



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Anssi Korhonen

Hiilidioksidikylmäjärjestelmän putkiston ja lämmönvaihtimien mitoitus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Talotekniikka

Insinöörityö

18.3.2019

Tekijä Otsikko	Anssi Korhonen Hiilidioksidikylmäjärjestelmän putkistojen ja lämmönvaihtimien mitoitus
Sivumäärä Aika	37 sivua + 1 liite 18.3.2019
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	talotekniikka
Ammatillinen pääaine	LVI-suunnittelu
Ohjaajat	DI Rauno Virta DI Esko Kaappola yliopettaja Aki Valkeapää
<p>Kylmäainelainsäädännön tiukentuessa luonnollisten kylmäaineiden käyttö on lisääntynyt vahvasti. Muutos kylmäalalla on viime vuosina ollut nopeaa, ja tavoitteiden saavuttaminen vaatii jatkuvaa tekniikan kehitystyötä sekä koulutuksen lisäämistä.</p> <p>Tämän insinööriyön tarkoituksena oli tutustua hiilidioksidiin kylmäaineena sekä kylmälaitoksen suunnitteluun. Työn alussa käydään läpi hiilidioksidiin liittyvää teoriaa, jossa tutustutaan kylmäaineen historiaan, aineominaisuuksiin sekä kylmäprosesseihin. Loppupuolella tutustutaan hiilidioksidilaitoksen suunnittelussa huomioitaviin asioihin sekä lämmönvaihtimien ja putkistojen mitoitukseen.</p> <p>Hiilidioksidin lämmöntalteenoton optimointi on tärkeää laitoksen kokonaishyötysuhteen kannalta, minkä vuoksi työssä tarkastellaan jäähdytyksessä syntyvän lauhde-energian mahdollisia käyttökohteita.</p> <p>Tämä insinööriyö perustuu saatavilla olevaan kirjallisuuteen sekä asiantuntijahaastatteluihin.</p>	
Avainsanat	hiilidioksidi, lämmönvaihtimet, putkisto, lämmöntalteenotto

Author Title Number of Pages Date	Anssi Korhonen Piping and Heat Exchangers in CO ₂ Based Refrigeration System 37 pages + 1 appendices 18.3.2019
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Building Services Engineering
Professional Major	HVAC Design
Instructors	Rauno Virta, M. Sc. Esko Kaappola, M. Sc. Aki Valkeapää, Principal Lecturer
<p>The main goal of this Bachelor's thesis was to study CO₂ as a refrigerant, and establish how to measure pipes and heat exchangers for a CO₂ based refrigeration system. Another objective was to find out the most optimal way of using CO₂ refrigeration from the heat recovery point of view. The final year project studied the qualities of carbon dioxide and problems with CO₂ as a refrigerant in general, with the focus on heat exchangers and pipes. Furthermore, since optimisation of is important in CO₂ based refrigeration systems for the overall efficiency of the system, potential ways to use of condensation heat were introduced.</p> <p>Information for the thesis was collected from literary sources in the field of refrigeration. Furthermore, experts in the field were interviewed to gather valuable information. To verify the information from the sources, the final year project studied a real-life project to demonstrate various solutions in practice.</p> <p>The information in this Bachelor's thesis can be used when designing CO₂ based refrigeration systems in the future.</p>	
Keywords	CO ₂ , heat exchanger, piping, heat recovery

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	R.J. Virta Oy	1
3	Hiilidioksidin käyttö kylmäaineena	1
3.1	Historiaa	2
3.2	Hiilidioksidin ominaisuuksista	3
3.3	Ominaislämpökapasiteetti	7
3.4	Viskositeetti	8
3.5	Turvallisuus	9
4	Hiilidioksidin kylmäprosessit	11
4.1	Transkriittinen	11
4.2	Subkriittinen	12
5	Levylämmönvaihtimet	15
5.1	Lämmönpoisto ja -talteenotto	15
5.2	Lämmönvaihtimien vaatimukset	21
6	Hiilidioksidilaitoksen putkisto	22
6.1	Putkiston mitoitus	23
6.1.1	Imuputket	25
6.1.2	Paineputket	27
6.1.3	Lauhdeputket	28
6.1.4	Nesteputket	28
6.2	Lämpölaajeneminen	29
6.3	Hiilidioksidi ja vesi	30
7	Esimerkkikohde	31
7.1	Koneikko	32
7.2	Lämmönvaihtimet	32

7.3	Lämpöpumput	32
7.4	Kytkentäkaavio	33
7.4.1	Lämmönvaihdin HE10	33
7.4.2	Lämmönvaihtimet HE40 ja HE70	33
7.4.3	Lämmönvaihdin HE60	34
7.4.4	Lämmönvaihdin HE150	34
7.4.5	Intercooler	34
7.4.6	Paineenalennusventtiili EC1	35
8	Yhteenveto	35
	Lähteet	36
	Liitteet	
	Liite 1. Kytkentäkaavio	

Lyhenteet

CO ₂	hiilidioksidi (R744)
GWP	Global Warming Potential. Kasvihuonevaikutusta kuvaava kerroin.
HCFC	osittain halogenoitu hiilivety, sisältää klooria.
HFC	fluorihiiilivety eli F-kaasu
HTP	haitalliseksi tunnettu pitoisuus
KP	kriittinen piste. Lämpötila, jonka yläpuolella kylmäainetta ei voida enää painetta korottamalla nesteyttää.
ODP	Ozone Depletion Potential. Otsonivaikutusta kuvaava kerroin.
ppm	parts per million. Pitoisuuden määritelmä.
TP	trippelipiste. Piste, jossa kylmäaine voi esiintyä kaikissa kolmessa eri olomuodossa.

1 Johdanto

Insinööritö tehdään R.J. Virta Oy:n toimeksiantona. Työn tavoitteena on, että toimeksiantaja saa tarvittavaa tietoa hiilidioksidista kylmäaineena sekä kylmälaitoksen suunnittelun perusteista.

Insinööritöissä kerrotaan yleisesti hiilidioksidin käytön historiaa sekä siitä, miten tilanne kylmäaineiden osalta on muuttunut tähän päivään mennessä. Työssä käydään läpi hiilidioksidin aineominaisuuksia sekä käyttäytymistä kylmäaineena.

Pääpaino työssä keskittyy hiilidioksidikylmälaitoksen putkistoon sekä lämmönvaihtimiin.

2 R.J. Virta Oy

Insinööritoimisto R.J. Virta Oy on LVI- ja rakennusautomaatiosuunnittelutoimisto, ja se on osa Rejlers-konsernia. Normaalin liike-, toimisto-, ja teollisuusrakentamisen lisäksi erikoisosaamisalueina ovat lääke- ja elektroniikkateollisuuden talotekniset järjestelmät ja puhdastilat. [1]

Rejlers Finland Oy on osa pohjoismaista Rejlers AB-yhtiötä, jonka toiminta on alkanut Suomessa 1980. Nykyään se toimii Suomessa 19 paikkakunnalla, ja sillä on yli 600 työntekijää.

