

Janne Leinonen

CO₂-KYLMÄKONEEN KÄYTTÖÖNOTTO JA KOEKÄYTTÖ

CO₂-KYLMÄKONEEN KÄYTTÖÖNOTTO JA KOEKÄYTTÖ

Janne Leinonen

Opinnäytetyö

Kevät 2019

Talotekniikan tutkinto-ohjelma

Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Talotekniikka

Tekijä: Janne Leinonen

Opinnäytetyön nimi suomeksi: CO₂-kylmäkoneen käyttöönotto ja koekäyttö

Opinnäytetyön nimi englanniksi: Introduction and Trial Run of CO₂ Refrigeration Unit

Työn ohjaaja: Mikko Niskala

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2019

Sivumäärä: 47 + 4 liitettä

Työssä käyttöönotettiin ja koeajettiin hiilidioksidia kylmäaineena käyttävä kylmäkone. Työn tavoitteena oli saattaa oppimisympäristöksi rakennettu kylmäkone toimintakuntoon, koekäyttää konetta erilaisilla säädöillä ja luoda koneen käytöstä laboratorioharjoitus Oulun ammattikorkeakoulun opiskelijoiden käyttöön.

Kylmäkoneen valmistuttua siihen tehtiin tiiviyskoe, jonka jälkeen laitteisto tyhjiöitiin asianmukaisesti. Laitteiston kylmäainetäytös määritettiin ja laitos täytettiin. Koneita käytettiin erilaisilla kierrosluvuilla, paineilla ja lämpötiloilla sekä havainnointiin erilaisten säätöjen vaikutuksia kylmäprosessiin.

Koneen käyttöönotto viimeisteli pitkän prosessin, jonka tuloksena valmistui kokoluokassaan ainutlaatuinen hiilidioksidilla toimiva kylmälaite. Laitteesta paikallistettiin ja korjattiin vikoja sekä varmistuttiin sen turvallisuudesta ja soveltuvuudesta opetuskäyttöön. Koekäyttöjen yhteydessä myös laitteen käyttöä ohjaava opettaja sai perehdytyksen ja hyödyllistä tietoa koneen toiminnasta ja säätämisestä. Laitteen käytöstä laadittiin harjoitustehtävä, jonka avulla tulevat opiskelijat perehtyvät hiilidioksidilaitoksen toimintaan.

Asiasanat: kylmätekniikka, hiilidioksidi, CO₂, bypass, ylikriittinen

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
SISÄLLYS	4
SANASTO	6
1 JOHDANTO	7
2 ASETUKSET	8
2.1 F-kaasuasetus	8
2.2 Painelaitedirektiivi	9
2.2.1 Loppukoe	12
2.2.2 Paine-koe	13
3 HIILIDIOKSIDIKONEIKOT	14
3.1 Hiilidioksidi kylmäaineena	14
3.2 Bypass-koneikon toiminta	17
3.3 Kylmälaitteen tyhjiöinti	18
3.4 Kylmäaineen täyttö	19
3.5 Käyttöönnoton yleisiä huomioita	21
4 LABORATORION KYLMÄKONE	23
4.1 Lämpökuorma ja taajuusmuuttaja	23
4.2 Kaasun jäähdyttäminen	24
4.3 Varolaitteet	26
5 KONEEN SUORITUSARVOT	29
5.1 Putkiston mitoitus ohjelmalla	29
5.2 CCMT 2 -paisuntaventtiili, tulistuksensäädin	32
5.3 Vakiopainesäätimet	33
5.4 Kompressori	35
5.5 Kaasunjäähdytin	36
6 LAITE OPETUSKÄYTÖSSÄ	39
6.1 Laboratorioharjoitus	39
6.2 Muut sovellutukset	40
6.2.1 Kaasunjäähdyttämisen vaikutus	40
6.2.2 Kaasunjäähdyttimen paineen vaikutus	41
6.2.3 Nestesäiliön paineen vaikutus	42

6.3 Simple CO ₂ -ohjelma	43
7 YHTEENVETO	45
LÄHTEET	46
Liite 1 Kaasunjähdyttimen ja höyrytimen mitoitus	
Liite 2 Putkiston mitoitus Cool selector 2 -ohjelmalla	
Liite 3 Kompressorin mitoitus Bitzerin valintaohjelmalla	
Liite 4 Kaasunjähdyttämisen vaikutus	

SANASTO

CFC-yhdiste	(chloro-fluoro-carbon) kloorifluorihilivety, jota kutsutaan freoniksi, on kloorin, fluorin ja hiilen yhdiste (1). CFC-yhdisteet tuhoavat otsonikerrosta ja ovat voimakkaita kasvihuonekaasuja.
GWP-arvo	(global warming potential) kuvaa kasvihuonekaasun lämmitysvaikutusta suhteessa hiilidioksidin lämmitysvaikutukseen (2, s. 3).
HCFC-yhdiste	(hydro-chloro-fluoro-carbon) osittain halogenoitu hiilivety on kloorin, fluorin, hiilen ja vedyn yhdiste (1). HCFC-yhdisteet eivät ole otsonikerrokselle yhtä haitallisia kuin CFC-yhdisteet mutta ovat kuitenkin voimakkaita kasvihuonekaasuja.
HFC-yhdiste	(hydro-fluoro-carbon) osittain halogenoitu fluorihilivety, jota kutsutaan f-kaasuksi, on vedyn, fluorin ja hiilen yhdiste (1). HFC-yhdisteiden ODP-luku on nolla, eli ne eivät tuhoa otsonikerrosta, mutta ovat silti voimakkaita kasvihuonekaasuja. Reagoidessaan kloorin tai bromin kanssa muuttuvat otsonikerrokselle haitallisiksi.
Hiilidioksidiekvivalenttitonni	kasvihuonekaasun määrä esitettynä tuhansina kiloina ilmoitetun kaasun massan ja sen GWP-arvon tulona (2, s. 3).
ODP-luku	(ozone depleting potential) kuvaa kylmäaineen suhteellista otsonihaitallisuutta asteikolla 0,0–1,0 (3, s. 2)
PFC-yhdiste	(per-fluoro-carbon) täysin halogenoitu hilivety on fluorin ja hiilen yhdiste. PFC-yhdisteiden ODP-luku on nolla, eli ne eivät tuhoa otsonikerrosta mutta ovat silti voimakkaita kasvihuonekaasuja.

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön tavoitteena on saattaa oppimisympäristöksi rakennettu, hiilidioksidia kylmäaineena käyttävä kylmäkone toimintakuntoon. Laitoksen komponentit on valittu ja putkistot mitoitettu aiemmin sekä koottu suunnitelmien mukaiseksi laitteistoksi. Tarkoituksena on pohtia kylmäaineen täytössä olevia haasteita perinteisempiin kylmäaineisiin verrattuna, tehdä laitteistolle testiajoja erilaisilla parametreilla sekä virittää laitteisto toimimaan turvallisesti opetuskäytössä. Työssä kehitetään myös kylmälaitteen toimintaan ja suoritusarvoihin perehdyttävä laboratorioharjoitus tulevien vuosikurssien opiskelijoiden käyttöön.

Työhön oman haasteensa tuo laitteiston ainutkertaisuus. Koneikko on suunniteltu pienimillä saatavissa olevilla komponenteilla. Hiilidioksidia käytetään nykyisin teollisuuden ja kaupan kylmälaitteissa, joissa on suuret kylmätehot ja näin ollen saatavissa olevien komponenttien toimivuus pienessä laitteistossa on varmistettava. Laitteiston toimintaan vaikuttavien ja sen toimintaa mittaavien laitteiden testaaminen ja toiminnan varmistaminen kuuluu olennaisena osana käyttöönottoprosessiin.

Kylmäaineiden ympäristövaikutukset ovat puhuttaneet ihmisiä otsonikadon ja kasvihuoneilmaston voimistumisen takia. Otsonikatoa aiheuttavien CFC- ja HCFC-kylmäainetta sisältävien laitteiden maahantuonti sekä kylmäaineeseen liittyvä huolto on kielletty asteittain vuoteen 2015 mennessä (4). Nykyisin yleisesti käytössä olevien HFC-kylmäaineiden ODP-luku on nolla, mutta ne ovat voimakkaita kasvihuonekaasuja. Kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi myös näille kylmäaineille pyritään kehittämään vaihtoehtoja ja niiden käyttö kielletään asteittain. Hiilidioksidia on käytetty kylmäaineena ennen CFC-yhdisteiden yleistymistä ja nyt sen käyttöön ollaan siirtymässä uudelleen alhaisten kasvihuonekaasupäästöjen, palamattomuuden ja vähäisen myrkyllisyyden vuoksi.

Työn tilaajan, Oulun ammattikorkeakoulun, kylmätekniikan opetus on kiitettävällä tasolla ja tämän uuden oppimisympäristön opetuskäyttöön saattaminen edesauttaa opetuksen pysymistä mukana alan kehityksessä.

2 ASETUKSET

2.1 F-kaasuasetus

Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EU) N:o 517/2014 on tällä hetkellä voimassa oleva asetus fluoratuista kasvihuonekaasuista eli HFC- ja PFC-kylmäaineista. Asetuksessa määritetään toimenpiteet, kiellot ja rajoitukset, joiden avulla pyritään vähentämään kehittyneiden maiden kasvihuonekaasupäästöjä. Päästöjä tulisi vähentää vuoteen 1990 verrattuna vähintään 80 prosenttia vuoteen 2050 mennessä, jotta välttyttäisiin haitallisilta ilmastovaikutuksilta. (5, s. L 150/195.)

Ajankohtaisin muutos koskee kylmäaineita, joiden GWP-luku on vähintään 2500. Niiden käyttö laitteistoissa, joiden täytös on vähintään 40 hiilidioksidiekvivalenttitonnia, kielletään 1.1.2020. (5, s. L 150/209.) R404A-kylmäaineella täytös vastaa noin 10,2 kg:aa (taulukko 1). Kielto ei kuitenkaan koske kierrätettyä kylmäainetta eli ainetta, joka on otettu talteen jostain toisesta laitteesta.

TAULUKKO 1. 40 hiilidioksidiekvivalenttitonnin täytösmäärä kylmäaineille, joiden GWP-luku on yli 2500 (3, s.9)

Kylmäaine	GWP-arvo	40 tonnia CO ₂ -ekv. (kg)
R23	14800	2,7
R125	3500	11,4
R404A	3922	10,2
R422A	3143	12,7
R422D	2729	14,7
R428A	3607	11,1
R434A	3245	12,3
R507	3985	10,0
R508A	13214	3,03
R508B	13396	2,99

Asetuksessa on määritelty kiintiöt fluorihilivetyjen saattamisesta markkinoille. Kiintiöt määritetään prosenttiosuuksina vuosien 2009–2012 aikana Euroopan

unionissa markkinoille saatettujen kaasumäärien vuotuisesta keskiarvosta. (5, s. L 150/225.) Kiintiöt laskevat säännöllisesti, mikä näkyy jo nyt F-kaasujen hinnoissa. Kylmäaineiden hintojen nousu ja saatavuuden heikkeneminen ohjaavat laitteistojen omistajia muuttamaan järjestelmiään toimimaan ympäristöystävällisemmällä kylmäaineilla.

2.2 Painelaitedirektiivi

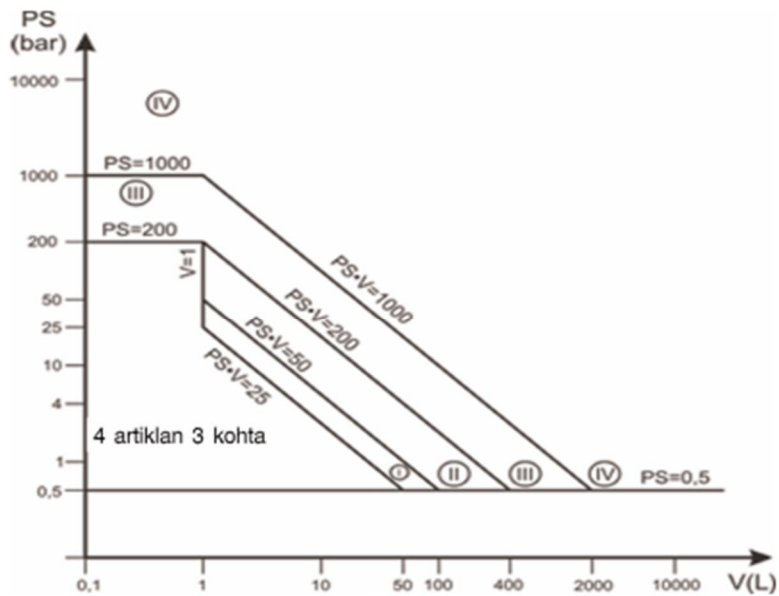
Euroopan unionin säätämät direktiivit velvoittavat sen jäsenmaita muuttamaan oman lainsäädäntönsä noudattamaan niiden sisältöä (6, s. 1). Suomessa Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2014/68/EU on myös sisällytetty kansalliseen lainsäädäntöön. Valtioneuvoston asetus painelaitteista 29.12.2016/1548 sisältää tärkeimmät kylmäalaa koskevista säädöksistä. Painelaitedirektiivin eli PED:n tulkitseminen ja soveltaminen kylmäalalle on haastavaa ja herättää paljon keskustelua. Alalle on muodostunut omat käytäntönsä mutta niistäkin on useita mielipiteitä. Vallitsevia käytännön toimintatapoja ei esiinny kirjallisena vaan ne opitaan käytännön kautta.

Kylmälaitoksille on direktiivin mukaan tehtävä laitekokonaisuuden loppuarviointi. Arviointiin kuuluu lopputarkastus, painekoe ja varolaitteiden tarkastus. Vaatimustenmukaisuuden arviontiin liittyvä dokumentointi täytyy tehdä kielellä, jota kansallinen viranomaisella ymmärtää (7, s. L 189/179). Painelaitteisiin tai laitekokonaisuuksiin on yleensä kiinnitettävä CE-merkintä. CE-merkintää ei kuitenkaan saa kiinnittää laitteisiin, jotka on rakennettu hyvän konepajakäytännön mukaan tai paineeseen liittyvä riski ei ole merkityksellinen. (7, s. L 189/168.)

Painelaitedirektiivin piiriin kuuluvia laitteiston osia hiilidioksidikylmälaitoksessa ovat usein nestesäiliöt, putkistot, putkiston osat ja varusteet sekä varolaitteet. Nestesäiliöt voivat olla myös yksinkertaisia, jolloin niihin ei sovelleta PED:tä vaan direktiiviä yksinkertaisista painelaitteista 2014/29/EU (7, s. 189/171). Direktiiviä ei myöskään ” – – pitäisi soveltaa käyttäjään, joka ei ole valmistaja, alueellaan ja omalla vastuullaan suorittamiin painelaitteiden kokoamisiin kuten teollisuusasennuksiin (7, s. L 189/165).”

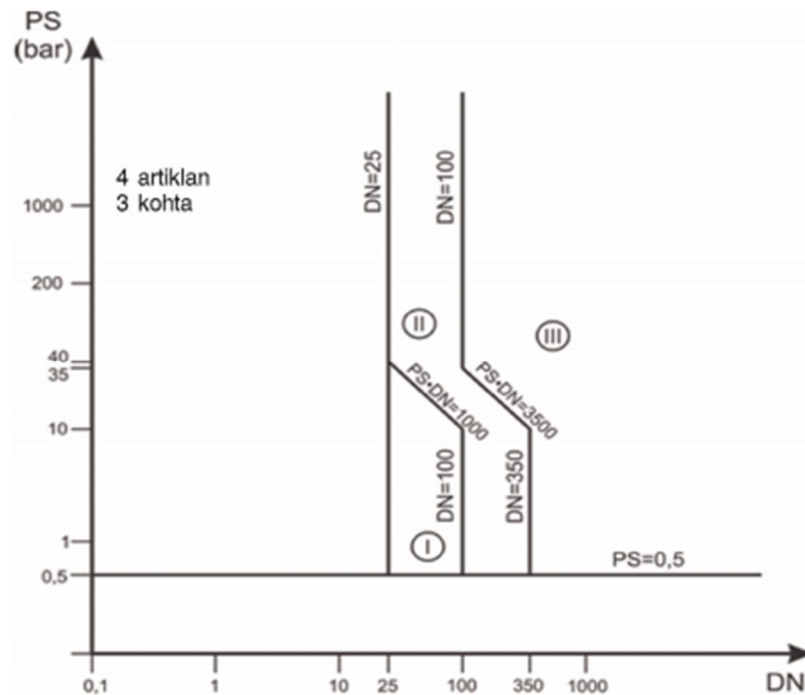
Jos tämän opinnäytetyön aiheena olevan laitteen aikoisi asettaa markkinoille, siihen olisi todennäköisesti sovellettava valtioneuvoston asetusta ja painelaitedirektiiviä. Direktiivissä laitteistoja luokitellaan niiden sisällön vaarallisuuden mukaan ja hiilidioksidi kuuluu luokkaan 1 (6, s. 3/23). Painelaittepäätöksen liitteessä 2 on kaaviot, joiden avulla määritetään putkiston ja säiliöiden painelaiteluokka niiden nimellishalkaisijan tai tilavuuden ja suurimman sallitun käyttöpaineen perusteella. Luokan 1 kylmäainetta sisältävä putkisto pitää olla nimellissuuruudeltaan DN 25 tai suurempi, jotta siihen sovellettaisiin painelaitedirektiiviä (7, s. 189/176). Tätä pienemmät putkistot voidaan suunnitella ja rakentaa hyvän konepajakäytännön mukaan (7, s. L 189/177).

