaa ohjaus tarvitsee. Jäähdytysyksikön prosessit ovat teollisuuden vaativimpiin prosesseihin verrattuna kohtuullisen hitaita ja niitä ohjaavien säätimien ei tarvitse kyetä millisekuntien vasteaikoihin. Edellä esitettyjen tutkimusten ja mittausten perusteella asetetaan mittaus- ja ohjauslähtöjen analogiaviestien päivityksen sekä ohjausfunktioiden suorituksen intervalliksi vähintään 1 sekunti. Mahdolliset myöhemmin lisättävät toiminnot, kuten paikallinen käyttöliittymä ja sen isännöinti eivät saa heikentää asetettua 1 sekunnin vaatimusta.

6. YHTEENVETO

Tässä työssä koottiin yhteen teokseen jäähdytysyksikön toimintaan liittyvää teoriaa sekä vaatimuksia ohjauksen näkökulmasta. Työn on tarkoitus toimia lähtökohtana tulevalle säädinprototyypin valmistukselle ja jatkokehitykselle. Työ antaa kattavan kuvan jäähdytysyksikön toiminnasta ja siitä, miten hiilidioksidin käyttö kylmäaineena tulee huomioida ohjauksen rakentamisessa. Työssä määritettiin tarvittavien IO-pisteiden tyypit ja niiden erityisvaatimukset. Lisäksi työssä arvioitiin teoriassa, kuinka suorituskykyinen säädinalustan tulisi vähintään olla.

Tärkeimmäksi osa-alueeksi voidaan katsoa lämmöntalteenoton toteutus. Projektin aikana siinä arvioitiin olevan eniten lisäarvon tuottamisen mahdollisuuksia. Lämmöntalteenotolla on erityisesti kylmissä maissa suuri vaikutus järjestelmän kokonaistehokkuuteen. Jäähdytysyksikön kaasujäähdyttimen painetta muuttamalla voidaan vaikuttaa sekä jäähdytyksen että lämmöntuoton tehokkuuteen. Optimaalinen tasapaino lämmöntalteenoton ja kylmän tuotannon välillä tulee arvioida tapauskohtaisesti, koska järjestelmien ominaisuudet ja lämmönkäytön kohteet eroavat huomattavasti toteutuksesta riippuen. Ohjausfunktioiden ja toimintojen tuleekin olla monipuolisia ja säädettäviä, jotta niitä voidaan käytössä soveltaa erilaisissa tilanteissa. Työssä esitelty tapa mahdollistaa yksinkertaisen ja laajennettavissa olevan tavan toteuttaa useita sarjassa olevia lämmöntalteenottopeirejä.

Säädinalustan suorituskyvyn tulee vastata asetettuja vaatimuksia. Sen pitää kyetä noin sekunnin mittaus- ja ohjaus -intervalliin ja lisäksi säätimen tulee pystyä kommunikoimaan taustajärjestelmien kanssa määrättyillä rajapinnoilla. Säädinalustaksi voidaan valita esimerkiksi moderni PLC-logiikka, josta tarpeelliset ominaisuudet löytyvät. Useilta eri valmistajilta löytyy tarkoitukseen sopivia PLC-logiikoita, joihin saa tarpeelliset IO-kortit. Prototyypin ohjelmoinnissa tulee huomioida ohjelman modulaarisuus ja se, että ohjelma pysyy rakenteellisesti helposti ymmärrettävänä.

Projekti jatkuu uuden jäähdytysyksikkösarjan kehityksen mukana. Ensimmäisessä versiossa yksikön perustoiminnot, kuten kompressorit, korkeapaine ja varaajan paine, hoidetaan edullisella ja yksinkertaisella valmiilla kolmannen osapuolen säätimellä, josta löytyy tarvittavat rajapinnat ja toiminnot. Tähän tuodaan rinnalle Huurteen jo aiemmin käyttämällä Niagara JACE 8000 teollisuustietokoneella ohjaukset lämmöntalteenotolle, kaasujäähdyttimelle, korkeapaineen korotukselle, nesteruiskutukselle ja muille lisätoiminnoille. JACE 8000 mahdollistaa myös integroinnin olemassa oleviin

taustajärjestelmiin ja tuo mahdollisuuden paikallisen käyttöliittymän luomiselle. Tällä tavalla päästään keskittymään niiden toimintojen kehittämiseen, joista saadaan eniten lisäarvoa asiakkaalle.