Yritys tarjoaa monipuolisia insinööripalveluja teollisuuden, energian, rakentamisen sekä infran asiakaskunnille. [2]

3 Hiilidioksidin käyttö kylmäaineena

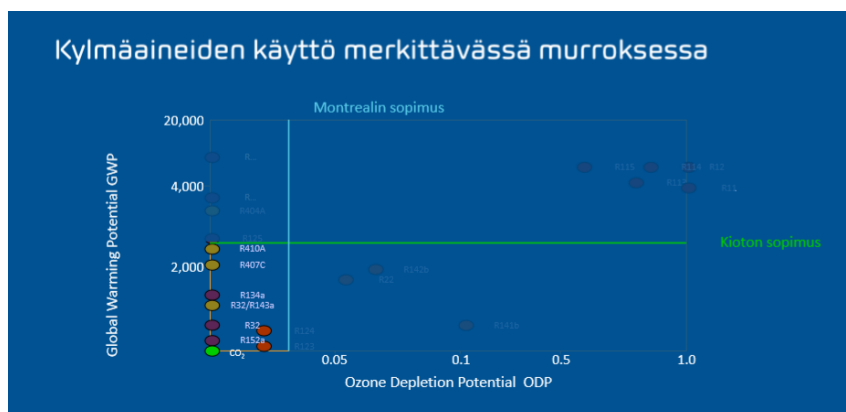
Hiilidioksidin (CO₂) käyttö kylmäaineena on lisääntynyt viime vuosina voimaan tulleiden asetusten sekä määräysten vuoksi. Haasteelliseksi sen käytössä tekevät monet sen ominaisuuksista kuten matala kriittinen piste, joka luo tiettyjä vaatimuksia, jotka pitää

ottaa huomioon kylmäjärjestelmän suunnittelussa. Hiilidioksidin hyvän kylmäntuoton lisäksi järjestelmän tehokkuutta pitää tarkastella myöskin lämmöntuoton näkökulmasta.

3.1 Historiaa

Hiilidioksidi (CO₂) on luonnollinen kaasu, jota on käytetty kylmäaineena jo 1850-luvulta saakka, jolloin Alexander Twining patentoi ensimmäisen kompressorisysteeminsä hiilidioksidille. Hiilidioksidia käytettiin, koska se oli myrkytöntä ja se ei reagoinut muiden materiaalien kanssa. Silloin sitä alettiin käyttää etenkin meriteollisuudessa sekä ilmanvaihdon jäähdytyksen yhteydessä. Hiilidioksidin korkean käyttöpaineen sekä suhteellisen matalan kriittisen lämpötilan vuoksi synteettiset aineet syrjäyttivät hiilidioksidin 1930-luvulla. Suurimmat syyt tälle olivat prosessin huono hyötysuhde sekä putkistoihin ja kompressoriin liittyvät ongelmat suurten painetasojen vuoksi. [3, s. 262–263.]

Perinteisten kylmäaineiden käyttöä alettiin rajoittaa Montrealin sopimuksen tultua voimaan 1990-luvun vaihteessa, jolloin luonnollisten kylmäaineiden kehitys sekä käyttö alkoi uudelleen. Montrealin sopimuksella haluttiin alkaa vähentämään otsonikerrosta tuhoavien aineiden käyttöä ja tätä on kiristetty Kioton sopimuksen myötä. Kioton sopimuksella määriteltiin kuusi merkittävintä kasvihuonekaasua, joiden käyttöä haluttiin alkaa vähentämään ja perinteiset HFC-kylmäaineet olivat näiden joukossa. Ratkaisuksi tähän on alettu käyttää matalamman GWP-arvon omaavia yhdisteitä sekä luonnollisia kylmäaineita kuten hiilidioksidia sekä ammoniakia. [4] Kuvassa 1 on esitetty sopimusten vaikutukset kylmäaineiden GWP- ja ODP-arvoihin.



Kuva 1. Kioton ja Montrealin sopimusten vaikutukset kylmäaineiden käyttöön [4]

Kylmäaineiden ympäristöystävällisyyttä voidaan arvioida ODP- ja GWP-arvojen avulla. Luonnollisten kylmäaineiden etu on niiden haitattomuus otsonikerrokselle, mitä kuvaa niiden ODP-arvo, joka on 0. GWP-arvo kuvaa kylmäaineen vaikutusta ilmaston lämpenemiseen seuraavan 100 vuoden aikana. Vertailun vuoksi esimerkiksi hiilidioksidin GWP-arvo on 1, kun taas kaupankylmässä suositun R404A:n GWP-arvo on 2 088, eli sen vaikutus ilmaston lämpenemiseen on n. 2 000 kertaa suurempi kuin hiilidioksidilla.

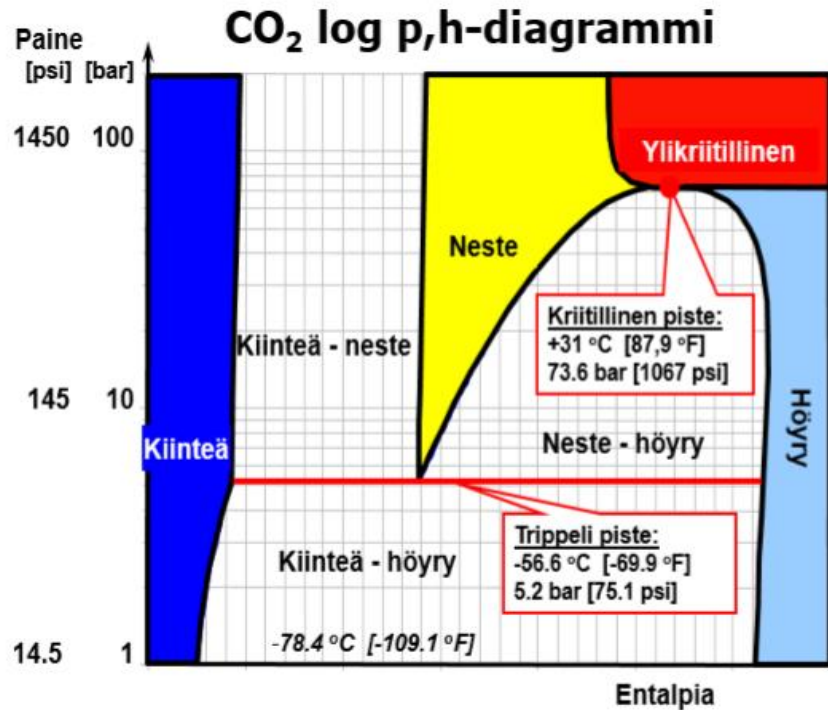
Vuonna 2014 Euroopassa julkistettiin F-kaasuasetus, jolla asetettiin kylmäaineilla kiinteisiin perustuvia määrällisiä rajoituksia EU:n alueella, ja se astui voimaan vuonna 2015. Taulukosta 1 nähdään, miten vuonna 2014 esitetty F-kaasuasetus (EU) N:o 517/2014 vaiheittain pyrkii pääsemään eroon vahvasti ilmastoon vaikuttavista perinteisistä kylmäaineista vuoteen 2030 mennessä. [5, s. 11.]

Taulukko 1. Kylmäaineiden käytön rajoitusten aikataulu. Käyttömäärät ilmaistaan CO₂-ekvivalenttioneina ja taulukossa tämä on ilmaistu prosentteina verrattuna vuosien 2009–2012 keskimääräisiin kulutuksiin. [5, s.11.]