Laitteen nestesäiliö on rakennettu kahdesta hydraulisynteriputkesta, joiden nimellissuuruus on DN 75. Säiliön valmistaja on koeponnistanut laitteen ja merkinnyt sen tyyppikilpeen suurimmaksi sallituksi käyttöpaineeksi 150 baaria. Säiliön varoventtiilin avautumispaine on kuitenkin 80 baaria, mikä kannattaa ottaa huomioon tilattaessa säiliöitä, joiden painelaiteluokitukseen tämä ero vaikuttaa. Direktiivi antaa ymmärtää, että säiliö olisi luokiteltava tyyppikilvessä olevan suurimman sallitun käyttöpaineen perusteella. Säiliön tilavuuden ja suurimman sallitun käyttöpaineen tuloksi tulee $150 \text{ bar} \times 3,5 \text{ L} = 525 \text{ bar} \cdot \text{L}$. Mikäli paineena käytettäisiin varoventtiilin avautumispainetta, saataisiin tuloksi $80 \text{ bar} \times 3,5 \text{ L} = 280 \text{ bar} \cdot \text{L}$. Mikäli laitteen säiliö luokitellaan säiliöksi, sen painelaiteluokka on III (kuva 1) (7, s. L 189/215).



KUVA 1. Painelaitedirektiivin mukaan luokan 1 sisältöisten säiliöiden painelaiteluokitus (7, s. L 189/215)

Jos säiliö voidaan luokitella putkeksi, sen painelaiteluokka on II (kuva 2) (7, s. L 189/218). Säiliön nimellissuuruuden ja suurimman sallitun käyttöpaineen tulo on $75 \times 150 \text{ bar} = 11\,250 \text{ bar}$. Säiliö kuuluisi putkistoluokituksessa luokkaan II, vaikka sen suurimmaksi sallituksi käyttöpaineeksi olisikin merkitty varoventtiilin avautumispaine 80 baaria tulon ollessa tällöin $75 \times 80 \text{ bar} = 6000 \text{ bar}$. Luokittelu ei nouse luokkaan III, koska putken DN-koko on pienempi kuin 100.



KUVA 2. Painelaitedirektiivin mukaan luokan 1 sisältöisten putkistojen painelaiteluokitus (7, s. L 189/218)

Painelaiteluokitus määrittää vaatimustenmukaisuudenarvioinnissa käytettävät tarkastusmoduulit, joiden sisällöt on määritelty direktiivin liitteessä III. Varolaitteet luokitellaan luokkaan IV mutta niiden luokitus ei vaikuta laitekokonaisuuden luokitukseen (7, s. L 189/184). Tämän opinnäytetyön mukaisessa laitteessa nestesiiliön luokituksella III tarkastus moduuliksi kävisi joku seuraavista:

- moduulit B + D
- moduulit B + F
- moduulit B + E
- moduulit B + C2
- moduuli H (7, s. L 189/183).

2.2.1 Loppukoe

Loppukokeessa painelaitteet tarkastetaan silmämääräisesti ja asiakirjojen avulla. Kokeen tarkoituksena on varmistaa painelaitedirektiivin vaatimusten täytyminen. Tarvittaessa loppukoe tehdään kaikille osille valmistuksen aikana sisäisesti ja ulkoisesti. (7, s. L 189/208.)

2.2.2 Painekoe

Loppukokeeseen kuuluu painekoe, joka tehdään nesteellä tai muilla hyväksytyillä tavoilla (7, s. L 189/208-209). Direktiivin mukaan koepaineeksi asetetaan paine, joka vastaa suurinta laitokseen kohdistuvaa kuormitusta suurin sallittu käyttöpaine ja lämpötila huomioon ottaen, kerrottuna kertoimella 1,25 tai suurin sallittu käyttöpaine kerrottuna kertoimella 1,43. Koepaineeksi valitaan näistä suurempi. (7, s. L 189/214.) Koeponnistaminen näin suurella paineella aiheuttaa joihinkin osiin pysyviä muutoksia, joten direktiivin noudattaminen on käytännössä mahdotonta. Standardissa SFS EN 378 on määrätty käytettäväksi koepaineen kertomiksi alalla jo pitkään käytössä ollut 1,1. Paineekokeen ajaksi laitteistosta irrotetaan komponentit, jotka eivät kestä niin suurta painetta. (8, s. 183.)

Painelaitteiden valmistaja tekee painekokeen valmistamalleen laitteelle jo tehtaalla. Kohteeseen asennettuun putkistoon tehdään painekoe asennuksen jälkeen. Paineekokeesta laaditaan pöytäkirja, jossa mainitaan koetapa, koepaine, kokeen aikana tehdyt havainnot, painekokeen kesto sekä kokeen suorittaja. (8, s. 183.)

Laitteistolle täytyy tehdä myös tiiviyskoe. Koe tehdään yleensä kylmäaineella tai typellä, johon on sekoitettu kylmäainetta merkkiaineeksi. Kokeen aikana laitteiston liitoksista etsitään mahdollisia vuotoja siihen tarkoitetulla ilmaisimella. Koepaine on pienempi tai yhtä suuri kuin laitteiston testattavan osan suurin sallittu käyttöpaine. Kokeesta laaditaan pöytäkirja, jossa mainitaan kokeessa käytetty kaasu, koepaine, kokeen kesto, kokeen aikana tehdyt havainnot sekä kokeen valvoja. (8, s. 183.)

3 HIILIDIOKSIDIKONEIKOT

3.1 Hiilidioksidi kylmäaineena

Hiilidioksidi on yhdiste, joka koostuu hiilestä ja hapesta. Hiilidioksidia on ilmassa luontaisesti noin 0,037 % mutta suurina pitoisuuksina se on terveydelle haitallista. Hiilidioksidin GWP-arvo on 1, joten sen ilmastoa lämmittävä vaikutus on huomattavan alhainen nykyään yleisesti käytössä oleviin kylmäaineisiin verrattuna. Hiilidioksidia voidaan erottaa kylmäaineeksi esimerkiksi erilaisista teollisuuden prosesseista, joista se vapautuisi muuten ilmakehään.

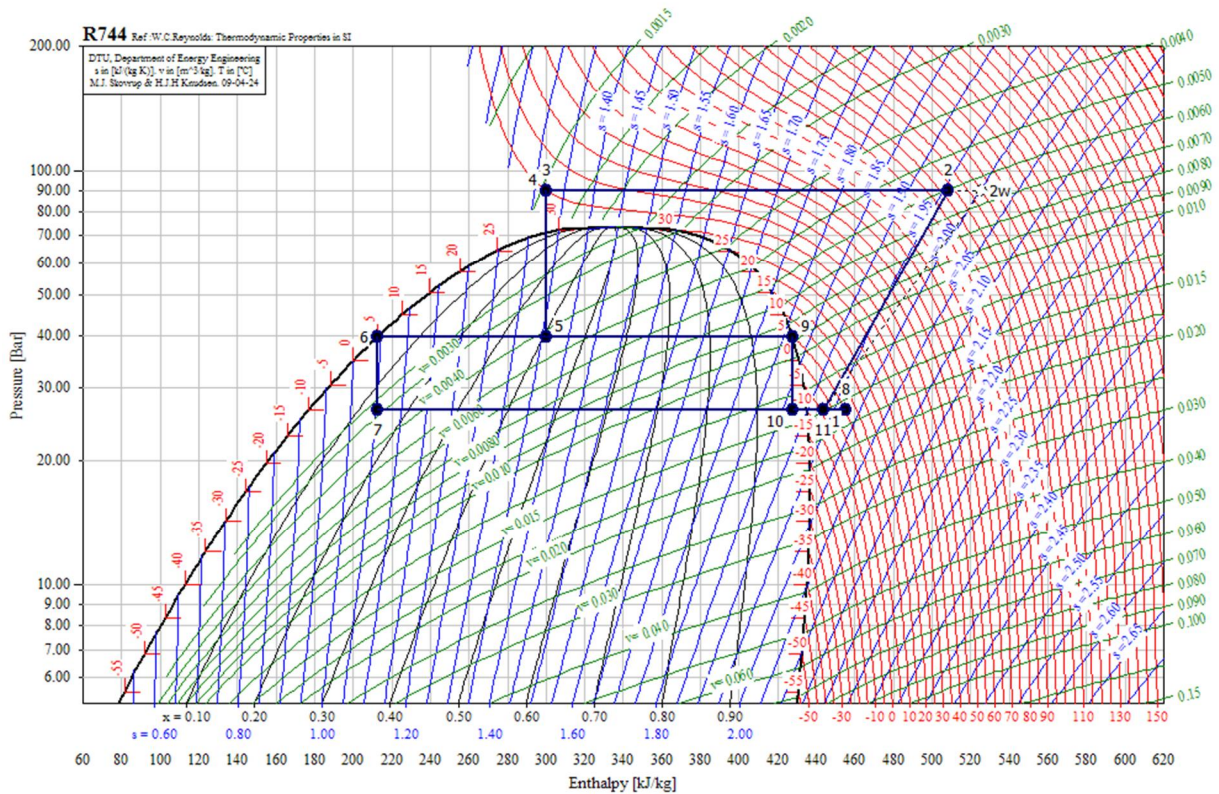
Hiilidioksidin käyttö kylmäaineena lisääntyy vauhdilla varsinkin teollisuudessa ja kaupan kylmälaitteissa, joissa tarvittavat kylmätehot ovat suuria. Hiilidioksidilla on alhaisten ilmastovaikutusten lisäksi myös muita hyviä ominaisuuksia. Hiilidioksidilla on hyvä volymetrinen kylmäntuotto, eli höyrystyessään se sitoo itseensä enemmän lämpöenergiaa kuin muut kylmäaineet (9, s. 18). Tämä mahdollistaa muita kylmäaineita pienemmät massavirrat, minkä vuoksi laitteistossa voidaan käyttää pienempiä putkikokoja. Hiilidioksidin ominaisuudet mahdollistavat alhaisen höyrystymislämpötilan, minkä vuoksi se soveltuu erinomaisesti pakastuslaitoksiin. Hiilidioksidilla päästään jopa -50 °C :n höyrystymislämpötilaan (10).

Hiilidioksidi luokitellaan standardin EN 378:n mukaan luokkaan A1/L1. Merkintä A1 tarkoittaa aineen olevan hieman myrkyllinen ja L1 tarkoittaa luokkaa ei palava. Hiilidioksidi on ihmiselle vaarallista vasta korkeina pitoisuuksina, joten sen käyttö on melko vaaratonta. Hiilidioksidi on väritön ja hajuton kaasu, joten vuodon havaitsemiseen tarvitaan anturi. Hiilidioksidilaitosten parissa työskentelevillä ihmisillä täytyy olla käytössään hiilidioksidihälytín, joka hälyttää havaitessaan yli 0,5 prosentin hiilidioksidipitoisuuden, sekä happianturi. Taulukossa 2 on esitetty hiilidioksidipitoisuuksien raja-arvoja ja niiden vaikutuksia ihmisiin. (11.)

TAULUKKO 2. Hiilidioksidipitoisuuden raja-arvot (11)

hiilidioksidipitoisuus	vaikutus
370 ppm (0,037 %)	pitoisuus ilmakehässä
5000 ppm (0,5 %)	kaasuhälytyksen yläraja (evakuointi)
20 000 ppm (2 %)	ei ongelmia lyhyestä altistuksesta
30 000 ppm (3 %)	sekavuus
100 000 ppm (10 %)	tajuttomuus, kuolema

R744-kylmäaineen kriittinen lämpötila on matala 31,04 °C, mutta paine on kuitenkin verrattain korkea 73,82 baaria (10). Kriittisellä lämpötilalla tarkoitetaan lämpötilaa, jonka ylittyessä aine ei enää esiinny nesteinä tai kaasuna vaan ylikriittisenä fluidina (12). Hiilidioksidilla toteutettavat kylmäprosessit joudutaan usein tekemään ylikriittisenä sen vuoksi, että alle 30-asteisen kylmäaineen lauhduttaminen on kesällä hankalaa. Ilmalauhdutteiset järjestelmät on Suomessa kesällä tehtävä ylikriittisenä (kuva 3). Mikäli lauhduttaminen pystytään järjestämään esimerkiksi vesistöön tai maalämpökaivoon, voidaan järjestelmä toteuttaa myös alikriittisenä. Alikriittisen järjestelmän kylmäkerroin on parempi kuin ylikriittisen.



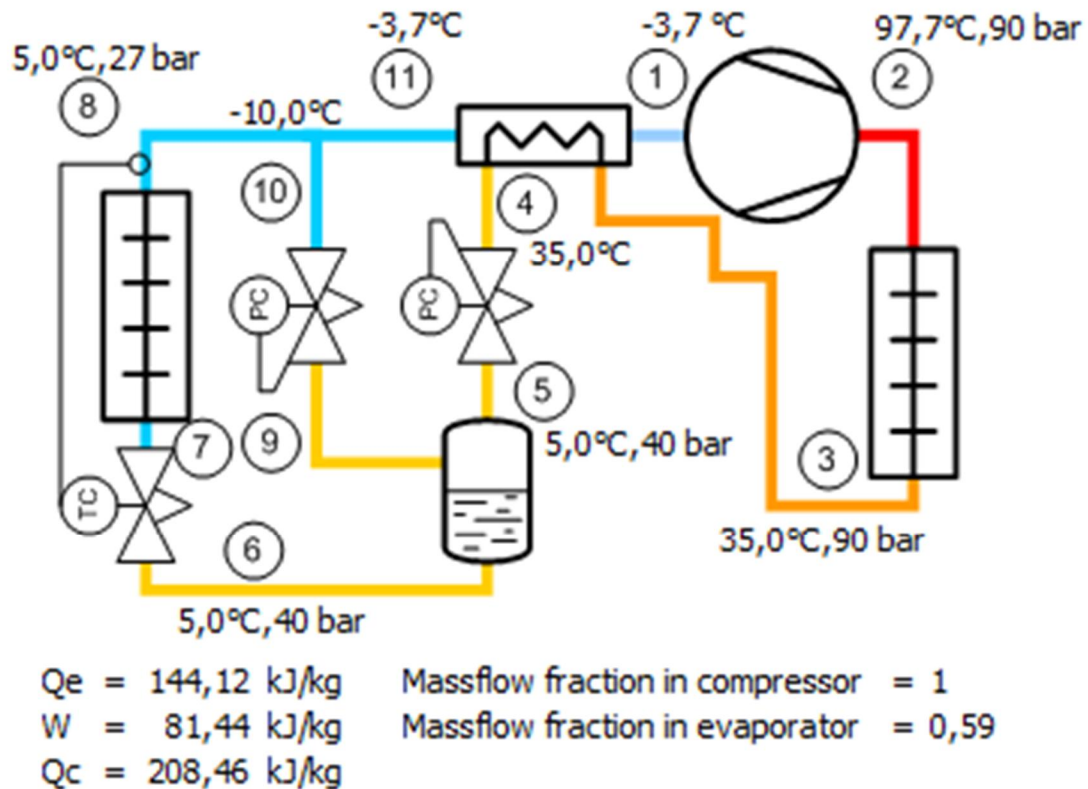
KUVA 3. R744-ylmälaitoksen ylikriittinen prosessi

Ylikriittisessä prosessissa puhutaan lauhduttamisen sijaan kaasun jäähdyttämisestä. Korkean kuumakaasun lämpötilan ansiosta kaasunjähdytyksestä saatavalle energialle voidaan soveltaa useita käyttökohteita, kuten tilojen tai käyttöveden lämmitystä. Kesätilanteessa, jolloin jäähdytyksen tarve on suuri ja lämmityksen tarve pieni, esimerkiksi kauppojen kylmälaitteista talteen otettua energiaa riittää kaupan omien lämmitystarpeiden lisäksi muihin tarkoituksiin, kuten myytäväksi. Kaasunjähdytyksen riittävyden varmistamiseksi lämmitystarpeiden rinnalle on mahdollisesti tehtävä muita ratkaisuja.