7. LÄHTEET

- [1] E. Kaappola, A. Hirvelä, M. Jokela, ja J. Kianta, Kylmätekniiikan Perusteet, Opetushallitus, Helsinki, 2011, 264 s.
- [2] A.Aittomäki, E.Aalto, T.Alijoki, P.Hakala, A.Hirvelä, E.Kaappola, J.Mentula, A.Seinelä, Kylmätekniiikka, 3. Painos, Gummerus Kirjapaino Oy, Helsinki, 2008, 406 s.
- [3] Refrigeration Handbook, SWEP, Saatavissa (viitattu 25.2.2021):
<https://www.swep.net/refrigerant-handbook/refrigerant-handbook/>
- [4] Simple one-stage CO₂. Saatavissa (viitattu 10.5.2021):
<https://www.ipu.dk/products/simple-one-stage-co2/>
- [5] S. K. Wang, Handbook of air conditioning and refrigeration, 2. Painos, McGraw-Hill, 1994, 1401s.
- [6] A.Padalkar, A.Kadam, Carbon Dioxide as Natural Refrigerant, Sinhgad College of Engineering, Mechanical Engineering Department, Integrated Publishing Association , 2010, 12 s.
- [7] Petrucci, General Chemistry, Phase Diagrams, Saatavissa (viitattu 3.4.2021):
<https://chem.libretexts.org/@go/page/24249>
- [8] Capacity controller for transcritical CO₂ booster control AK-PC 782A, User Guide, Danfoss, 2017, 136 s. Saatavissa (viitattu 19.2.2021):
<https://assets.danfoss.com/documents/56168/BC245386497365en-000201.pdf>
- [9] P. Nekså, H. T. Walnum, A. Hafner, Co₂ - a refrigerant from the past with prospects of being one of the main refrigerants in the future, SINTEF Energy Research, Trondheim, 2010, 12 s.
- [10] Open drive reciprocating compressors. Saatavissa (viitattu 12.5.2021):
https://www.bitzer.de/shared_media/documentation/kp-520-3.pdf?P=/doc/&N=kp-520-3.pdf&utm_source=BitzerSW&utm_campaign=pdf&utm_medium=Verweis.
- [11] Maneurop reciprocating compressors MT / MTZ. Saatavissa (viitattu 12.5.2021):
https://assets.danfoss.com/documents/89760/AB196386425654en-001201.pdf?_ga=2.78059857.493452735.1620843106-528301738.1620843106.

- [12] Alfa-V ACV/ANV/VXD Instruction manual, Alfa LU-VE, 2019, 20 s. Saatavissa (viitattu 9.4.2021): https://alfa.luvegroup.com/media/docs/22/ahe00052_en.pdf
- [13] Heat Reclaim in Transcritical CO₂ Systems, Application Guide, Danfoss, 2015, 6 s. Saatavissa (viitattu 11.3.2021): <https://assets.danfoss.com/documents/89664/AB167786419087en-000101.pdf>
- [14] The theory behind heat transfer - Plate heat exchangers, Alfa Laval, 2004, 12 s, Saatavissa (viitattu 9.4.2021): https://www.alfalaval.com/globalassets/documents/microsites/heating-and-cooling-hub/alfa_laval_heating_and_cooling_hub_the_theory_behind_heat_transfer.pdf
- [15] CO₂ Transcritical Systems Training Manual, Hussman, Revision 1, 2018, 42 s. Saatavissa (viitattu 26.3.2021): https://www.hussmann.com/ns/Technical-Documents/CO2_Transcritical_Systems_Training_Manual_042718.pdf
- [16] W. Nawrocki, Measurement systems and sensors, Artech House, 2. Painos, 2016, 440 s.
- [17] S. Sarkar, Platinum RTD sensor based multi-channel high-precision temperature measurement system for temperature range -100°C to $+100^{\circ}\text{C}$ using single quartic function, Cogent Engineering, Taylor & Francis, 2018, 16 s. Saatavissa (viitattu 5.3.2021): https://www.researchgate.net/publication/330248286_Platinum_RTD_sensor_based_multi-channel_high-precision_temperature_measurement_system_for_temperature_range_-100C_to_100C_using_single_quartic_function
- [18] Danfoss Finland Product Store, Saatavissa (viitattu 9.4.2021): <https://store.danfoss.com/fi/>
- [19] iSMA-B-4TO-H-IP, Product Page, Innon Energy LTD. Saatavissa (viitattu 22.4.2021): https://www.innon.com/products/isma-b-4to-h-ip?_pos=7&_sid=34a32b57b&_ss=r
- [20] Y. Chen ja J. Gu, The optimum high pressure for CO₂ transcritical refrigeration systems with internal heat exchangers, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Carleton University, Ottawa, 2005, 12 s.
- [21] L. Yang, H. Li, S. Cai, L. Shao, C. Zhang, Minimizing COP loss from optimal high pressure correlation for transcritical CO₂ cycle, Institute of Refrigeration and Cryogenics, School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai, 2015, 7 s. Saatavissa (viitattu 9.4.2021): www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431115005773

- [22] L. Cecchinato, M. Corradi, G. Cosi, S. Minetto, ja M. Rampazzo, A real-time algorithm for the determination of R744 systems optimal high pressure, Dipartimento di Fisica Tecnica, Universita` di Padova, via Venezia, 2015, 10 s. Saatavissa (viitattu 9.4.2021): www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140700712000060
- [23] N. Krishnamoorthy, N. Khaled, Co2 refrigeration system with high pressure valve control based on coefficient of performance, 2020, Saatavissa (viitattu 9.4.2021): <https://patents.justia.com/patent/20200033039>