Vuosi	HFC-kylmäaineiden käyttömäärä	Teoreettinen vastaava keskimääräinen GWP-arvo
2015	100 %	2250
2016 - 2017	93 %	2100
2018 – 2020	63 %	1450
2021 - 2023	45 %	1000
2024 - 2026	31 %	700
2027 - 2029	24 %	550
2030	21 %	<500

3.2 Hiilidioksidin ominaisuuksista

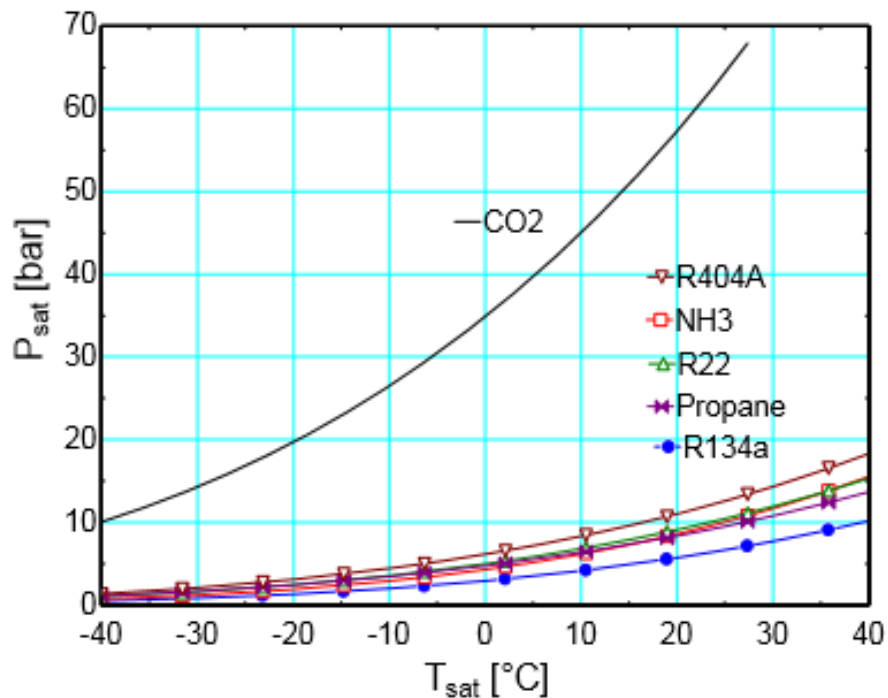
Hiilidioksidin kiertoprosessin lämmönsiirtymistä höyrystimessä sekä lauhduttimessa voidaan hyvin havainnollistaa log p,h -diagrammin avulla, jossa kriittinen piste erottaa kyläisen nesteen ja höyryn rajakäyrät. Lämmönsiirtymistä voidaan parhaiten kuvata kylmäaineen entalpialla. Paineen avulla voidaan helposti esittää muutokset kompressorissa ja paisuntaventtiilissä. [6, s. 11.]



Kuva 2. Hiilidioksidin faasimuutokset [7, s. 21].

Hiilidioksidin olomuotoon voidaan vaikuttaa lämpötilan sekä paineen avulla. Kuvasta 2 nähdään hiilidioksidin aineominaisuuksien kannalta kaksi tärkeää pistettä, trippelipiste ja kriittinen piste. Nämä pisteet on hyvä huomioida, kun suunnitellaan hiilidioksidi kylmälaitosta. Hiilidioksidin paineen tai lämpötilan laskiessa trippelipisteen alapuolelle hiilidioksidi muuttuu kiinteäksi, joka estää laitoksen toiminnan. Kiinteä hiilidioksidi järjestelmässä voi tukkia putkistot sekä komponentit. Toinen tärkeä piste on kriittinen piste, jonka yläpuolella hiilidioksidi on kaasua. Höyryn ja kaasun eroavaisuus on siinä, että höyry voi lauhtua nesteeksi vakio­lämpötilassa tilavuutta muuttamalla. Kaasu ei tiivisty nesteeksi ennen kuin lämpötilaa lasketaan. Perinteisillä kylmäaineilla kylmäprosessi toimii trippelipisteen sekä kriittisen pisteen välissä, joten näin ollen hiilidioksidi rikkoo tätä kaavaa. [6, s. 11–12.]

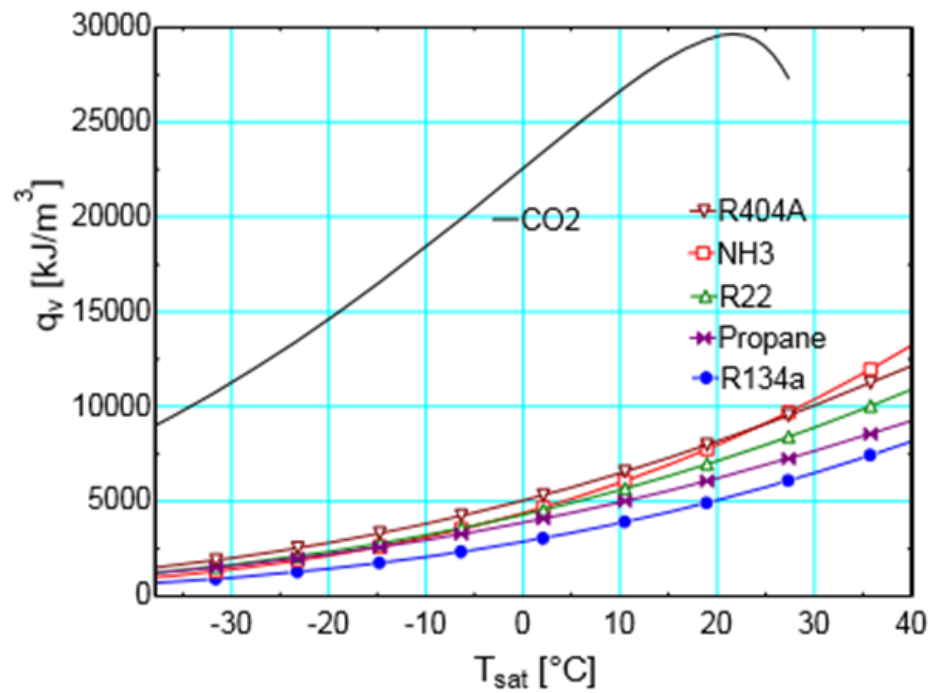
Kuvasta 3 voidaan vertailla hiilidioksidin kyllästymispainetta muihin kylmäaineisiin verrattuna. Hiilidioksidilla kyllästymispaine on paljon korkeampi kuin muilla kylmäaineilla. [8, s. 9.]