Hiilidioksidin ominaisuudet kylmäainekäytössä eivät ole yhtä hyvät kuin nykyään yleisemmin käytössä olevilla kylmäaineilla. Hiilidioksidilla toimivat laitokset eivät saavuta, ainakaan nykyisellä tekniikalla, yhtä hyviä kylmäkertoimia kuin vanhat laitokset. Tätä energian menetystä kompensoi kuitenkin paremmin hyödynnettävissä oleva kaasunjähdyttimestä saatava energia.

3.2 Bypass-koneikon toiminta

Hiilidioksidia käytetään kylmäaineena erilaisilla periaatteilla toimivissa laitoksissa. Kuvassa 4 on esitetty bypass-koneiston kytkentäkaavio, jossa numeroidut pisteet vastaavat kuvan 3 numerointeja. Seuraavassa toimintaselostuksessa kuvien 3 ja 4 pisteet on numeroitu selostukseen.



KUVA 4. Bypass-koneiston kytkentäkaavio

Kompressori puristaa kaasumaista hiilidioksidia, jolloin sen paine ja lämpötila nousevat (piste 2). Kaasunjähdyttimessä ylikriittisenä fluidina esiintyvää hiilidioksidia jähdytetään matalampaan lämpötilaan (piste 3). Kaasunjähdyttimessä kylmäaineesta poistetaan prosessista siihen siirtynyt energia. Kaasunjähdyttimen painetta ylläpitää elektroninen vakiopaineventtiili, josta kylmäaine virtaa nestesäiliöön (piste 5). Tässä venttiilissä aiheutuva paineen lasku saa osan kylmäaineesta höyrystymään. Nestemäinen kylmäaine johdetaan säiliön pohjalta paisuntaventtiilille (piste 6). Elektroninen paisuntaventtiili ruiskuttaa kylmäainetta höyrystimeen (piste 7), jossa höyrystyvä kylmäaine sitoo itseensä energiaa ympäris-

töstään. Paisuntaventtiili säätää ruiskutusta halutun tulistuksen perusteella. Tulistus lasketaan höyrystimen jälkeisen lämpötilan (piste 8) ja höyrystymislämpötilan erotuksena. Nestesäiliöön muodostunut kaasumainen kylmäaine johdetaan bypass-linjaa pitkin kompressorin imujohtoon (piste 10). Bypass-venttiiliä ohjataan nestesäiliön paineen perusteella ja sillä ylläpidetään säiliössä haluttua painetta.

3.3 Kylmälaitteen tyhjiöinti

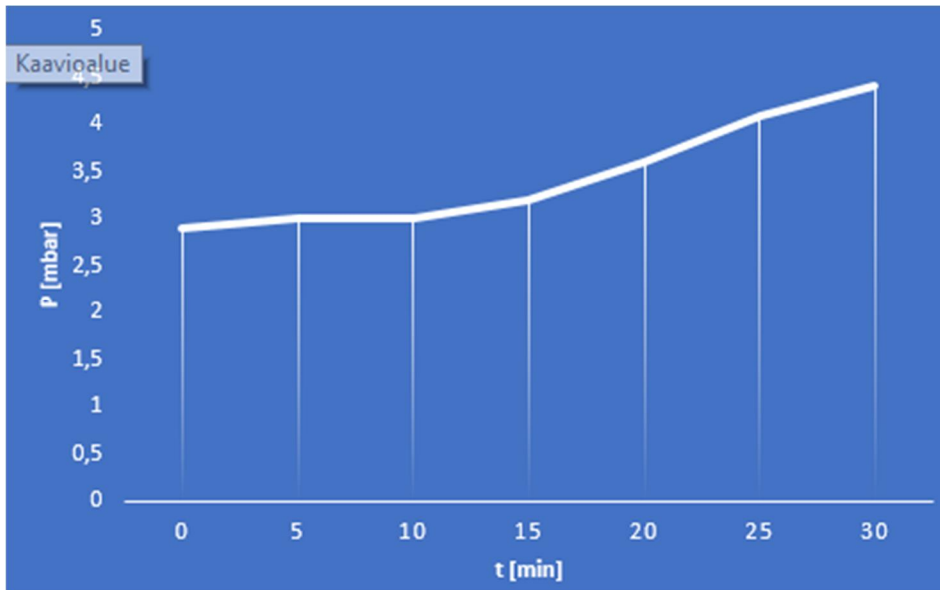
Kylmälaitteen tyhjiöinnillä järjestelmästä saadaan poistettua ilma ja sen seoskaasut sekä kosteus. Tyhjiöinnin aikana järjestelmässä oleva nestemäinen vesi alkaa höyrystyä matalan paineen vuoksi. Höyrystynyt vesi poistuu laitteesta tyhjäpumpun kautta. Pakkasessa tyhjiöinti on haasteellista, koska laitteistossa oleva nestemäinen vesi on jäässä eikä sitä saada höyrystymään lämmittämättä laitetta. Tyhjiöinnissä on huomioitava putkiston virtausvastukset. Esimerkiksi takaiskuventtiili voi aiheuttaa niin suuren painehäviön, että tyhjiöinti on suoritettava venttiilin molemmilta puolilta. Kompressorin kampikammion lämmitys kannattaa kytkeä päälle ennen tyhjiöintiä, jolloin öljyyn liuennut kosteus saadaan höyrystettyä. (8, s. 183–184.)

Tyhjiöinnin kestoa on mahdotonta määrittää etukäteen. 1 gramma vettä on kaasuina 5 millibaarin paineessa tilavuudeltaan 260 litraa. Laitoksessa olevan veden lisäksi tyhjiöintiäikaan vaikuttavat järjestelmän koko ja tyhjäpumpujen teho sekä määrä. (8, s. 184.)

Hiilidioksidilaitosten tyhjiöinti on määritelty standardissa vain niille laitoksille, joiden kylmäainetäytös on yli 10 kg, mikä kertoo osaltaan nyt rakennettavan koneen ainutlaatuisuudesta sen sisältäessä hiilidioksidia vain 3 kg. Yli 10 kg:n laitosten tyhjiöinnin loppupaine tulee olla 6,75 mbar (8, s. 184).

Tyhjiöinti tehtiin liittämällä huoltomittari tyhjiöintipumppuun, mikä mahdollisti tyhjiöimisen paine- ja imuputkiston huoltoventtiilistä yhdellä tyhjäpumpulla. Ensimmäisen tyhjiöinnin kesto oli noin kolme tuntia, jolla saavutettiin loppupaine 2,9 mbar. Tyhjiöinnin päätyttyä painetta seurattiin puolentunnin ajan ja kirjattiin se muistiin viiden minuutin välein. Kuvassa 5 on diagrammi paineen muutoksesta.

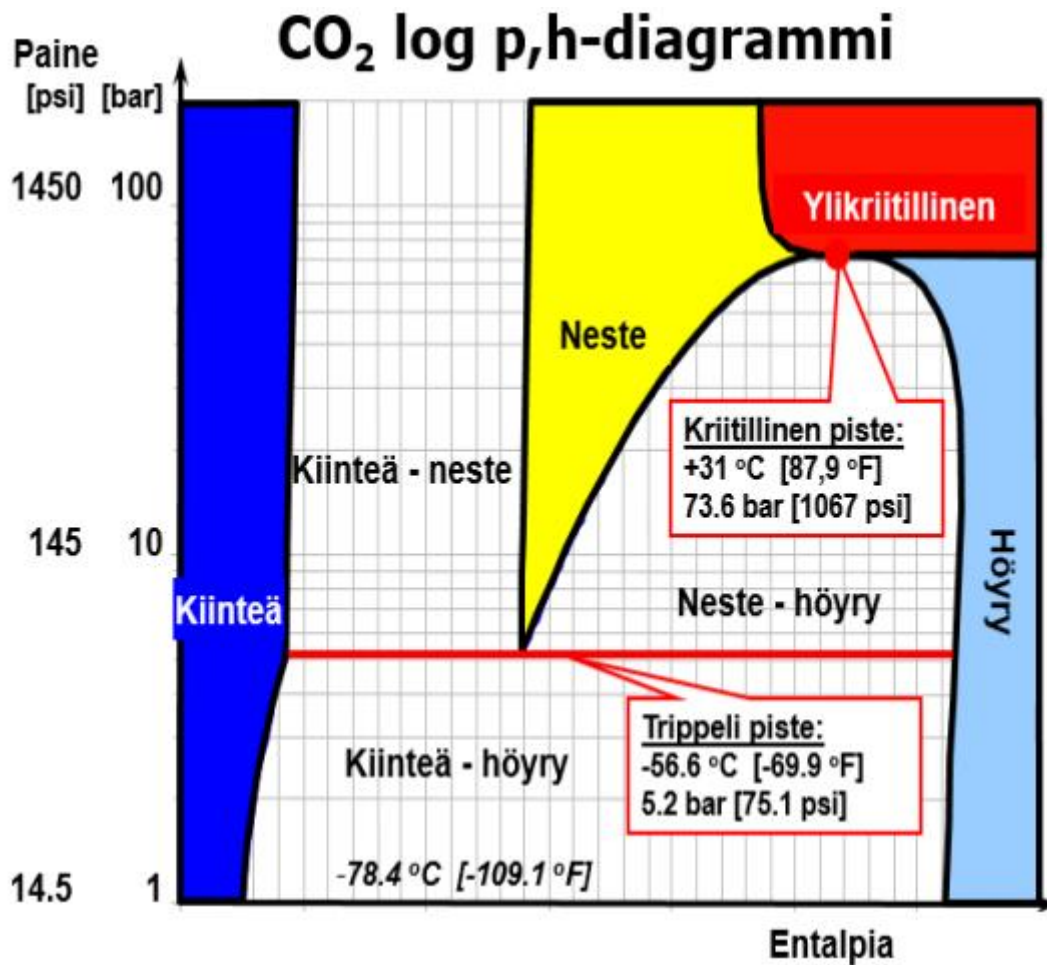
Paineen nousu kertoo joko laitteistossa olevasta vuodosta tai järjestelmässä olevasta vedestä. Veden höyrystyminen järjestelmässä nostaa painetta niin, että se havaitaan tyhjämittarista. Tyhjämittari suljettiin erilleen verkostosta, minkä jälkeen tyhjä rikottiin tyypellä. Seuraava tyhjiöinti kesti noin 20 tuntia, jonka jälkeen painetta tarkkailtiin taas puoli tuntia. Paine nousi saavutetusta 1,9 mbar:sta noin 2,2 mbar:iin. Muutos on niin pieni, että voidaan todeta tyhjiöinnin onnistuneen.



KUVA 5. Paineen muutos ensimmäisen tyhjiöinnin jälkeen

3.4 Kylmäaineen täyttö

Kuvassa 6 on kuvattu log-ph-piirroksen avulla hiilidioksidin käyttäytymistä ja olo-
muotoja eri olosuhteissa. Alle 5,2 baarin paineessa hiilidioksidia esiintyy vain kiinteänä ja kaasuna. Kylmälaitoksessa on täytön alkaessa lähes 0 baarin paine, joten hiilidioksidia on täytettävä laitteeseen kaasuna vähintään 6 baarin paineeseen asti. Eräs kylmälaiteurakoitsija pitää rajana 10 baaria. Jos laitetta alkaa täyttämään nesteä alle 5,2 baarin paineeseen, neste muuttuu kiinteäksi ja täyttäminen ei onnistu.



KUVA 6. Hiilidioksidin olomuodot (13, s.6)

Laitoksen kylmäainetäytöksen määrittämiseksi täytyy laskea laitteiston tilavuus. Kylmäaineen määrän laskennassa huomioidaan laitteiston todellisesta tilavuudesta seuraavat osuudet:

- Nesteputken tilavuudesta huomioidaan 100 %.
- Imuputken tilavuudesta huomioidaan 20 %.
- Paineputken tilavuudesta huomioidaan 10 %.
- Kaasunjäähdyttimen putken tilavuudesta huomioidaan 10 %.
- Bypass-putken tilavuudesta huomioidaan 100 %.
- Kaasunjäähdyttimen tilavuudesta huomioidaan 10 %.
- Höyrystimen tilavuudesta huomioidaan 30 %. (11.)

Laboratorion kylmälaitteen huomioitavaksi tilavuudeksi saatiin 0,95 dm³. Laitoksen nestesäiliö on tilaustyönä tehty kahdesta hydraulisynterinin putkesta, koska

tarpeeksi pientä säiliötä ei ole markkinoilla saatavana. Säiliön tilavuus on noin 3,5 litraa. Säiliön minimi täytös on yleensä $\frac{1}{4}$ säiliön korkeudesta eli tässä tapauksessa noin 0,9 litraa. Täytös tulee mahtua kokonaan nestesäiliöön esimerkiksi huoltojen ajaksi, joten pienin mahdollinen täytös tähän laitteeseen on 2 litraa ja suurin alle 3,5 litraa.

Pienen kylmäainemäärän vuoksi laitteisto täytettiin kokonaan kaasuventtiilistä. Isoissa laitoksissa, joissa kylmäainetta tarvitaan paljon, on tarpeellista vaihtaa täyttö nesteventtiilistä, koska se nopeuttaa toimenpidettä huomattavasti. Ensimmäisellä kerralla laitteeseen laitettiin 2,5 kg kylmäainetta, jonka nestetilavuus oli $3,2 \text{ dm}^3$ pullon lämpötilan ollessa noin $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Laitetta käytettäessä huomattiin täytöksen olevan vajaa, koska paisuntaventtiilille tarvittavaa paine-eroa ei saavutettu eikä kylmätehoa saatu riittävästi. Kylmäainetta lisättiin kompressorin käydessä niin kauan, että laitteen paineet pysyivät suunnitteluarvoissa. Lopulliseksi täytösmääräksi tuli noin 3 kg, jonka nestetilavuus on $25 \text{ }^\circ\text{C}$:n lämpötilassa noin $4,1 \text{ dm}^3$. Neste ei mahdu kokonaan nestesäiliöön mutta yli jäävä osuus on kuitenkin hyvin pieni.

Laitteen kylmäainemäärää on vaikea arvioida, koska nestesäiliössä ei ole linssejä, joista nestepinnan korkeuden näkisi. Nesteputkessa olevassa nestelasissa kulkee kuplia, vaikka laitteessa on isokin täytös, mikä johtuu ilmeisesti nesteputken ja suodatinkuivaimen aiheuttamasta painehäviöstä. Täytösmäärää pystyisi arvioimaan myös siitä, jos kuplinta lakkaisi jossain vaiheessa kylmäainetta lisättäessä. Nestelinjan painehäviöstä johtuva kuplinta lakkaisi, jos nestettä pystyisi alijäähdyttämään esimerkiksi kylmäkaasujohtoon asennetulla lämmönvaihtimella.

3.5 Käyttöönnoton yleisiä huomioita

Kylmälaitoksen käyttöönotossa on huomioitava useita ohjeita ja määräyksiä. Painelaitesäädösten edellyttämän vaatimustenmukaisuuden arvioinnin tulee sisältää kaikki laitoksen paineenalaiset komponentit. Laitoksen omistajan vastuulla on painelaitteiden turvallinen sijoittaminen, rekisteröitävien säiliöiden rekisteröiminen ja pätevän käytönvalvojan nimeäminen (14).

Ennen kylmäkoneen käynnistystä määritetään toimenpiteet, jotka täytyy huomioida kalustotappioiden minimoimiseksi. Käynnistettäessä uusia koneita on mahdollista tehdä virheitä, jotka hajottavat koneen komponentteja välittömästi tai pidemmässä käytössä.

Hiilidioksidikompressorissa on käytettävä kampikammion lämmitystä aina, kun kompressor ei ole käytössä. Hiilidioksidi sekoittuu helposti kompressorin voiteluvaan öljyyn, mikä aiheuttaa kylmäaineen vaahtoamista ja öljyn viskositeetin pienenemistä kompressorin käydessä. Kampikammiossa olevan vastuksen avulla pidetään kompressorin öljy lämpimänä, jolloin sekoittuminen ja näin ollen myös vaahtoaminen vähenee. (15, s. 6.)

Kompressorin on tehtaalta asennettu varoventtiili kompressorin painepuolelle ja rotalock-venttiilit sekä paine- että imupuolelle. Rotalock-venttiilit ovat tehtaalta lähtiessään kiinni, joten ne täytyy muistaa aukaista ennen koneen tyhjiöintiä. Kompressorin käynnistyessä venttiilin ollessa kiinni varoventtiili ei välttämättä ehdi reagoida äkilliseen paineiskuun. Tämän seurauksena kompressorista voi pahimmillaan haljeta kansi.

4 LABORATORION KYLMÄKONE

4.1 Lämpökuorma ja taajuusmuuttaja

Kylmäkoneen lämpökuorma tuotetaan uima-allaskäyttöön tarkoitettulla sähkövastuksella (kuva 7). Sähkövastuksen tehoksi pystytään asettamaan 3, 6 tai 9 kW. Vastuksessa on myös termostaatti, jonka säätöalue on 0–45 °C. Opiskelijoiden harjoitustyössä tarkoituksena on saada kone säädettyä tasapainoon, jolloin prosessi pysyy muuttumattomana. Tasapainotilassa lämpötilat eivät nouse lämmityspiirissä ja termostaatti ei sammuta vastusta, vaan lämpökuorma ja kylmäteho pysyvät vakiona mittausten ajan. Tällöin lämpötilojen mittaus, prosessin hahmottaminen ja laskelmien tekeminen on selkeämpää kuin muuttuvan prosessin tapauksessa.



KUVA 7. Sähkövastus, jolla tuotetaan kylmäkoneen lämpökuorma

Koneikkoon on asennettu taajuusmuuttaja, jonka avulla kompressorin pyörimisnopeutta säädetään. Pyörimisnopeuden säätäminen muuttaa kylmäaineen massavirtaa ja sen myötä koneen kylmätehoa. Käytännössä säätö tehdään laitteen asennetulla potentiometrillä, joten taajuusmuuttajan näppäileminen ei aiheuta ylimääräistä päänvaivaa (kuva 8).



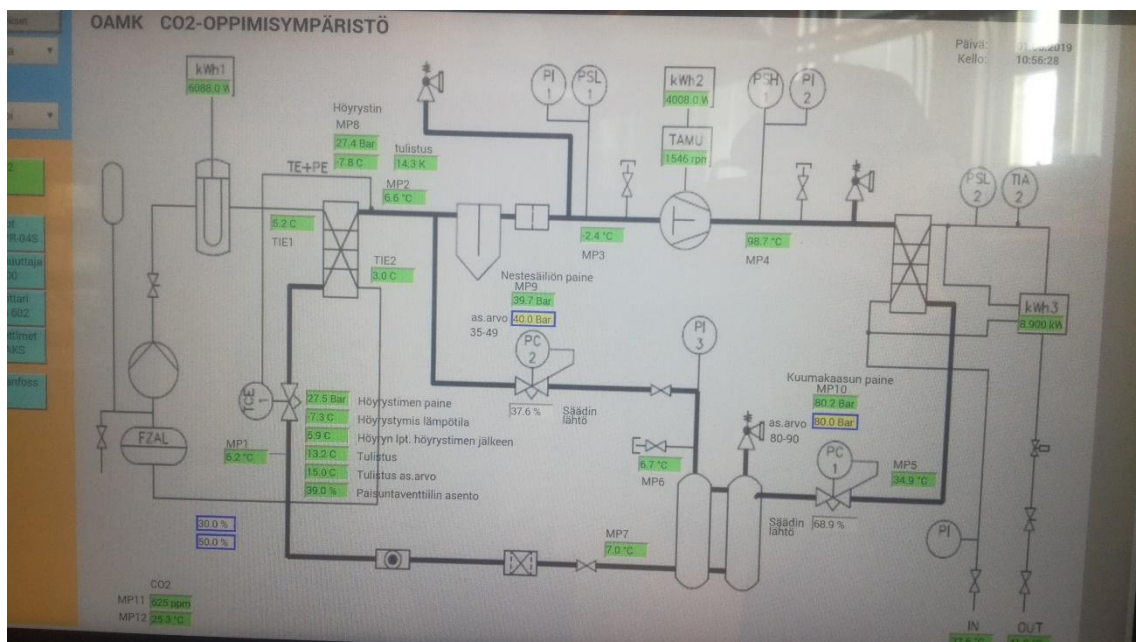
KUVA 8. Potentiometri, jolla säädetään kompressorin käyttötaajuutta

4.2 Kaasun jäähdyttäminen

Kaasun jäähdyttämiseen käytetään käyttövetä. Laitteiston epäsäännöllisten ja lyhyiden käyttöaikojen vuoksi jäähdyttämiseen ei ole järkevää rakentaa järjestel-

mää, jolla lämpö saataisiin talteen. Käyttöveden käyttö mahdollistaa myös kaasun jäähdyttämisen huomattavan alhaiseen lämpötilaan, jolloin voidaan tutkia jäähdyttämisen vaikutusta kylmäkoneen toimintaan.

Kaasunjäähdyttimeen kytketään vesi termostaattisesta sekoittajasta, jolloin halutun lämpötilan ja virtaaman säätäminen on helpompaa ja tarkempaa kuin vipuhastasta. Kylmäkoneen putkistoon on asennettu Kamstrup multical 602 -energiamittari sekä linjasäätöventtiili, joista voidaan lukea tai mitata jäähdytysveden virtaama. Laitteen Fidelix-näytöltä voidaan lukea veden lämpötilat ja kaasunjäähdyttimestä jäähdytysvedeen siirretty teho (kuva 9). Jäähdytysvesi ohjataan laitteistosta viemäriin.



KUVA 9. Kylmäkoneen Fidelix-näyttö, josta nähdään prosessin tarpeelliset lämpötilat, paineet ja tehot.

Tasapainotilanteessa lämpökuorman sähkötehon, kompressorin sähköverkosta ottaman tehon ja kaasunjäähdyttimestä jäähdytysvedeen siirretyn tehon avulla havainnollistetaan prosessia. Kaikki prosessiin syötetty teho on saatava ulos kaasunjäähdyttimestä. Tehoista voidaan määrittää laitteen kylmäkerroin. Tällä hetkellä näytöstä luettavassa kompressorin ottotehossa on mukana myös taajuusmuuttajan teho mutta mittaus muutetaan niin, että näytössä näkyy vain kompressorin ottama teho.

4.3 Varolaitteet

Laitteistoon on asennettu varolaitteita, jotka varmistavat sen oikean ja turvallisen käytön. Laitteiston rungossa, näkyvällä paikalla, on punainen pikapysäytyskytkin, jota painamalla laitteiston virransyöttö katkeaa ja laitteisto sammuu (kuva 10). Kytkimen painaminen sytyttää yhden laitteen punaisista merkkivaloista, jotka sytyvät, kun jokin toiminto estää laitteen käymisen.

Laitteessa on hiilidioksidianturi, joka havaitessaan yli 5000 ppm:n hiilidioksidipitoisuuden aktivoi auton äänimerkistä tehdyn summerin ja sytyttää punaisen huomiovalon (kuva 10). Summerin soidessa kaikki tilassa olevat henkilöt täytyy evakuoida ja tila tuulettaa.



KUVA 10. Pikapysäytyskytkin ja kaasuhälytys-merkkivalo

Kaasunjäähdyttimen jäähdytysvesiputkessa on paineanturi, joka pysäyttää koneen, mikäli putkessa ei ole painetta. Paineanturi täytyy vaihtaa virtausvahdiksi, koska paineen perusteella ei voida varmistua, että kaasunjäähdyttimessä kiertää neste kaikissa tilanteissa. Mekaaninen korkeapainepressostaatti sammuttaa koneen kaasunjäähdyttimen korkean paineen vuoksi. Pressostaatti säädettiin katkaisemaan käynti 102 baarin paineessa. Pressostaattia säädettäessä kaasunjäähdyttimen painetta nostettiin muuttamalla paineensäätimen asetusarvoa.

Höyrystintä lämmittävässä liuosputkessa on virtausvahti, jonka toimintaa testatessa huomattiin, ettei virtausvahti pysäyttänyt kompressoria. Virtausvahti sytyttää ainoastaan punaisen merkkivalon virtauksen puuttuessa. Laitteessa olleen mekaanisen matalapainepressostaatin tilalle vaihdettiin mekaaninen painekeytkin, koska pressostaatin säätöalue ei sopinut koneen käyttöpaineisiin. Säätöalueeltaan sopivan pressostaatin paineen kesto olisi ollut liian pieni koneen seisontaikojen korkeiden paineiden vuoksi. Painekeytkin katkaisee käynnin, kun imujohdon paine laskee 11 baariin.

Lämpötilakytkimet mittaavat höyrystintä lämmittävän glykolin ja kuumakaasun lämpötiloja ja sammuttavat koneen, mikäli kuumakaasun lämpötila nousee tai glykolin lämpötila laskee liikaa. Glykolin lämpötilan katkaisurajaksi säädettiin -20°C . Kuumakaasun lämpötila nousi korkeapainepressostaatin säädön aikana yli 129°C :een eikä lämpötilakytkin vielä katkaissut koneen käyntiä, joten katkaisurajaa täytyy vielä laskea. Kompressorin käämien lämpötilaa tarkkaillaan myös lämpötilakytkimellä. Liuoksen lämmitysvastuksen yllämpösuojan laukeaminen ja taajuusmuuttajavika sytyttävät vikavalon. Jos mikään punaisista varoitusvaloista ei pala, kompressori voidaan käynnistää. Liuoksen lämmittimen lämmityspyynnöstä osoituksena laitteessa palaa vihreä merkkivalo (kuva 11).



KUVA 11. Häiriövalot ja käyttökytkimet (valojen tekstit pitää korjata oikeiksi)

5 KONEEN SUORITUSARVOT

5.1 Putkiston mitoitus ohjelmalla

Kylmäkone simuloidaan Danfoss Coolselector 2 -ohjelmalla. Putkistot mitataan ja syötetään ohjelmaan sellaisena kuin ne on rakennettu. Mitoitukseen syötetään myös kaikki putkiston osat sekä komponentit, jotka vaikuttavat putkiston painehäviöihin. Ohjelma huomioi myös putkien kaltevuudet painehäviön laskennassa. Jälkikäteen tehtävä, todellisen putkiston mitoilla tehty simulointi antaa tarkemman kuvan simuloinnin paikkansapitävyydestä.

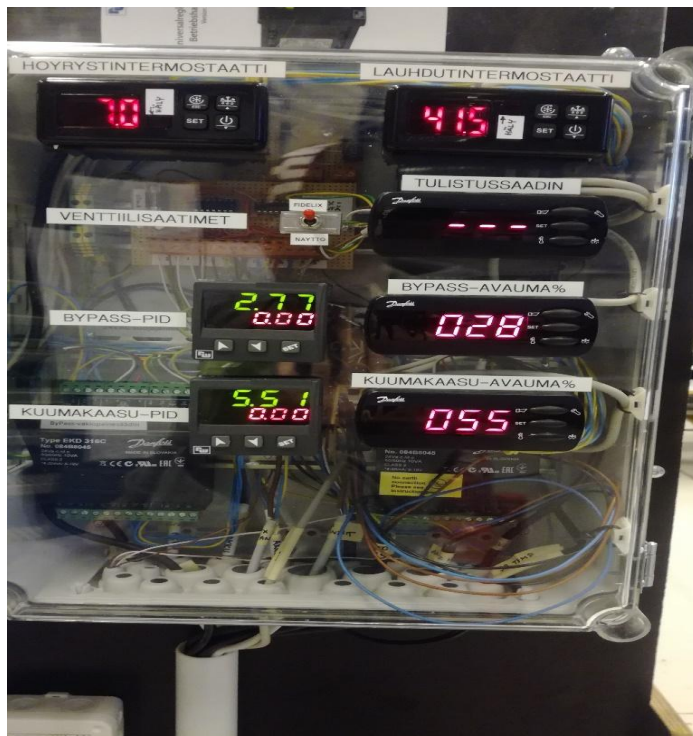
Kaasunjäähdyttimen painehäviötä ei pysty itse muuttamaan ohjelmaan, vaan ohjelma laskee sen itse. Ohjelma antaa 13,99 kW:n lämmitysteholla kaasunjäähdyttimen painehäviöksi 0,187 baaria eli 18,7 kilopascaliala, kun jäähdyttimen valmistajan antama painehäviö on 7,11 kPa. Valmistajan mitoituksessa jäähdyttimen teho on 20 kW (liite 1). Kaasunjäähdyttimen mitoitukseen ei ole toistaiseksi saatavilla kuluttajien käyttöön tarkoitettua ohjelmaa, joten on tultava toimeen suuntaa antavien arvojen kanssa.

Öljyn ja kylmäaineen sekoittuminen täytyy estää, jotta estetään öljyn vaahtoaminen ja varmistetaan kompressorin voitelu. Sekoittuminen lisää myös öljyn kulukumista kylmäainekiertoon. Öljyn lämpötila täytyy olla vähintään 30 °C, joten kamppikammiota lämmittävä vastus on kytkettävä päälle hyvissä ajoissa ennen kompressorin käynnistämistä. Koneikon käydessä öljyn lämpötila pidetään riittävän korkeana suurella tulistuksella. Imukaasun tulistukseksi säädetään 15 kelviniä. Pienin sallittu kuumakaasun lämpötila saadaan, kun kaasunjäähdyttimenpaineeseen lisätään 40 kelviniä. (15, s. 6/27.) Kaasunjäähdyttimenpaineeksi säädetään 90 baaria (yp), joka vastaa lämpötilaa 37,6 °C. Pienin kuumakaasun lämpötila on siis 78 °C, joka ylitetään reilusti lämpötilan ollessa simulointiohjelman mukaan 106,4 °C (kuva 12). Suurin sallittu kuumakaasun lämpötila on 140 °C (15, s. 6/27).

Käyttöolosuhteet			
Jäähdytysteho, LT:	0 kW	Jäähdytysteho, MT:	6,000 kW
Hyötysuhde, sisäinen HX:	0 -	Jäähdytysteho, AC:	0 kW
Höyrystyslämpötila:	-15,0 °C	Höyrystyslämpötila:	-10,0 °C
Höyrystymispaine:	22,93 bar	Höyrystymispaine:	28,50 bar
Hyödynnettävä tulistus:	0 K	Hyödynnettävä tulistus:	15,0 K
Lisätulistus:	0 K	Lisätulistus:	0 K
Kuumakaasun lämpötila:	-3,6 °C	Kuumakaasun lämpötila:	108,4 °C

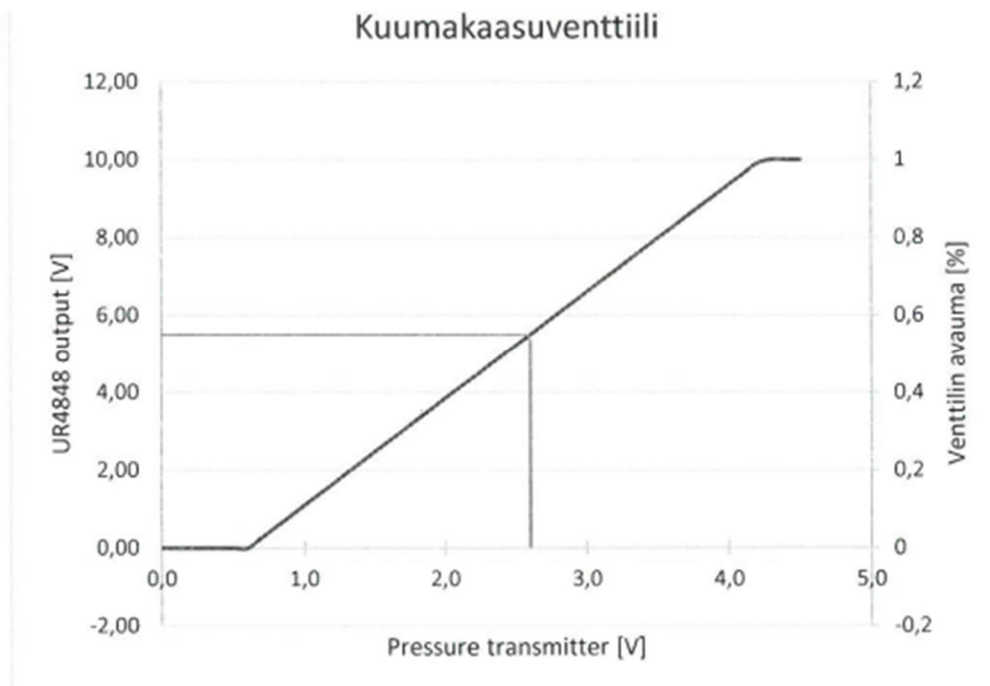
KUVA 12. Kuumakaasun lämpötila mitoitusohjelmasta (liite 2)

Elektroniset Danfoss CCMT 2 -paisuntaventtiilit löytyvät ohjelmasta ja niille saadaan säätöarvot eri mitoituksille. Laitteistossa on kolme venttiiliä, joista kaksi toimivat vakio painesäätiminä ja yksi tulistuksen säätimenä. Vastusta pystytään käyttämään kolmella teholla, joiden mukaan tehdään simuloinnit kylmätehoille 3, 6 ja 9 kW. Ohjelmasta saadaan paisuntaventtiilien asento ja kuormitus prosentteina. Kylmäkoneessa on säätimet, joiden avulla bypass-venttiilin ja kaasunjäähdyttimen painetta säätävän venttiilin avaumaa voidaan säätää (kuva 13).