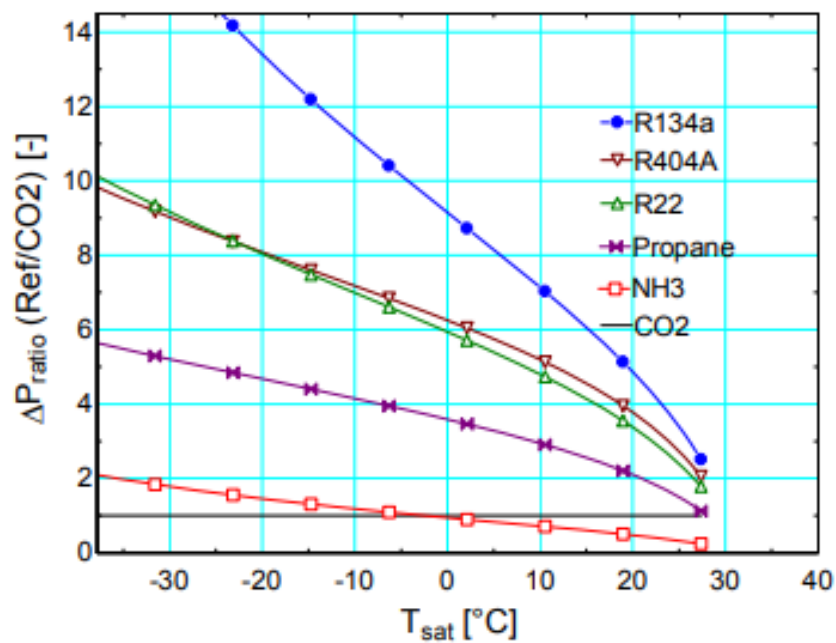
Kuva 3. Kylmäaineiden kyllästymispaine kyllästymislämpötilan funktiona [8, s. 9].

Korkeat käyttöpaineet tuovat haasteita komponenttien kestämiselle, mutta korkeiden käyttöpaineiden vuoksi hiilidioksidin höyryn tiheys on myöskin paljon suurempi kuin perinteisillä kylmäaineilla. Suuremmalla tiheydellä on vaikutusta kylmäaineprosessin toimintaan, sillä se tarkoittaa, että hiilidioksidilla on suurempi kylmäaineen tilavuuden kylmäntuotto. [8, s. 9.]

Kuvassa 4 on vertailtu eri kylmäaineiden tilavuuden kylmäntuottoa, ja siitä voidaan nähdä, että hiilidioksidilla se on paljon korkeampi verrattuna muihin taulukon kylmäaineisiin. Käytännössä suuria tehoja voidaan siirtää pienellä kylmäaineen tilavuusvirralla, jolloin kylmäainetäytös on pienempi. Korkean paineen vuoksi myös höyryn painehäviöt ovat pienempiä, jonka vuoksi hiilidioksidijärjestelmissä voidaan käyttää pienempiä komponentteja sekä putkistoa. [8, s. 11–13.] Kuvassa 5 on vertailtu eri kylmäaineiden höyryn painehäviötä kyllästymislämpötilan mukaan.



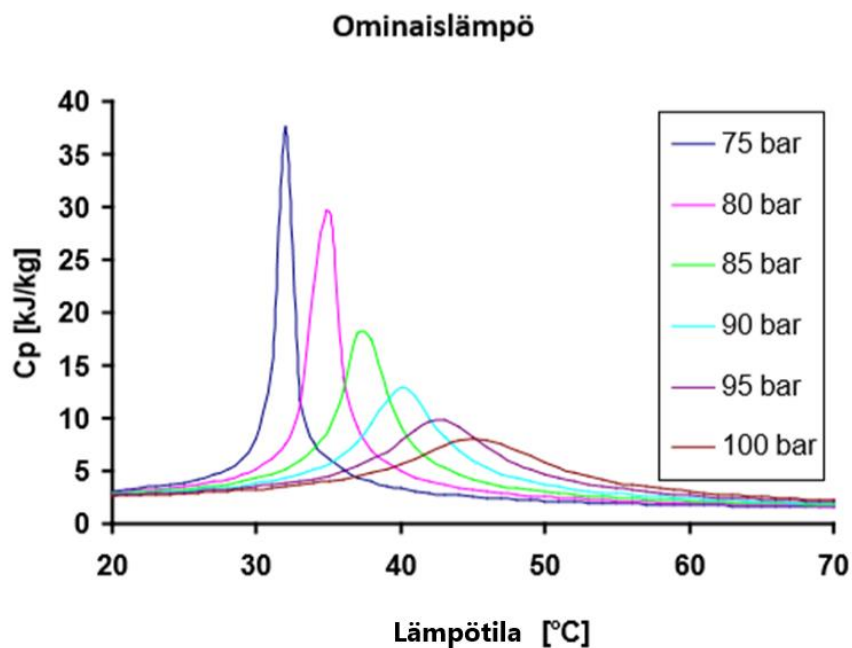
Kuva 4. Kylmäaineiden tilavuuden kylmäntuotto kyllästymislämpötilan funktiona [8, s. 11.]



Kuva 5. Kylmäaineiden höyryn painehäviöt kyllästymislämpötilan funktiona [8, s. 13.]

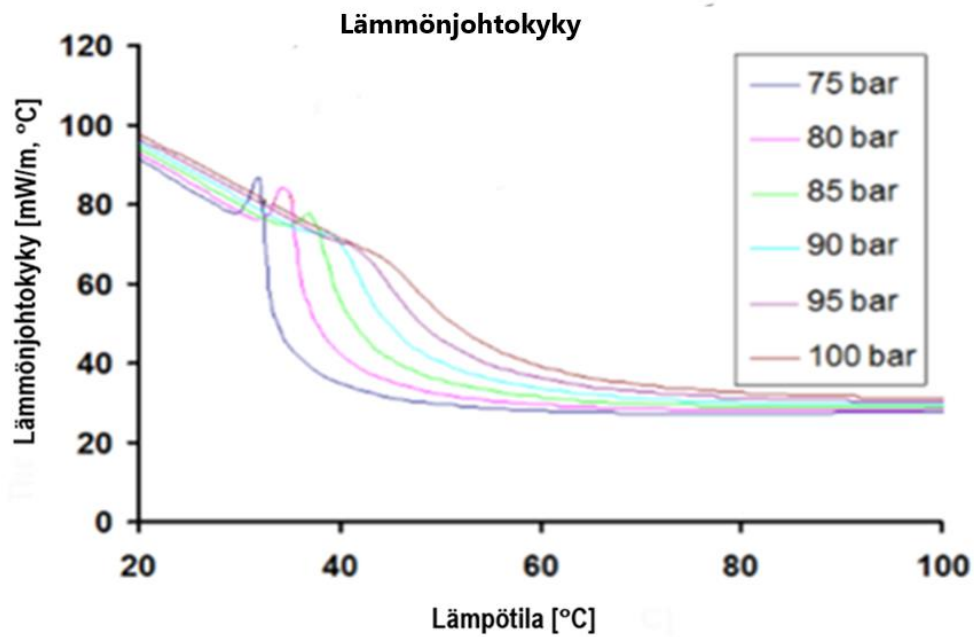
3.3 Ominaislämpökapasiteetti

Hiilidioksidin erityispiirteisiin kuuluu sen ominaislämpökapasiteetin muuttuminen lämpötilan mukaan. Kuva 6 osoittaa hiilidioksidin ominaislämmön olevan korkeimmillaan 30–50 °C:ssa eli kriittisen pisteen läheisyydessä sekä yläpuolella. Lämpötilan lisäksi ominaislämpöön vaikuttaa myöskin käyttöpaine. Matalammalla paineella ominaislämpö on korkeampi matalissa lämpötiloissa, kun taas korkeammissa lämpötiloissa ominaislämpö on matalampi. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että samalla lämpötilaerolla teho on suurempi, sillä lämpötila-alueella, jolla ominaislämpö on suurempi. Muuttuva ominaislämpö tekee hiilidioksidista haastavan kylmäaineen, joka eroaa muista. [9]



Kuva 6. CO2 ominaislämpökapasiteetin muutos lämpötilan sekä käyttöpaineen mukaan [10]

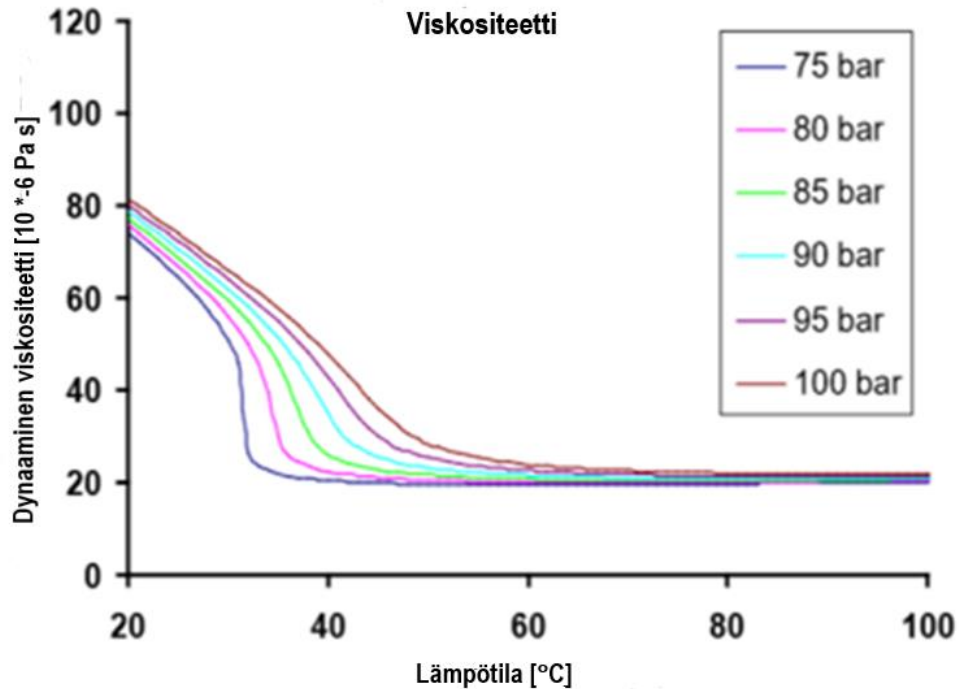
Kuvasta 7 näemme, miten kylmäaineen lämmönjohtokyky laskee lämpötilan noustua. Poikkeuksena ovat piikit välillä 30–40 °C, mikä merkitsee, että niissä lämpötiloissa lämmönsiirto on tehokkaampaa. Matalissa lämpötiloissa hiilidioksidin kasvanut lämmönjohtokyky takaa paremman lämmönsiirron. [9]



Kuva 7. Hiilidioksidin lämmönjohtokyky lämpötilan mukaan [10]

3.4 Viskositeetti

Hiilidioksidin viskositeettiin vaikuttavat sekä lämpötila että käyttöpaine. Käyttöpaineen kasvaessa kasvaa myös viskositeetti. Viskositeetti vaikuttaa järjestelmän aiheuttamaan painehäviöön. Tarkasteltaessa lämmönvaihtimen painehäviötä samalla massavirtaamalla eri lämpötiloissa ja paineissa on muuttuvalla tilavuusvirtaamalla kuitenkin suurempi vaikutus painehäviöön [9]



Kuva 8. Hiilidioksidin viskositeetti lämpötilan sekä käyttöpaineen mukaan [10].

3.5 Turvallisuus

Hiilidioksidia on käytetty kompressorikylmän kehityksen alusta alkaen, koska se on ollut turvallinen ja helppo tapa jäähdyttää. Hiilidioksidi on hajuton, mauton, väritön, myrkytön ja palamaton. Vaikka se on myrkytöntä, puutteellisesti tuuletetuissa tiloissa hiilidioksidipitoisuus voi nousta yli vaarallisen rajan ja aiheuttaa tukehtumiskuoleman, sillä ilmaa raskaampana se syrjäyttää hapen.

Suurilla pitoisuuksilla hiilidioksidilla on narkoottisia vaikutuksia. Hiilidioksidi imeytyy verenkiertoon keuhkojen kautta ja on hyvä tietää, että tajuttomuus seuraa nopeasti yli 10 prosentin pitoisuuksissa. Seuraavassa listassa on tarkasteltu hiilidioksidin pitoisuuksien vaikutuksia ihmiseen:

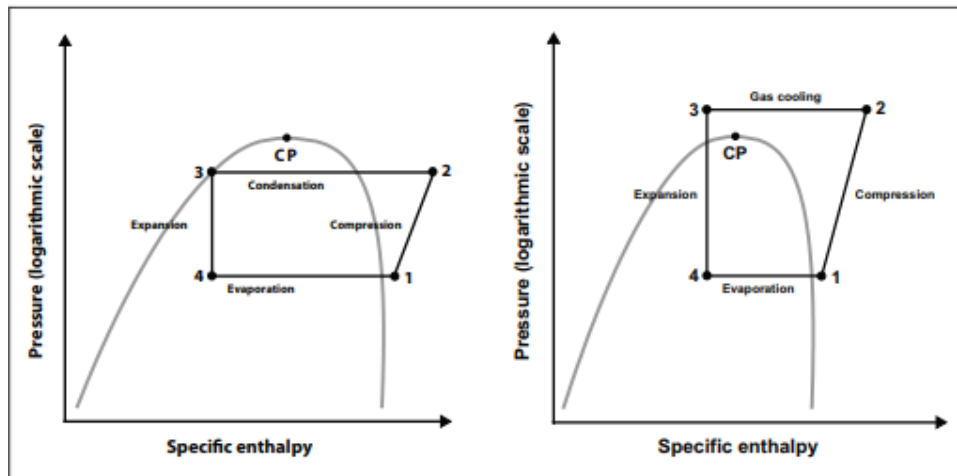
- 380 ppm (0,038%). Normaali pitoisuus ilmakehässä.

- 5 000 ppm (0,5 %). Suurin sallittu pitoisuus sisätiloissa jatkuvassa oleskelussa 8h aikana.
- 30 000 ppm (3 %). Tihentynyt hengitys. Narkoottisia vaikutuksia, kouristuksia ja hengitys hidastuu.
- 50 000 ppm (5 %). Vahvasti tihentynyt hengitys, päänsärky ja pahoinvointi.
- 100 000 ppm (10 %). Hengenvaarallinen pitoisuus. Muutaman minuutin altistumisesta seuraa tajuttomuus.
- 300 000 ppm (30%). Nopea tajuttomuus ja menehtyminen

Hiilidioksidin hajuttomuuden sekä mauttumuuden vuoksi on mahdotonta havaita kylmäainevuotoja ihmisaistein, jonka vuoksi on tärkeää varustaa laitokset vuodonilmaisimilla sekä suunnitella tarpeellinen ilmanvaihto kohteeseen. Kun altistunut ihminen saadaan tarpeeksi ajoissa raittiiseen ilmaan, hiilidioksidi poistuu elimistöstä eikä jätä pysyviä vaurioita.