KUVA 13. Elektronisten Danfoss CCMT 2 -paisuntaventtiilien säätimet

Vakiopainetta säätevien venttiileiden PID-säätimet vastaanottavat paineantureilta 0–10 V:n jänniteviestiä, joka muutetaan ohjelmistoon syötetyn ”säätökäyrän” mukaisesti venttiilille syötettäväksi jännitteeksi (kuva 14). Säätimet pyrkivät pitämään yllä haluttuja paineita järjestelmän eri osissa muuttamalla paisuntaventtiilien avautumisastetta. Säätimen noudattama säätökäyrä on tehty itse mitoitusohjelman antamien avautumisasteiden perusteella yksittäisillä toimintapisteillä.



KUVA 14. Kaasunjäähdyttimen vakio paineventtiilin PID-säätimen antama jännite ja venttiilin avauma paineanturin jänniteviestin perusteella

Konetta käytettäessä huomattiin, että säätimet eivät pystyneet ylläpitämään haluttuja paineita. Paine saatiin pysymään halutussa arvossa tietyllä kompressorin kierrosnopeudella muuttamalla säätimen offset-arvoa. Arvoa muuttamalla siirretään koko säätökäyrää muuttamatta sen kulmakerrointa. Kompressorin kierrosnopeutta muutettaessa järjestelmän paineet muuttuivat jälleen.

PID-säätimiksi tarkoitetut komponentit jätettiin näytöiksi osoittamaan paineantureiden jännitteet ja Fidelixin PI-säätö viritettiin toimimaan alkuperäisten painesäätimien tilalle. Muutoksen jälkeen säätimet pystyvät pitämään järjestelmän osien

paineet 0,5 baarin sisällä asetusarvosta riippumatta kompressorin kierrosnopeudesta. Muutos mahdollistaa myös asetusarvon muuttamisen Fidelixin kosketusnäytöltä, minkä vuoksi laitteiston testaaminen erilaisilla paineilla helpottui.

5.2 CCMT 2 -paisuntaventtiili, tulistuksensäädin

Höyrystimelle kylmäainetta syöttävää paisuntaventtiiliä säädetään tulistuksen perusteella. Höyrystimen jälkeiseen putkeen on asennettu lämpötila-anturi, joka mittaa putken pintalämpötilaa. Tämän lämpötilan voidaan olettaa kuvastavan putkessa virtaavan kylmäaineen lämpötilaa, kun anturi on asennettu paisuntaventtiilin valmistajan antamien ohjeiden mukaan. Höyrystimen jälkeen asennetun paineurin antaman paineen perusteella säädin määrittää höyrystymislämpötilan käytössä olevalle kylmäaineelle. Höyrystimen jälkeisen kylmäaineen lämpötilan ja höyrystymislämpötilan erotuksesta saadaan saavutettu tulistus. Paisuntaventtiili pyrkii pitämään tulistuksen asetusarvossa avaamalla venttiiliä, mikäli tulistus kasvaa ja sulkemalla, jos tulistus on liian pieni.

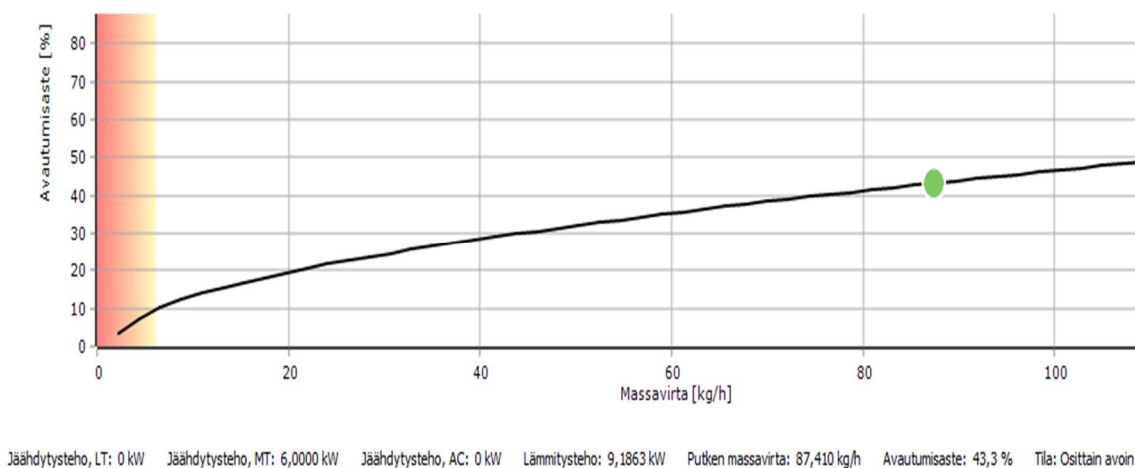
Tulistus täytyy säätää hiilidioksidikoneistossa suureksi. Pienin sallittu imukaasuntulistus on 10 kelviniä ja suositeltava tulistus jopa 20 kelviniä. Tulistusta laskettaessa on varmistuttava, että öljyn lämpötila pysyy yli +20 °C:ssa ja kuumakaasun lämpötila ei laske alle minimin, tässä 78 °C. (15, s. 6/27.) Paisuntaventtiili ohjelmoitiin säätämään tulistus 15 kelviniin.

Ensimmäisten koekäyttöjen aikana tulistuksen säätö ei toiminut halutulla tavalla eikä se pystynyt pitämään tulistusta halutussa arvossa. Tulistus vaihteli 30 ja 50 kelvinin välillä. Selvittelyssä huomattiin, että säätimeen oli jäänyt päälle tehdasasetus, joka rajoittaa säätimen toimintaa. Asetus MOP (maximum operating pressure) oli asetettu arvoon 20 baaria, jolloin hiilidioksidin lämpötila on vain –17,9 °C. Asetus muutettiin niin ettei säätimessä ole rajoituksia, koska haluttu höyrystymislämpötila on –10 °C, jolloin järjestelmän paine on noin 25,5 baaria ylipainetta. Muutoksen jälkeen säädin alkoi toimimaan halutulla tavalla.

Venttiili pystyy säätämään ja pitämään tulistuksen halutussa arvossa. Jos paisuntaventtiilin säädön laittaa käsiohjaukselle ennen kuin haluttu tasapainotila on

saavutettu, tulistus ei hakeudu halutuksi vaan nousee liian korkeaksi. Tulistuksen noustessa myös kuumakaasun lämpötila nousee. Kuumakaasun lämpötila on 6 kW:n tasapainotilassa noin 115 °C.

Mitoitusohjelmasta saatu avautumisaste paisuntaventtiilille on 6 kW:n kylmäteholla 43,3% (kuva 15). Koekäytössä, suunnitellulla –10 °C:n höyrystymislämpötilalla ja 6 kW:n kylmäteholla tasapainotilanteessa, 15 kelvinin tulistus saavutettiin paisuntaventtiilin avautumisasteen ollessa 40%. Simuloinnin tulokset ovat riittävän tarkkoja mutta on muistettava, että se on tehty valmiin putkiston mittojen mukaisesti.



KUVA 15. Paisuntaventtiilin avautumisaste 6 kW:n mitoituksessa

5.3 Vakiopainesäätimet

Vakiopainesäätiminä toimivien venttiileiden avulla pidetään yllä haluttuja paineita kierron eri osissa. Kaasunjäähdyttimen ja nestesäiliön välissä oleva venttiili ylläpitää kaasunjäähdyttimen painetta. Coolselector 2 -ohjelmalla voidaan mitoittaa laitteisto optimaalisella kaasunjäähdyttimen paineella. Tämä on suotavaa laitteistoihin, jotka tulevat oikeaan jäähdytyskäyttöön. Tästä opetuskäyttöön suunnitellusta laitteesta saatava energian säästö on pienen kokonsa ja alhaisten käyttötuntiensä vuoksi mitätön. Laitteiston tarkoituksena on havainnollistaa selkeästi ja mahdollisimman yksinkertaisesti hiilidioksidikoneikon toimintaa. Tämän vuoksi

optimaalisen kaasunjäähdyttimen paineen säätäminen ei ole tarkoituksenmukaista.

Eri laskentaohjelmat ilmoittavat optimipaineeksi hieman eri arvoja. Käyttöön tulevista koneissa kaasunjäähdyttimen paineeksi kannattaa asettaa 2–3 baaria optimaalista painetta korkeampi paine, koska se vakauttaa säätöä. (15, s. 9/27.) Kaasunjäähdyttimen paineeksi säädettiin noin 90 baaria, joka on lähellä optimaalista 89,37 baarin painetta. PID-säätimeen ohjelmoitu säätö ei toiminut tasaisesti kompressorin kierrosnopeutta muutettaessa, joten säädön asetuksia täytyi muuttaa eri mitoitusilanteissa. Kun säätö muutettiin toimimaan Fidelixin PI-säätimen kautta, säädin pitää kaasunjäähdyttimen paineen halutussa arvossa huolimatta siitä kuinka suurella kierrosnopeudella kompressoria käytetään.

Nestesäiliön painetta säätää bypass-putkessa oleva vakiopaineventtiili. Ylikriittisessä prosessissa kaasunjäähdytyksen jälkeisessä paineen laskussa fluidista muodostuu sekä nestettä että höyryä. Neste ajetaan normaalisti höyrystimeen ja nestesäiliöön muodostunut kaasu ohjataan bypass-kiertoa pitkin kompressorin imujohtoon. Kaasun ominaistilavuus on huomattavasti nestettä suurempi, minkä vuoksi sen kulkeutuminen paisuntaventtiilin läpi heikentäisi venttiilin kylmätehoa huomattavasti, koska valittu paisuntaventtiili ei läpäise tarvittavaa massavirtaa käytettävissä olevalla paine-erolla.

Myymälöiden kylmälaitoksissa käytetään varaajan paineena yleisesti 38 baaria. Varaajan paine määrittyy jonkinlaisena kompromissina. Höyrystimen paisuntaventtiilille täytyy varmistaa riittävä paine-ero, jotta kylmäaine virtaa sen läpi. Varaajan paineen lasku nostaa entalpiaeroa höyrystimessä mutta paineen laskua rajoittaa kylmäkalusteiden korkea höyrystymispaine. Kylmäkalusteiden höyrystymispaine on -8 °C :ssa noin 27 baaria ja pakastekalusteiden -30 °C :ssa noin 13 baaria. Varaajan paineen nosto puolestaan laskee entalpiaeroa höyrystimessä ja lisää bypass-virtauksen nesteosuutta. (15, s. 17/27.)

Nestesäiliön paineeksi säädetään noin 40 baaria. Paineensäätimessä ilmenee sama ohjelmointivirhe kuin kaasunjäähdyttimen paineensäätimessä. Säätimen

vaihdon jälkeen paine pysyy tasaisena ja sen muuttamisesta tuli helppoa. Asetusarvoa pystytään muuttamaan fidelixin näytöltä, jossa paineen asetusarvolle on oma ”ruutunsa”, johon arvo syötetään.

5.4 Kompressori

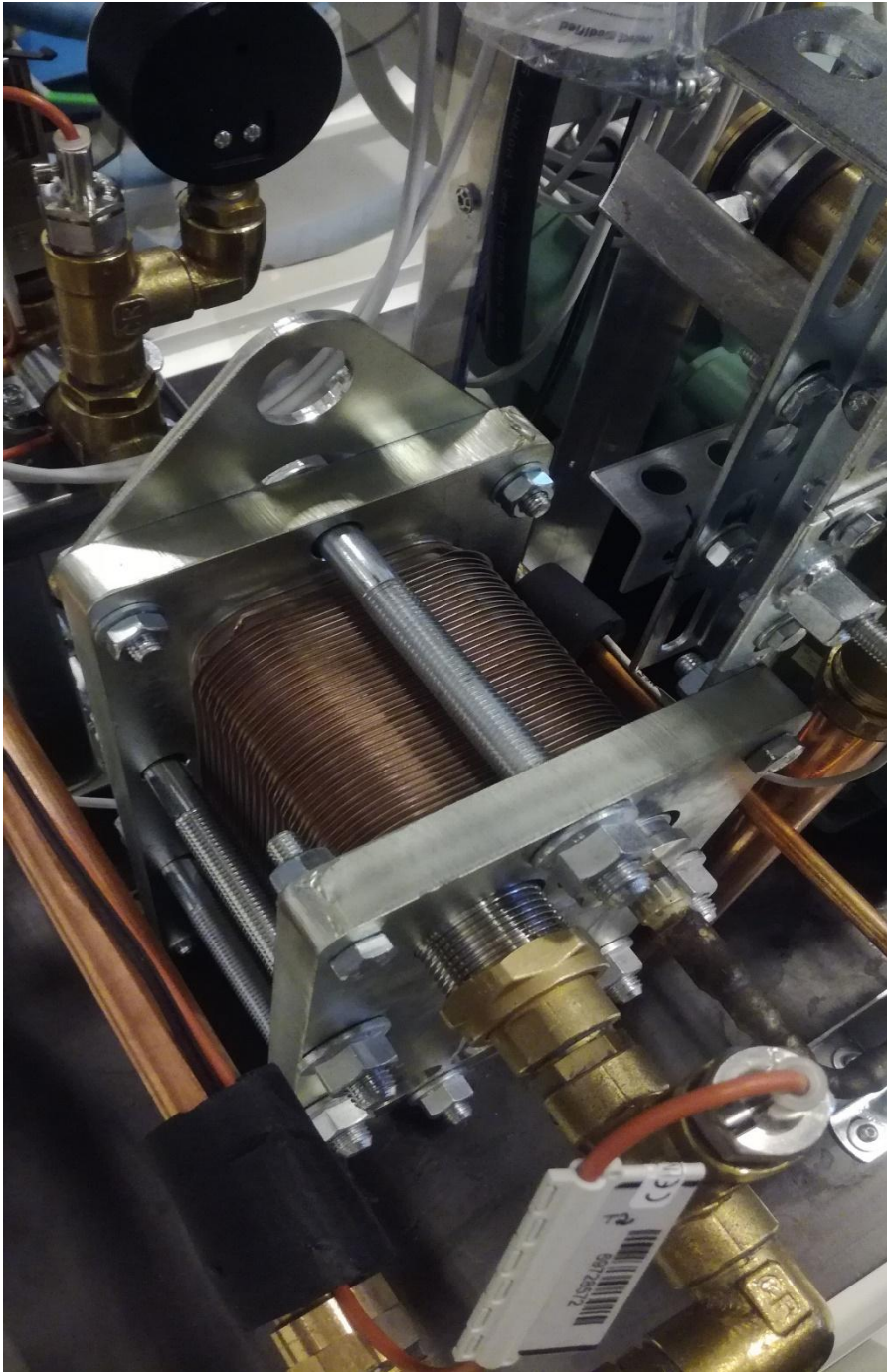
Laitteistossa on Bitzer 2MTE-5K -kompressori. Kompressorin suoritusarvojen määrittelyyn käytetään valmistajan selainpohjaista valintaohjelmaa. Käytettävissä sovelluksessa ei ole mahdollista valita Bypass-kiertoa huomioivaa mitoitusta. Bypass-virtaus heikentää kompressorin kylmätehoa, minkä vuoksi ohjelmasta saatava kompressorin käyttötaajuus ei vastaa haluttua kylmätehoa laboratorion koneessa. Kompressoreita myyvän liikkeen edustaja kertoi heillä olevan käytössään sovellus, jolla kaasunohituslinja voidaan mitoittaa mutta sitä ei päästy hyödyntämään tässä työssä.