Hiilidioksidi on melko turvallinen kylmäaine, mutta turvallisuus pitää ottaa vakavasti, sillä hiilidioksidilla on laiteratkaisuista riippuen niin korkeat suunnittelupaineet, että vuototilanteen sattuessa vuotomäärä on paineesta johtuen suuri. [11, s. 3–4.]

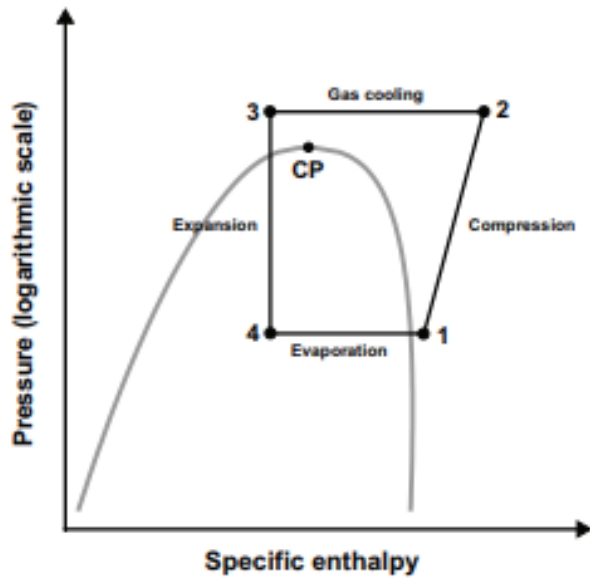
4 Hiilidioksidin kylmäprosessit



Kuva 9. Subkriittinen sekä transkriittinen kylmäprosessi [12, s. 6].

4.1 Transkriittinen

Transkriittinen prosessissa korkeapainepuolen paine ja lämpötila ovat kriittisen pisteen arvoja suuremmat. Kriittisen pisteen yläpuolella ei voida erottaa nestettä ja höyryä. Kylmäaine ei siis lauhdu, vaan ainoastaan jäähtyy. Siten kylmäaineen lämpötila ei lämmönluovutuksessa ole alikriittisen tapaan vakio, vaan muuttuu suuresti. Paisunnassa paine laskee kriittistä painetta pienemmäksi, jolloin neste- ja höyryfaasit jälleen erottuvat. [13, s. 71.]



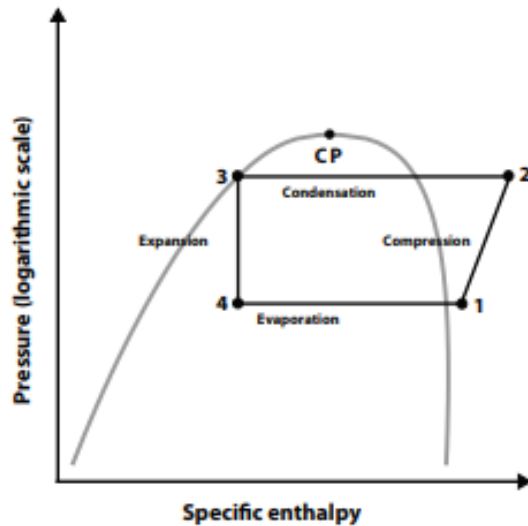
Kuva 10. Hiilidioksidin transkriittinen prosessi [12, s. 6].

Transkriittisen prosessin vaiheet ovat seuraavat:

- 1-2 Kompressori puristaa kylmäaineen korkeaan paineeseen, jolloin sen lämpötila voi nousta jopa 130 °C:seen
- 2-3 Kaasunjäähdytin jäähdyttää kylmäaineen vakioaineessa
- 3-4 Paisunta vakioentalpiassa
- 4-1 Höyrystyminen vakioaineessa sekä lämpötilassa

4.2 Subkriittinen

Subkriittinen prosessi, jossa lauhtumislämpötila on vastaavasti kriittisen pisteen alapuolella. Prosessi ei poikkea olennaisesti tavallisesta, jossa suurin osa lämmönluovutuksesta tapahtuu lauhtumisessa. Merkittävin ero on korkeampi paine kuin tavallisessa prosessissa. [13, s. 71.]



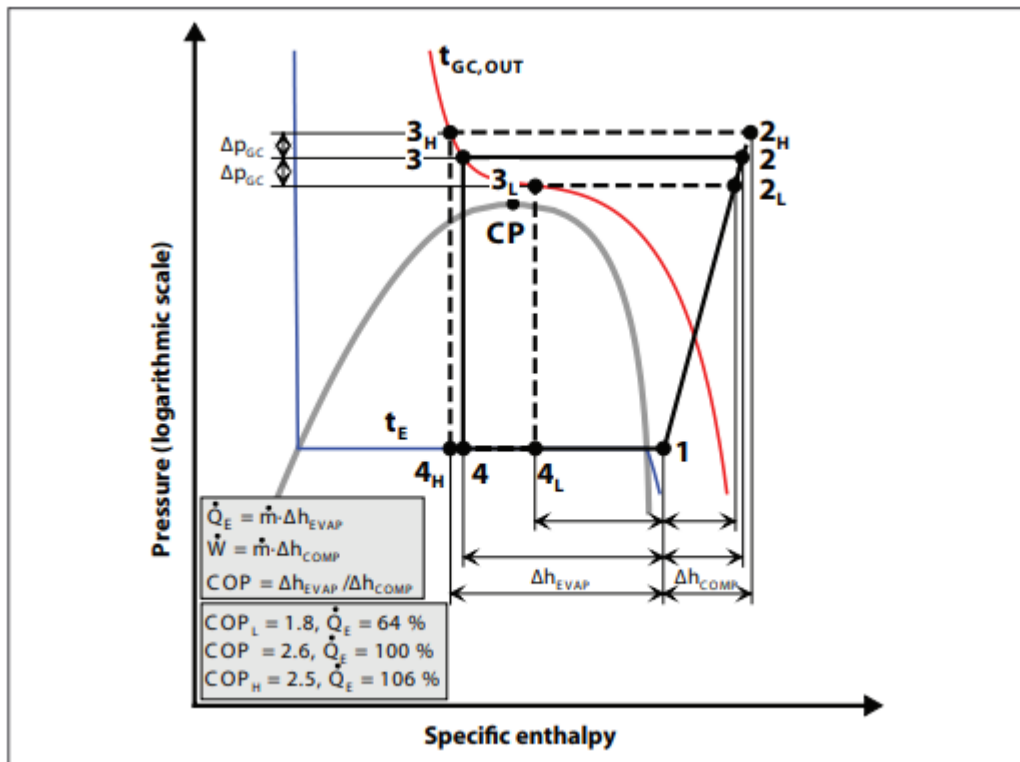
Kuva 11. Hiilidioksidin subkriittinen prosessi [12, s. 6].