6 kW:n kylmäteholla mitoitushjelma antaa käytettäväksi taajuudeksi 47,0 Hz (liite 3). Mitoitusarvoilla laite saavuttaa 6 kW:n kylmätehon ja halutun tasapainotilan kompressorin käyttötaajuuden ollessa 52,4 Hz. 9 kW:n kylmäteho olisi ohjelman mukaan saavutettavissa käytettäessä kompressoria 68,0 Hz:n taajuudella mutta laitteemme vaatisi korkeamman taajuuden Bypass-kierron vuoksi, joten 9 kW:n teho on perusmitoituksella saavuttamattomissa. Kaasunjäähdyttimen jälkeisen lämpötilan laskeminen pienentää bypass-virtausta ja lisää kylmätehoa, mikä mahdollistaa laitteelta myös 9 kW:n kylmätehon. Yli 50 Hz:n taajuudet ovat laitteelle sallittuja, koska samaa kompressoria myydään myös maissa, joiden sähköverkon käyttösähkön taajuus on 60 Hz.

Kompressorimitoitushjelmaa yritettiin soveltaa säätämällä mitoitusta Danfoss Coolselector 2 -ohjelmasta ja Simple CO₂ -ohjelmasta saatavien höyrystimen massavirtojen perusteella. Höyrystimen massavirraksi saatiin muiden ohjelmien avulla noin 89 kg/h. Kompressorin mitoitushjelma antaa samalla massavirralla höyrystimen kylmätehoksi 4,71 kW, vaikka se koekäyttöjen perusteella onkin noin 6 kW. Kompressorimitoitushjelmasta ei saada hyödynnettäviä tuloksia edes soveltamalla.

5.5 Kaasunjäähdytin

Kaasunjäähdytin on Alfa Laval AXP27-40H-F levylämmönsiirrin (kuva 16). Kaasunjäähdyttimen kylmäainepuolen mitoitus käsiteltiin kohdassa 6.1 Putkiston mitoitus ohjelmalla. Valmistajan mitoitus on vuodelta 2017, jolloin laitoksen komponentteja valittiin ja mitoitettiin. Mitoituksessa käytettyjen arvojen ja jäähdytyksessä käytettävän aineen muuttuminen on tehnyt mitoituksesta suuntaa antavan, eikä siitä saatavia tietoja voida hyödyntää nyt tehtävissä koekäytöissä.



KUVA 16. Kaasunjäähdytin Alfa Laval AXP27-40H-F

Kaasunjäähdytys tehdään vedellä, joka virtaa kaasunjäähdyttimen jälkeen energiamittarin läpi (kuva 17). Energiamittari antaa veden virtaaman ja lämpötilatietojen lisäksi energiamäärän, joka jäähdytysvedeen on siirtynyt. Tiedot voidaan lukea joko energiamittarista tai fidelixin kosketusnäytöltä.

6 LAITE OPETUSKÄYTÖSSÄ

Hiilidioksidilla toimivan kylmälaitteen teoriaa on opetettu Oulun ammattikorkeakoulussa jo aiemmin kurssilla Teollisuuden kylmätekniikka. Kurssilla perehdytään myös ammoniakkilaitoksen sekä kaskadilaitoksen periaatteisiin.

6.1 Laboratorioharjoitus

Tämän opinnäytetyön yhtenä tavoitteena on tehdä laboratorioharjoitus, jossa opiskelijat hahmottavat prosessin toiminnan yksinkertaisen kylmälaitteen avulla. Opiskelijat perehtyvät laitteen teoriaan, komponentteihin ja varolaitteisiin ennen koneen käynnistämistä. Sisäistettyään laitteen turvallisen käynnistämisen ja käytön edellytykset he pyrkivät säätämään koneen kylmätehon tasapainoon lämpökuorman kanssa. Alkuperäisenä ajatuksena mitoitustilanteita olisi ollut kolme mutta koeajoissa huomattiin, ettei se ole järkevän aikataulurakenteen ja koneen suorituskyvyn puitteissa mahdollista. Paras tasapainotila saavutetaan 6 kW:n kylmäteholla.

Käynnistettyään koneen opiskelijoiden täytyy säätää prosessin kannalta merkittävät arvot työn ohjeessa määritellyiksi. Säädettyään prosessin tasapainoon opiskelijat mittaavat höyrytimeen syötetyn ja kaasunjäähdyttimestä saadun energian laskemiseen tarvittavat virtaamat ja lämpötilat. He kirjaavat mittauspöytäkirjaan prosessin lämpötilat ja paineet, joiden avulla he piirtävät log-ph-piirroksen. Raportissa opiskelijat määrittävät laskemalla laitteiston kylmä-, kompressorin- ja kaasunjäähdyttimen tehot sekä vertaavat niitä mitattuihin tehoihin. He selostavat laitteiston toimintaperiaatteen ja tunnistavat ja nimeävät laitteiston komponentteja. Opiskelijat simuloivat prosessin myös Simple CO₂-ohjelmalla. He laskevat ohjelmaan tarvittavan kompressorin isentrooppisen hyötysuhteen piirtämästään log-ph-piirroksesta saatavien entalpioiden avulla. Ohjelmasta saatua kylmäkerrointa verrataan tehoista ja log-ph-piirroksesta laskettuihin arvoihin ja pohditaan niissä olevien erojen syytä sekä merkitystä.

Harjoitusta ohjaava opettaja jakaa opiskelijaryhmille erilaiset lähtöarvot, joilla laitetta käytetään. Merkittäviä muutoksia lähtöarvoissa ovat kaasunjäähdyttimen jälkeisen fluidin lämpötila, nestesäiliön ja kaasunjäähdyttimen paine sekä haluttu

Fluidin lämpötilan ollessa 35 °C kaasunjäähdyttimen jälkeen, Bypass-venttiilin avauma oli 29 % ja kompressorin käyttötaajuus oli 52,4 Hz. Jäähdytysveden menolämpötila oli 33 °C ja paluuveden 45,6 °C. Jäähdytysveden menolämpötila laskettiin 29,5 °C:seen, jolloin kaasunjäähdyttimestä lähtevän fluidin lämpötila taantui 31,4 °C:seen. Kaasunohitusventtiilin avauma putosi 24 %:iin ja -10 °C:n höyrystymislämpötilan saavuttamiseksi kompressorin taajuutta piti laskea 46,3 Hz:iin.

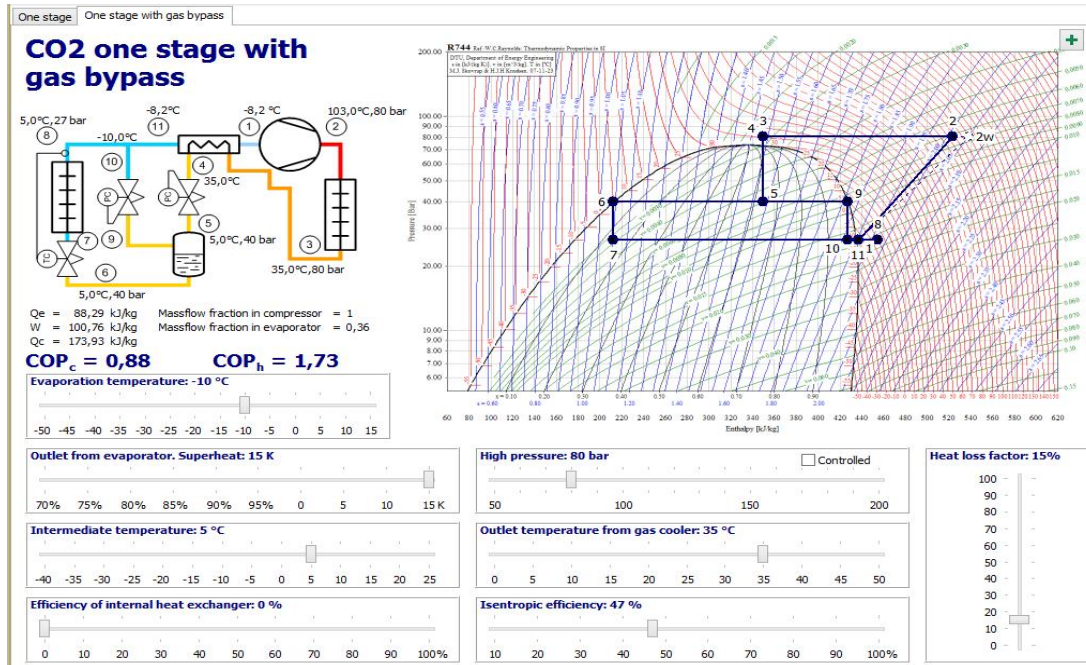
Toisessa testauksessa kaasunjäähdyttimen jälkeistä lämpötilaa laskettiin noin 25 °C:seen, jolloin tasapainotila -10 °C:n höyrystymislämpötilalla saavutettiin 40 Hz:n taajuudella. Kompressorin ja taajuusmuuttajan yhteenlaskettu teho putosi alkuperäisen mitoituksen mukaisesta 4298 watista 3373 wattiin. Kylmäkerroin nousi siis noin 1,40:stä noin 1,78:aan. Näillä tehoilla laskettu kylmäkerroin on liian pieni, koska taajuusmuuttajan ottama teho on arvossa mukana.

Kaasunjäähdytyksen vaikutusta kylmätehoon kokeiltiin vielä jäähdyttämällä fluidi 20 °C:seen. Kompressorin ottoteho laski 3373 watista vain 3315 wattiin ja sen käyntitaajuutta voitiin laskea 0,6 Hz. Vaikka suljetaankin pois mittausvirheet ja testauksien välissä laitteen mahdollisen vuotamisen seurauksena muuttunut kylmäainetäytös, voidaan olettaa, että jäähdytyksen vaikutus on suurempi lämpötila-alueella, jossa fluidin entalpia muuttuu suhteessa enemmän. 40 °C:n ja 35 °C:n välillä 90 baarin paineessa hiilidioksidin entalpia laskee 345,3:sta 299,9:ään, jolloin muutos on -45,4 kJ/kg. 25 °C:n ja 20 °C:n välillä muutos on vain 16,05 kJ/kg. Eri lämpötiloilla tehtyjen mittausten tulokset ovat taulukoituna liitteessä 4.

6.2.2 Kaasunjäähdyttimen paineen vaikutus

Laitetta testattiin myös erilaisilla kaasunjäähdyttimen- ja nestesäiliön paineilla. Kaasunjäähdyttimen paineeksi pystytään laskennallisesti määrittämään optimaalinen arvo, joka cool selector 2 -ohjelman mukaan on tälle laitteelle 89,37 baaria. Laitetta testattiin laskemalla kaasunjäähdyttimen paine 80 baariin, jolloin huomattiin koneen kylmätehon laskevan. Simple CO2 -ohjelman mukaan laitteen kylmäkerroin putosi 1,41:stä 0,88:aan (kuva 19). Suureen muutokseen vaikuttaa suuri fluidin entalpian muutos, kun painetta pudotetaan mutta kaasunjäähdyttimen jäl-

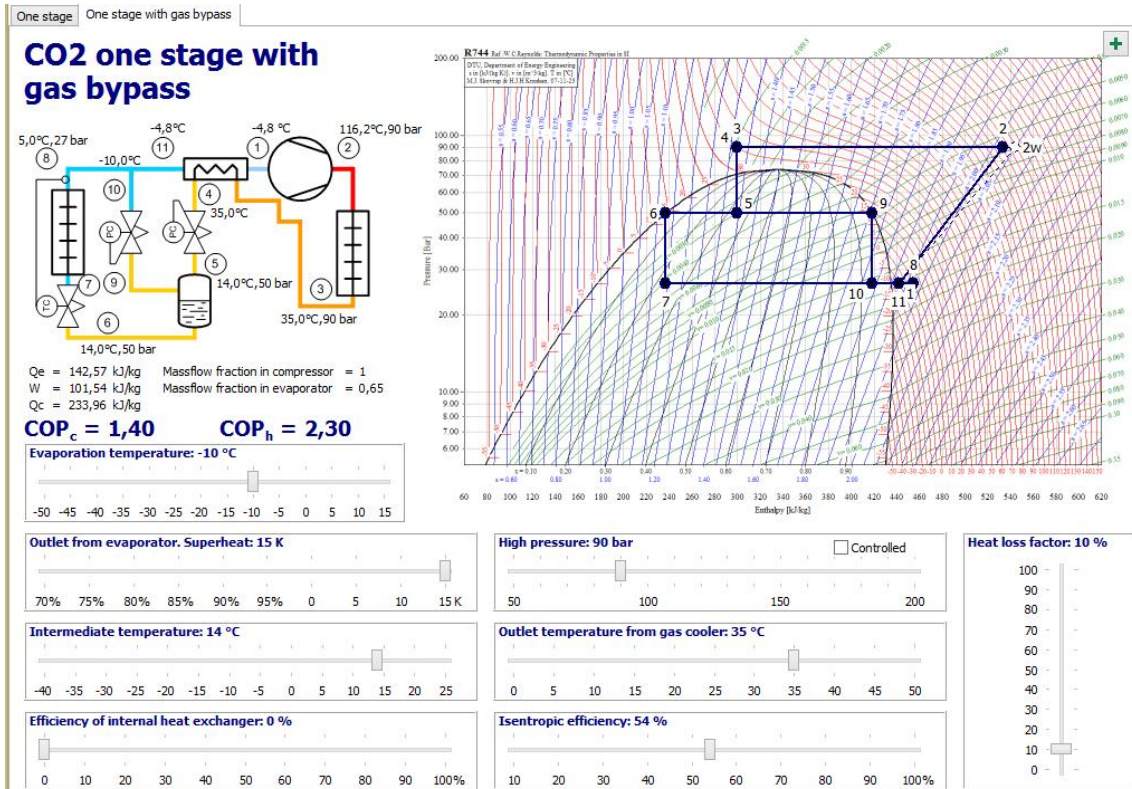
keinen lämpötila pidetään vakiona. Tämä on havaittavissa helposti log-ph -piirroksista, jossa kriittisen pisteen yläpuolella lämpötilaa osoittavat viivat menevät lähes vaakasuoraan. Pudotus lisäsi bypass-virtausta, mikä heikentää laitteen kylmätehoa.



KUVA 19. Kaasunjähdyttimen paine 80 baaria Simple CO₂ -ohjelmalla

6.2.3 Nestesäiliön paineen vaikutus

Nestesäiliön paineena käytetään yleisesti 38 baaria. Laitetta testattiin nostamalla nestesäiliön paine 50 baariin. Muutos pienensi bypass-linjan virtausta mutta samalla myös höyrystimen entalpia eroa. Laitteen kylmäteho ja hyötysuhde pienentyivät mutta vaikutus ei ollut yhtä suuri kuin kaasunjähdyttimen paineen muutoksella. Kuvassa 20 linja pisteestä 6 pisteeseen 9 kuvastaa nestesäiliön olosuhteita. Säiliön painetta nostettaessa pisteet 6 ja 9 siirtyvät kyllästyskäyrillä ylöspäin, jolloin piste 7 liikkuu oikealle. Piste 7 liikkeestä huomataan höyrystimessä tapahtuvan entalpian muutoksen pienentyvän.



Kuva 20. Nestesäiliön paine 50 baaria Simple CO₂ -ohjelmalla

6.3 Simple CO₂ -ohjelma

Laitteiston toimintaa ja muutosten vaikutusta prosessiin on helppo mallintaa Simple CO₂ -ohjelmalla. Kuvassa 19 on ohjelmaan syötetty tämän laitteen mitoitustilanne. Ohjelmassa on pieniä eroja todellisuuteen, kuten imukaasun lämpötila bypass-haaran jälkeen. Tilannetta voi kuitenkin hieman kompensoida lämpöhäviökerrointa muuttamalla. Kompressorin isentrooppinen hyötysuhde saadaan laskemalla se entalpioiden avulla tai säätämällä kuumakaasun lämpötila yhtä suureksi laitteistosta mitatun lämpötilan kanssa.