Subkriittisen prosessin vaiheet ovat seuraavat:

- 1-2 Puristus kompressorissa
- 2-3 Lauhtuminen lauhduttimessa vakioaineessa
- 3-4 Paisunta vakioentalpiassa
- 4-1 Höyrystyminen vakioaineessa ja lämpötilassa

Transkriittisessä prosessissa tulistuksen jäähtyminen sekä kuristuksen aiheuttamat häviöt ovat suuremmat kuin riittävästi kriittisen pisteen alapuolella toimivassa prosessissa. Kylmäkerroin on siis huonompi kuin samalla lämpötila- alueella toimivan alikriittisen prosessin. [13, s. 72.] Kriittisen pisteen yläpuolella kaasunjähdyttimen loppulämpötilalla on suuri vaikutus koko järjestelmän höytysuhteeseen. Kuvassa 12 on esitetty kolme eri kaasunjähdyttimen ulostulopainetasoa ja niiden vaikutus järjestelmän höytysuhteeseen. Kuvaajassa numero 2 kuvaa nimellispainetta ja pisteet sen yläpuolella sekä alapuolella kuvaavat paineen muutoksen vaikutusta järjestelmän höytysuhteeseen. Kuva havainnollistaa, miten pienellä painetason nostolla voidaan vaikuttaa järjestelmän kylmätehoon

hyötysuhteen kasvaessa. Tämä vaikuttaa myös saatavan lauhde-energian määrään.
[12, s. 8–9.]



Kuva 12. Kompressorin ulostulopaineen vaikutus:

Hyötysuhde lasketaan yhtälöllä 1:

$$COP = \frac{\Delta h_{EVAP}}{\Delta h_{COMP}} \quad (\text{Yhtälö 1})$$

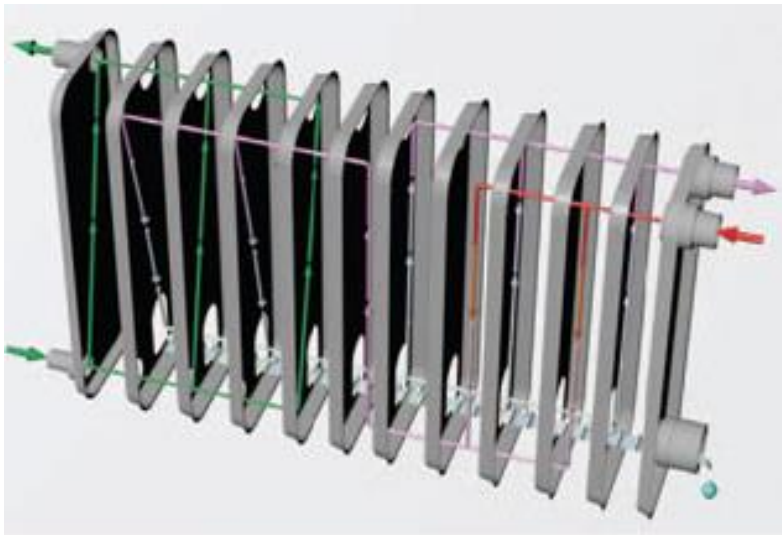
jossa,

Δh_{EVAP} on höyrystimessä tapahtuva entalpiamuutos, (kJ/kg)

Δh_{COMP} on kompressorissa tapahtuva entalpiamuutos, (kJ/kg)

5 Levylämmönvaihtimet

Levylämmönvaihdin on laajalti käytössä oleva lämmönsiirintyyppi. Se koostuu päällekkäin pinotuista levyistä, joihin on puristettu sopiva kuvio. Reunoilla on joko tiiviste tai ne on juotettu tai hitsattu yhteen. Juotettu tai hitsattu rakenne on puhdistettavissa vain kemiallisesti, kun taas pulteilla kokoon painettu voidaan avata. Vaihtimessa, joka toinen levyväli muodostaa virtauksen kanaviston ja joka toinen toisen virtauksen. Tehoa voidaan lisätä yksinkertaisesti lisäämällä levyjä. Hyvän lämmönsiirron ja tiiviin rakenteen ansiosta levylämmönsiirrin on pienempi ja kevyempi kuin vastaavan tehoiset moniputki-rakenteet. Virtauksen tasainen jakautuminen on tärkeää tehokkaan lämmönsiirron saavuttamiseksi. [13, s. 171.]



Kuva 13. Levylämmönvaihtimen rakenne [14]

5.1 Lämmönpoisto ja -talteenotto

Hiilidioksidikylmäjärjestelmän lauhdelämmön hyödyntäminen on erittäin kannattavaa järjestelmän kokonaishyötysuhteen kannalta. Lämmönsiirtoa subkriittisessä prosessissa voidaan arvioida käyttäen logaritmista lämpötilaeroa. Logaritmisen lämpötilaeron käyttämisen ehtona on kylmäaineen lämmönsiirto-ominaisuuksien muuttumattomuus lämmönsiirron aikana, ja subkriittisessä prosessissa voidaan olettaa näin. [6, s. 16.]

Usein lämmönsiirtimen teho voidaan arvioida yhtälöllä 2:

$$\Phi = U * A * \theta_{ln} \quad (\text{Yhtälöllä 2})$$

jossa

U on lämmönsiirtokerroin

A on lämmönsiirto pinta-ala

θ_{ln} on logaritminen lämpötilaero

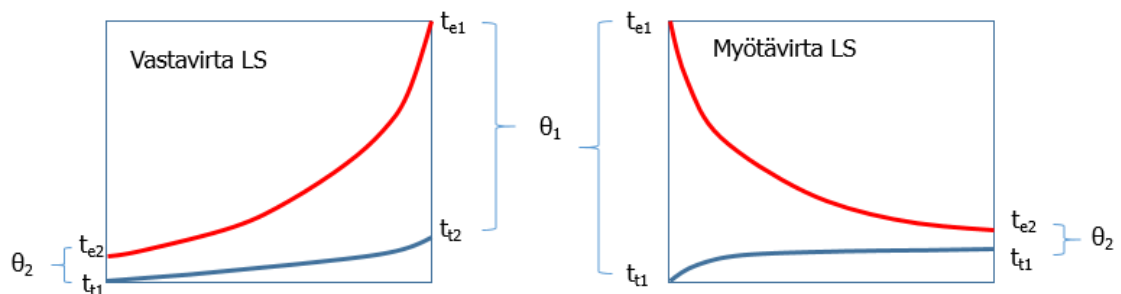
Lämmönsiirtokerroimien sekä fysikaalisten ominaisuuksien pysyessä vakioina logaritminen lämpötilaero voidaan laskea yhtälöllä:

$$\theta_{ln} = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\ln \frac{\theta_1}{\theta_2}} \quad (\text{Yhtälö 3})$$