7 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli tehdä hiilidioksidikylmälaitteelle käyttöönotto ja luoda laitteen toimintaan perehdyttävä laboratorioharjoitus Oulun ammattikorkeakoulun tulevien tekniikan opiskelijoiden opetusmateriaaliksi. Käyttöönottoon liittyen koneen toiminta simuloitiin ohjelmalla, josta saatiin tarvittavat parametrit säätölaitteiden säätämiseksi.

Käyttöönottoon liittyvä dokumentointi jäi tämän koneen osalta harmillisen mitättömäksi. Laitteistojen parissa työskenteleviin ammattilaisiin kohdistamani yhteydenotot eivät herättäneet kiinnostusta opinnäytetyötäni kohtaan ja tietoverkoista ei ollut saatavilla esimerkkejä tarvittavien dokumenttien rakenteesta tai sisällöstä. Direktiivien vaikeaselkoisuus ja tulkinnanvaraisuus sekä selkeiden toimintaohjeiden vähäisyys johti päätelmään, jonka mukaan nämä asiat opitaan käytännön kautta.

Laitteiston suunnittelu ja kehittäminen on aloitettu jo useita vuosia sitten. Sen mitoituksesta on tehty aikaisemmin opinnäytetyö. Laitteiston osia on tilattu pikkuhiljaa sitä mukaa kun niitä on saapunut markkinoille. Laitteen kehittäjät ja rakentajat ovat vaihtuneet projektin aikana. Laitteiston suunnitteluarvot ja lopulliset toiminta-arvot ovat vaihtuneet riippuen tekijästä tai dokumentista, minkä vuoksi tämän työn aikana samat mitoitukset ja tekstit on muokattu useaan kertaan.

Laitteiston koekäytöt ja viritys toivat esille sen toiminnassa olevia puutteita ja kehityskohtia. Säätimien toiminnassa havaitut ongelmat saatiin korjattua mutta korjauksesta johtuvien viivytysten vuoksi tämän työn valmistuminen venyi hieman suunnitellusta aikataulusta.

Laitteiston valmistuttua pidettiin koululla kaikille avoin esittelytilaisuus. Tilaisuuteen oli kutsuttu alan yritysten edustajia. Tilaisuudessa kävi asiasta kiinnostuneita ja joidenkin keskustelujen mukaan myös muut oppilaitokset olisivat kiinnostuneita laitteiston testaamisesta. Yritysten edustajat arvelivat tämän laitteiston olevan koluokassaan ja käyttötarkoituksessaan maan ainoa tähän asti valmistunut.

LÄHTEET

1. Kylmäaineiden jaottelu. 2015. Darment Oy. Saatavissa: <https://www.darment.fi/kylmaaine-info/kylmaaineiden-jaottelu/>. Hakupäivä 10.4.2019.
2. Hannula, Petri 2016. Uusi F-kaasuasetus ja kylmäaineet. Suomen kylmäyhdistys ry. Saatavissa: https://cdn2.hubspot.net/hubfs/1556961/Suomen_myy%C3%A4l%C3%A4kaluste/Uusi_F_kaasuasetus_ja_kylmaaineet_10052016_Final.pdf?t=1507895398459. Hakupäivä 10.4.2019.
3. Kapanen, Mika 2017. Kylmäainetilanne 2017. Suomen kylmäyhdistys ry. Saatavissa: <https://docplayer.fi/56878132-Suomen-kylmayhdistys-ry.html> Hakupäivä 10.4.2019.
4. HCFC-yhdisteet, ohjeita kiinteistön omistajalle 2016. Saatavissa: <https://www.ymparisto.fi/HCFC> Hakupäivä 10.4.2019.
5. Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EU) N:o 517/2014. 2014. Saatavissa: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R0517&from=fi>. Hakupäivä 23.2.2019.
6. Painelaite ja pätevyyskoulutus. 2002. Koulutusmateriaali. Suomen kylmäyhdistys ry.
7. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2014/68/EU. 2014. Saatavissa: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014L0068&from=fi>. Hakupäivä 10.3.2019.
8. Hakala, Pertti – Kaappola, Esko 2013. Kylmälaitoksen suunnittelu. 3. Helsinki: Opetushallitus.
9. Jokela, Matti. Hiilidioksidista takaisin hiilidioksidiin. Kehittyvä elintarvike 05/2010. Verkkolehti. Saatavissa: <http://kehittyvaelintarvike.fi/lehdet/2010/5.pdf> Hakupäivä 1.5.2019
10. Kylmäaine R744 on käytössä hyvä muttei ongelmaton. Darment Oy. Saatavissa: <https://www.darment.fi/kylmaaine-info/kylmaaine-r744/> Hakupäivä 11.4.2019.

11. Niskala, Mikko 2018. 5Y00BC44-3002 Teollisuuden kylmäteknikka 3 op. Opintojakson luennot syksyllä 2018. Oulu: Oulun ammattikorkeakoulu, Energia ja automaatio -osasto.
12. Kriittinen piste (termodynamiikka). 2013. Wikipedia. Saatavissa: [https://fi.wikipedia.org/wiki/Kriittinen_piste_\(termodynamiikka\)](https://fi.wikipedia.org/wiki/Kriittinen_piste_(termodynamiikka)) Hakupäivä 11.4.2019.
13. Muuronen, Mikko 2016. Hiilidioksidin (CO₂) käyttö kylmäaineena, kylmälaitostyyppit ja kylmälaitoksen mitoitus. Insinööri työ. Helsinki: Metropolia Ammattikorkeakoulu, talotekniikan tutkinto-ohjelma.
14. Kylmälaitosten asennuksen ja käyttöönoton painelaitevaatimukset. 2012. Saatavissa: https://tukes.fi/artikkeli/-/asset_publisher/kylmalaitosten-asennuksen-ja-kayttoonoton-painelaitevaatimuks-1. Hakupäivä 21.2.2019.
15. Silvan, Lasse. 2019. Hiilidioksidijärjestelmän suunnittelu. Suomen kylmäyhdistys ry.



KAASUN JÄÄHDYTTIN

Brazed Plate Heat Exchanger

Tekninen erittely

Malli : AXP27-40H-F

Item name :

Päiväys : 17.3.2017

Yksikköjärjestelmä

: 1

		Kuuma puoli Primary side(S4) Carbon dioxide	Kylmä puoli Secondary side 40.0% Eth.
Neste			
glykoli			
Virtausmäärä	kg/s	0.09783	0.5589
Fluid Condensed/Vapourized	kg/s	0.000	0.000
Lämpötila sisään	°C	85.0	25.0
Dew p.	°C		
Lämpötila ulos(vapor/liquid)	°C	32.0	35.0
Operating pressure(Sisään/Ulos)	bara	82.0/81.9	
Painehäviö	kPa	7.11	43.4
Velocity connection(Sisään/Ulos)	m/s	6.67/1.59	0.749/0.752
Heat exchanged	kW	20.00	
Lämpöpinta-ala	m ²	0.95	
Lämmönläpäisykerroin, puhdas	W/(m ² *K)	1776	
Lämmönläpäisykerroin, likainen	W/(m ² *K)	1492	
Fouling resistance*10000	m ² *K/W	0.0	
Marginaali	%	19.1	
Mean Temperature Difference	K	14.1	
Nesteiden virtaussuunta		Vastavirtaan	
Vaiheiden lukumäärä		2	2
Materialplate/ brazing		Alloy 316 / Cu	
LiitäntäS1 (Kylmä-Ulos)		Threaded (External)/ 1 1/4" ISO 228/1-G (V24)	
Alloy 304			
LiitäntäS4 (Hot-Sisään)		Soldering/ 1/2" (H24XP) Alloy 304	
LiitäntäT1 (Kylmä-Sisään)		Threaded (External)/ 1 1/4" ISO 228/1-G	
(V24) Alloy 304			
LiitäntäT4 (Hot-Ulos)		Soldering/ 1/2" (H24XP) Alloy 304	
Painelaitekoodi		PED	
Rakennepaine at -20.000000 Celsius	Bar	130.	130.
Rakennepaine at 150.000000 Celsius	Bar	130.	130.
Rakennelämpötila	°C	-20.0/150.0	
Kokonaispit. x lev. x kork.	mm	199 x 160 x 362	
Nettopaino tyhjä/täynnä	kg	26.0 / 28.0	
Package length x width x height	mm	x x	
Package weight	kg		
Price PPL incl Extras		1960 EUR	
-Unit		1960.41 EUR	

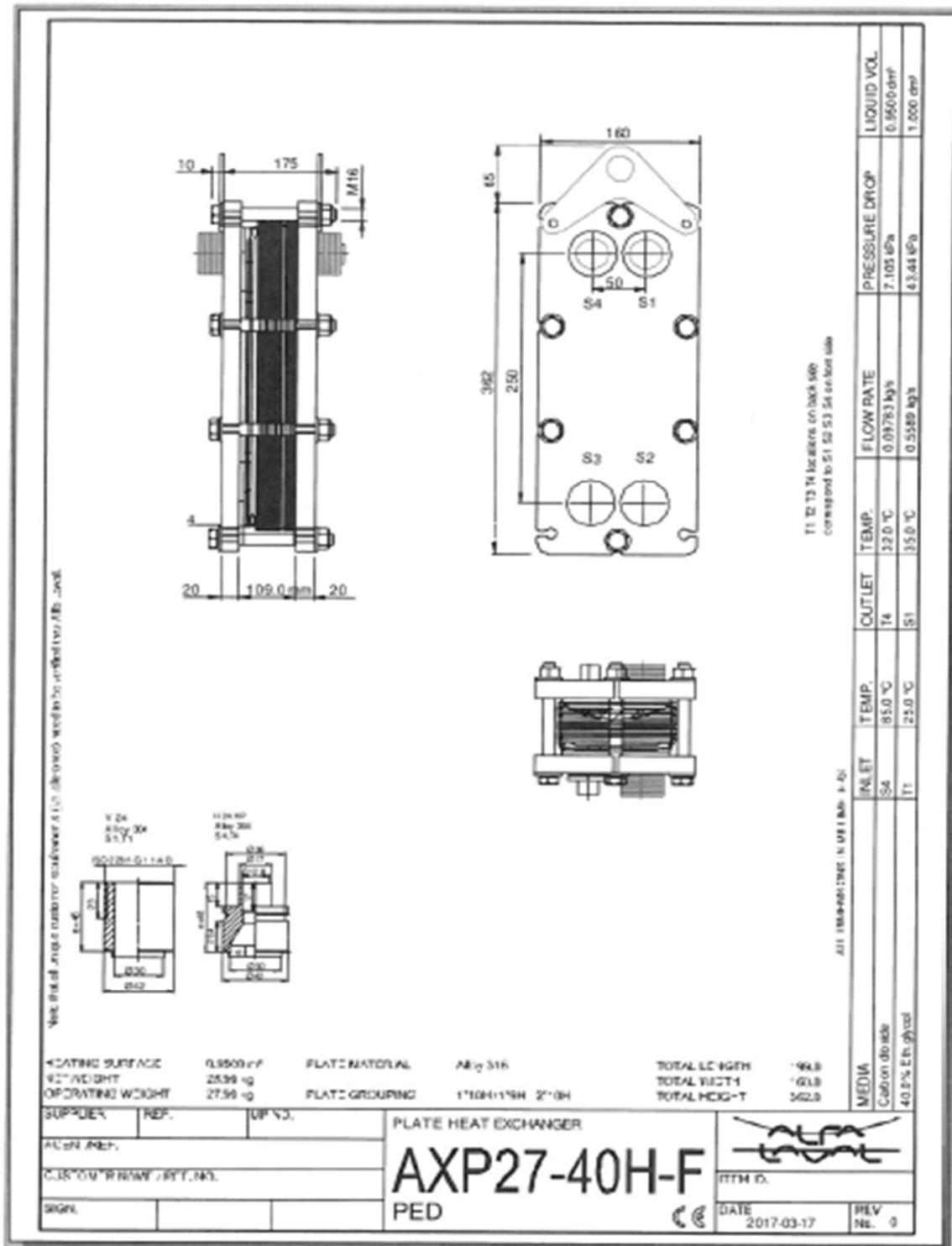
Performance is conditioned on the accuracy of customers data and customers ability to supply equipment and products in conformity therewith.

Program version – 5.62, Rating 2-Phase

/17.3.2017/13.34.23jp.

Physical Properties

(inlet/outlet)	Kuuma puoli Neste	Höyry	Kylmä puoli Neste	Höyry
Dens	160.1/670.9		1056/1052	
Ominaislämpökapasiteetti		1.475/6.243		3.564/3.593
Visc	0.0203/0.0523		2.56/1.94	
Th.Cond	0.0285/0.0764		0.452/0.452	





HÖYRYSTIN

Brazed Plate Heat Exchanger

Tekninen erittely

Malli : CBXP27-20H-F
 Item name : Höyrystin
 Yksikköjärjestelmä

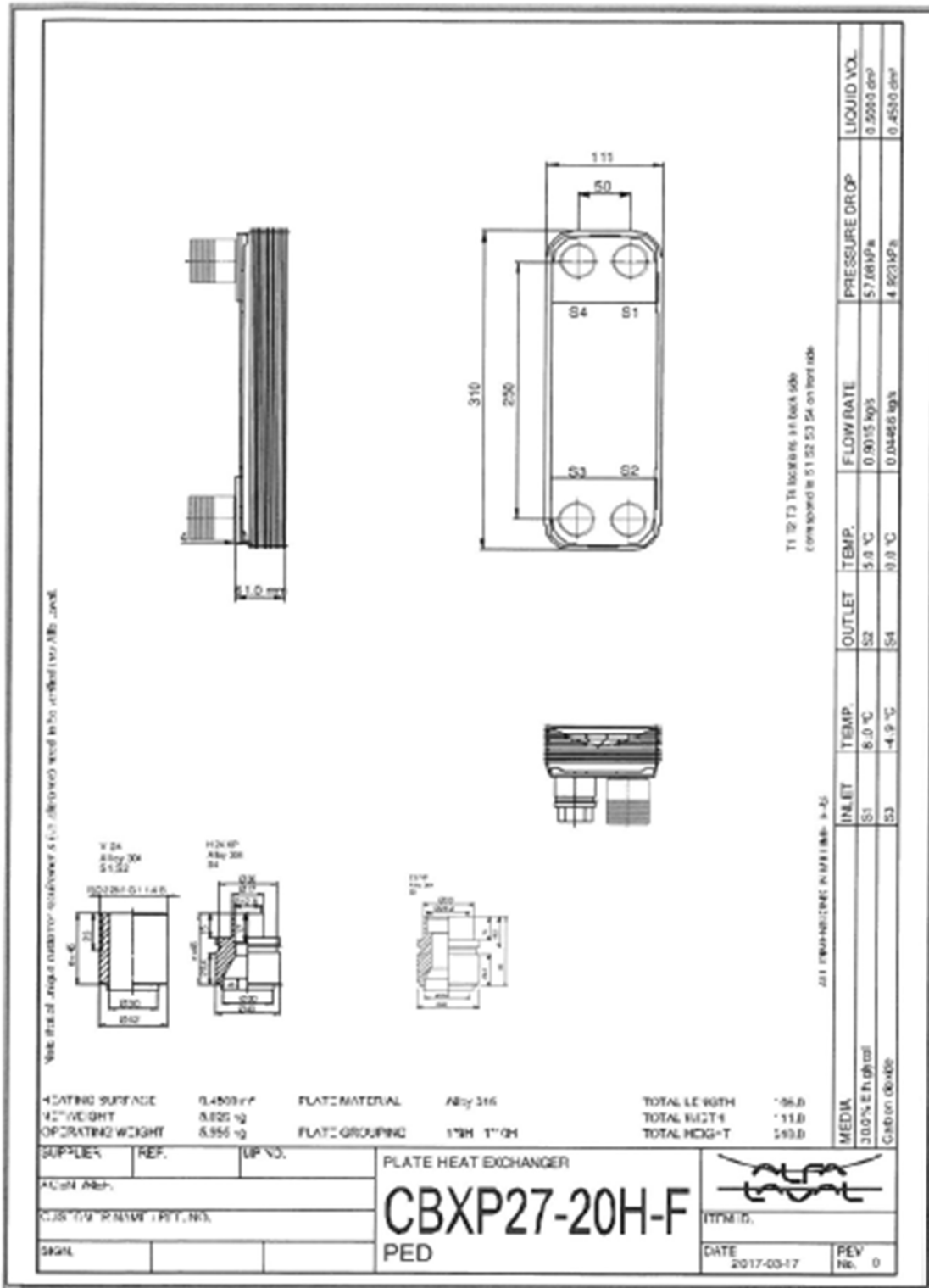
Päiväys : 17.3.2017
 : 1

		Kuuma puoli Secondary side	Kylmä puoli Primary
side(S4)			
Neste		30.0% Eth. glykoli	Carbon dioxide
Virtausmäärä	kg/s	0.9015	0.04466
Fluid Condensed/Vapourized	kg/s	0.000	0.03930
Lämpötila sisään	°C	8.0	-4.9
Dew p.	°C		<u>-5.0</u>
Lämpötila ulos(vapor/liquid)	°C	5.0	<u>0.0</u>
Operating pressure(Sisään/Ulos)	bara	/	30.6/30.5
Painehäviö	kPa	57.1	4.92
Velocity connection(Sisään/Ulos)	m/s	1.22/1.22	0.277/6.33
Heat exchanged	kW	10.00	
Lämpöpinta-ala	m ²	0.45	
Lämmönläpäisykerroin, puhdas	W/(m ² *K)	3835	
Lämmönläpäisykerroin, likainen	W/(m ² *K)	2756	
Fouling resistance*10000	m ² *K/W	0.0	
Marginaali	%	39.1	
Mean Temperature Difference	K	8.1	
Nesteiden virtaussuunta		Vastavirtaan	
Vaiheiden lukumäärä		1	1
Materialplate/ brazing		Alloy 316 / Cu	
LiitäntäS1 (Hot-Sisään)		Threaded (External)/ 1 1/4" ISO 228/1-G (V24)	
Alloy 304			
LiitäntäS2 (Hot-Ulos)		Threaded (External)/ 1 1/4" ISO 228/1-G (V24)	
Alloy 304			
LiitäntäS3 (Kylmä-Sisään)		Sold for Distributor/ 28.15 (Z57XP) Alloy 304	
LiitäntäS4 (Kylmä-Ulos)		Soldering/ 1/2" (H24XP) Alloy 304	
Painelaitekoodi		PED	
Rakennepaine at 90.000000 Celsius	Bar	90.0	90.0
Rakennepaine at 225.000000 Celsius	Bar	75.0	75.0
Rakennelämpötila	°C	-196.0/225.0	
Kokonaispit. x lev. x kork.	mm	106 x 111 x 310	
Nettopaino tyhjä/täynnä	kg	5.02 / 5.99	
Package length x width x height	mm	x x	
Package weight	kg		
Price PPL incl Extras		832 EUR	
-Unit		831.96 EUR	

Performance is conditioned on the accuracy of customers data and customers ability to supply equipment and products in conformity therewith.

Program version – 5.62, Rating 2-Phase

/17.3.2017/13.19.33jp.





Coolselector2

Projektitiedot	
Projektin nimi:	Hiiidioksidi_OAMK
Kommentit:	9kW, KJ 90bar, NS 40bar
Laatinut:	Janne Leinonen
Coolselector2 versio:	3.2.0. Tietokanta: 42.42.2.18.4.23
Tulostettu:	1. Toukokuu 2019
Käytetyt asetukset:	Kaikki sovellukset

Kuumakaasu

Käyttöolosuhteet			
Jäähdytysteho, LT:	0 kW	Jäähdytysteho, MT:	6,000 kW
Hyötysuhde, sisäinen HX:	0 -	Jäähdytysteho, AC:	0 kW
Höyrystyslämpötila:	-15,0 °C	Höyrystyslämpötila:	-10,0 °C
Höyrystymispaine:	22,93 bar	Höyrystymispaine:	26,50 bar
Hyödynnettävä tulistus:	0 K	Hyödynnettävä tulistus:	15,0 K
Lisätulistus:	0 K	Lisätulistus:	0 K
Kuumakaasun lämpötila:	-3,6 °C	Kuumakaasun lämpötila:	106,4 °C
Lämmitysteho:	9,186 kW	Putken massavirta:	149,8 kg/h
Optimaalinen kaunjäähdyttimen paine	False	Varaajan lämpötila:	5,3 °C
Paine:	90,00 bar	Varaajan paine:	40,00 bar
Min. lähtevä lämpötila:	35,0 °C	Alijäähtyminen varaajassa:	0,1 K
Järjestelmä ja putki: <i>Ylikriittinen - Paineputki</i>			

Koko putkisto

Painehäviö	0,080 bar
Kyllästyslämpötilan pudotus	0,0 K

Positio 1. Putkisto: Kuparinen supistusputki ANSI K65 5/8 x 1/2 NS 16

	Lukumäärä	1
	Painehäviö	0,002 bar
	Nopeus, sisään	1,78 m/s
	Litäntä	OK



BITZER Output data

Created on : 28.04.2019 12:37:44



	<i>CO2-kylmäkone</i> <i>Janne Leinonen</i> <i>Opinnäytetyö</i>
BITZER Software v6.10.0 rev2160	28.04.2019 / All data subject to change.
	2 / 10

Table of content

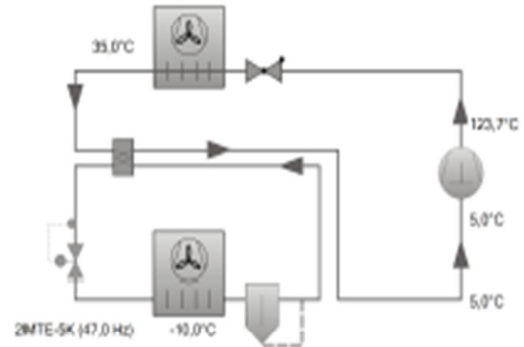
Project survey.....	3
Selection: Semi-hermetic Reciprocating Compressors.....	4
Technical Data: 2MTE-5K.....	5
Information: Semi-hermetic Reciprocating Compressors.....	6
Selection: VARIPACK.....	8
Technical Data: FEU+24.....	9
Information: VARIPACK.....	10

	CO2-ylmäkone Janne Leinonen Opinnäytetyö
BITZER Software v6.10.0 rev2160	28.04.2019 / All data subject to change.

Selection: Semi-hermetic Reciprocating Compressors

Input Values

Compressor model	2MTE-5K
Mode	Refrigeration and Air conditioning
Refrigerant	R744
Reference temperature	Dew point temp.
Evaporating SST	-10,00 °C
High pressure	Auto
Gas cooling outlet	35,0 °C
Suct. gas superheat	15,00 K
Operating mode	Transcritical
Power supply	400V-3-50Hz
Useful superheat	100%

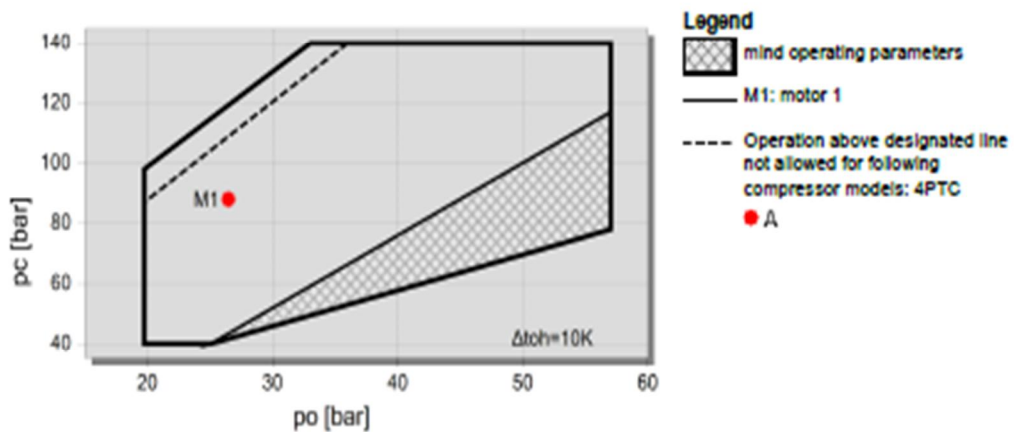



Result

Compressor	2MTE-5K-408
Frequency compressor	47,0 Hz
Cooling capacity	6,01 kW
Evaporator capacity	6,01 kW
Power Input	3,54 kW
Current (376V)	7,05 A
Gas cooler capacity	9,56 kW
COP/EER	1,70
Mass flow	141,6 kg/h
min. cooling capacity	3,58 kW (30 Hz)
max. cooling capacity	10,22 kW (75 Hz)
Discharge gas temp. w/o cooling	123,7 °C
optimal high pressure	87,7 bar(a)

Tentative Data.
Power consumption at compressor inlet.

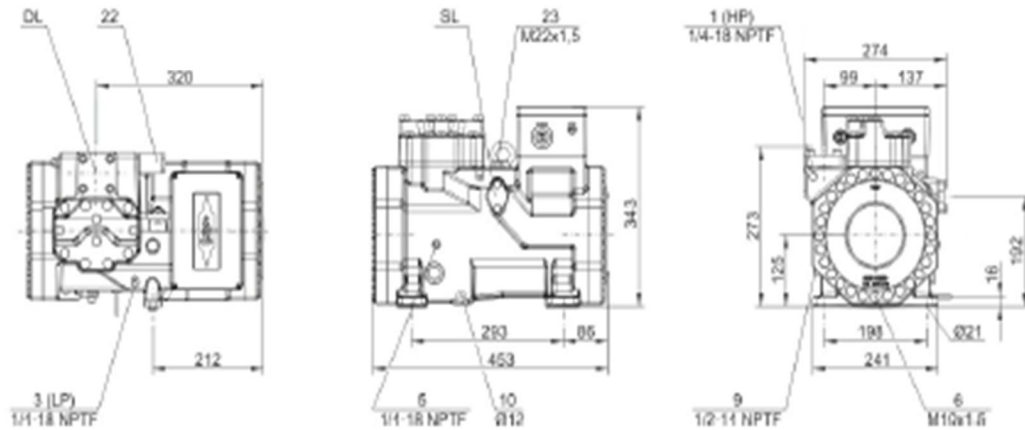
Application Limits 2MTE-5K



	CO₂-kylmäkone Janne Leinonen Opinnäytetyö
BITZER Software v6.10.0 rev2160	28.04.2019 / All data subject to change.
	5 / 10

Technical Data: 2MTE-5K

Dimensions and Connections



Technical Data

Technical Data

Displacement (1450 RPM 50Hz)	3,3 m ³ /h
Displacement (1750 RPM 60Hz)	3,9 m ³ /h
No. of cylinder x bore x stroke	2 x 30mm x 27mm
Weight	95 kg
Max. pressure (LP/HP)	100/160 bar
Connection suction line	22 mm - 7/8"
Connection discharge line	18 mm - 3/4"
Oil type R744 (CO ₂)	BSE85K (Standard), BSG68K (Option)

Motor data

Motor version	1
Motor voltage (more on request)	380-420V Y-3-50Hz
Max operating current	11.5 A
Starting current (Rotor locked)	62.0 A
Max. Power Input	6,3 kW

Extent of delivery (Standard)

Motor protection	SE-B1
Enclosure class	IP65
Vibration dampers	Standard
Oil charge	1,20 dm ³
Crankcase heater	0..120 W PTC (Standard)

Available Options

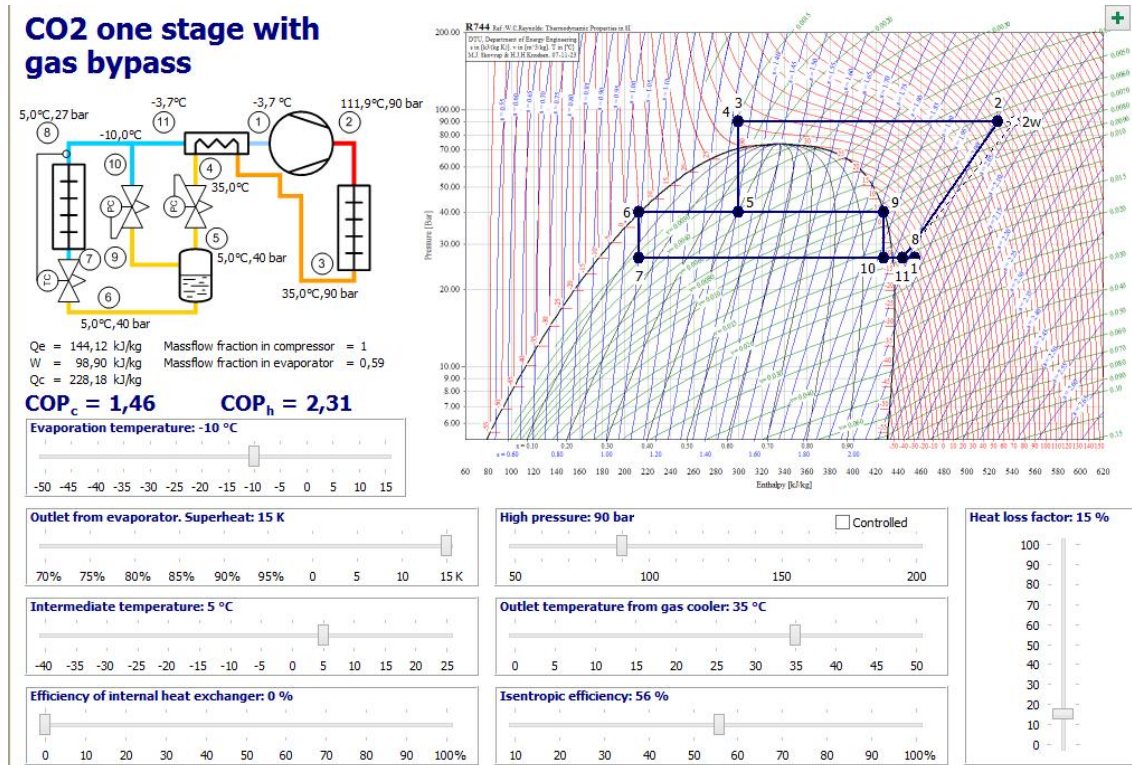
Connection suction line	Weld DN22
Discharge shut-off valve	Swagelok DN16, Braze DN16, Weld DN10

Sound measurement

	Ohjelma	Mitattu	Yksikkö	
T7, T10	-10	-10,2	°C	
P7, P10	27	25,5	bar	
Tulistus	15	14,9	K	
T8	5	5,7	°C	
T1, T11	-3,7	-2,2	°C	
T2	111,9	113,4	°C	
P3	90	89,1	bar	
T3	35	34,9	°C	
P5	40	39,8	bar	
ϕ_0	-	5,99	kW	
Pk	-	4,3	kW	
ϕ_{kj}	-	10,29	kW	summa
ϕ_{kj}	-	10,1	kW	mitattu
COPc	1,46	1,39302		
COPh	2,31	2,39302		
qm0	59		%	
Kompressorin kierrosluku		1540	rpm	
Kompressorin käyttötaajuus		52,4	Hz	
Bypassventtiilin avautuma		29	%	
Kuumakaasuventtiilin avautuma		58	%	

	Ohjelma	Mitattu	Yksikkö	
T7, T10	-10	-9,6	°C	
P7, P10	27	26,7	bar	
Tulistus	15	15,2	K	
T8	5	6,1	°C	
T1, T11	1,9	4,4	°C	
T2	119,3	119,6	°C	
P3	91	90,6	bar	
T3	20	20,1	°C	
P5	41	40,5	bar	
ϕ_0	-	5,94	kW	
Pk	-	3,32	kW	
ϕ_{kj}	-	9,26	kW	summa
ϕ_{kj}	-	8,6	kW	mitattu
COPc	2,34	1,78915663		
COPh	3,31	2,78915663		
qm0	86		%	
Kompressorin kierrosluku		1135	rpm	
Kompressorin käyttöaajuus		39,42	Hz	
Bypassventtiilin avautuma		8	%	
Kuumakaasuventtiilin avautuma		34	%	

Mittauspisteiden numerointi log-ph-piirroksessa sekä merkkien selitykset:



Φ_0 = Höyrystimen kylmäteho, joka on päätelty sähkövastuksen tehosta, kun prosessi on tasapainossa

P_k = Kompressorin ottoteho, jossa on mukana taajuusmuuttajan teho.

Φ_{kj} (summa) = Kaasunjäähdyttimen teho, joka on laskettu $\Phi_0 + P_k$.

Φ_{kj} (mitattu) = Energiamittarilla mitattu kaasunjäähdyttimen jäähdytysvedeen siirtynyt energia.