jossa

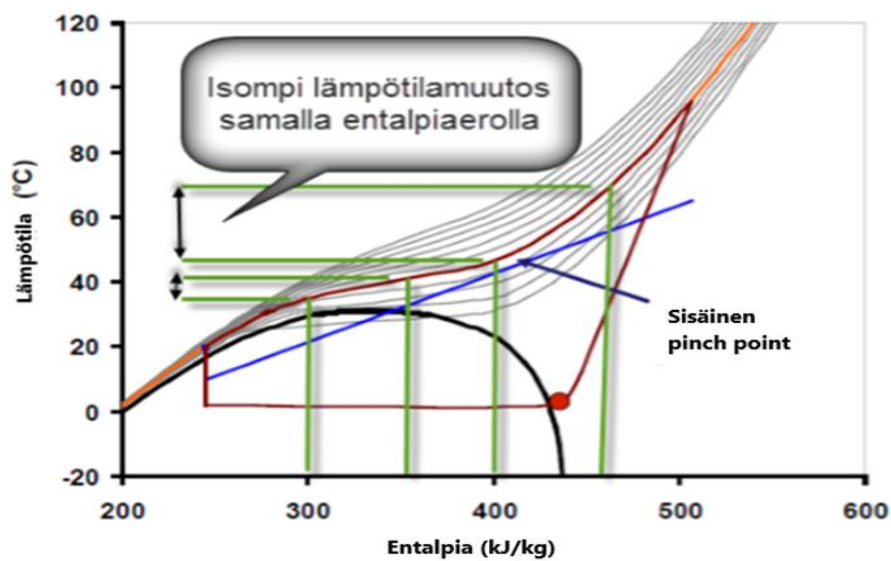
θ_1 on $t_{e1} - t_{t2}$

θ_2 on $t_{e2} - t_{t1}$



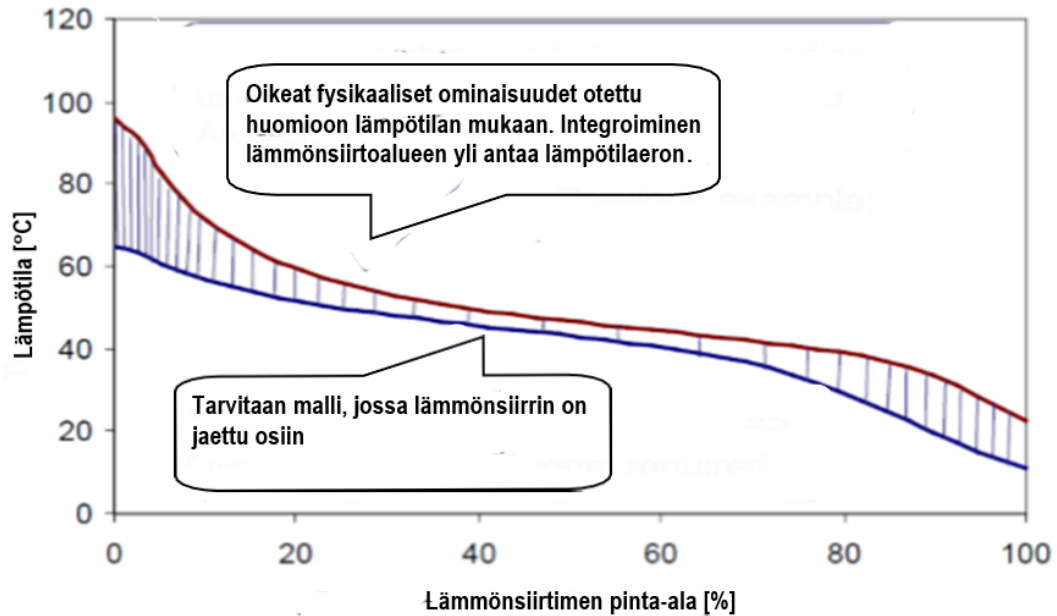
Kuva 14. Logaritmistä lämpötilaeroa havainnollistavat kuvaajat [15, s. 21.]

Transkriittisen hiilidioksidin lämmönpoisto- ja talteenotto tapahtuu hieman eri tavalla kuin subkriittisen, jonka vuoksi sitä on hyvä tarkastella tarkemmin. Kuvassa 15 kaasunjäähdytyn näkyy punaisella sekä esimerkkinä kaasua jäähdyttävä vesi sinisellä. Kuva näyttää levylämmönvaihtimessa tapahtuvan lämmönsiirron lämpötilaeron. Keskellä lämmönsiirrintä näkyy pinch point eli lämmönsiirron minimi lämpötilaero. Tämä johtuu hiilidioksidin muuttuvasta ominaislämpökapasiteetista. Kuvasta nähdään, että lämpötilan ollessa 30–40 °C alueella saavutetaan isompi entalpiamuutos kuin 80–90 °C alueella. Käyrä muuttuu jyrkemmäksi, kun paine on alhaisempi. Tämä vaikuttaa olennaisesti lämmönsiirtimien lämpötilaeron sekä tehon laskemiseen. [9]



Kuva 15. Lämpötilanmuutosta havainnollistava Th-diagrammi [9]

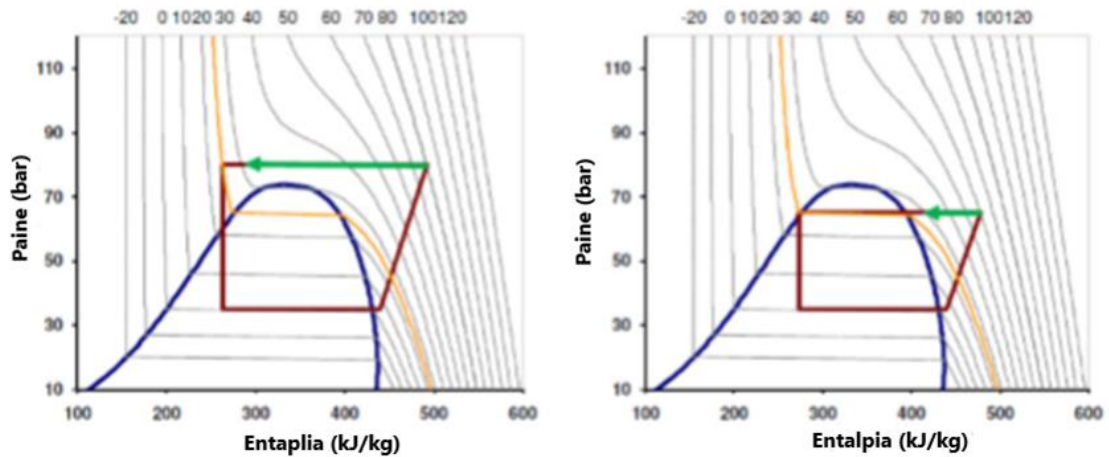
Tämän vuoksi hiilidioksidin lämpötilaerot siirtimessä pitää laskea osissa. Kuva 16 havainnollistaa lämpötilaeroa siirtimessä ja kuinka se on jaettu osiin.



Kuva 16. Lämmönsiirtimen lämpötilaero [10]

Siirrin jaetaan niin moneen osaan, että hiilidioksidin fysikaaliset ominaisuuksien voidaan olettaa olevan vakioita. Näin logaritminen lämpötilaero- menetelmä soveltuu jokaiselle pienelle lämmönsiirtimen osalle. Näin lasketaan jokaisen pienen osan UA-arvo, josta integroidaan koko lämmönsiirtimen UA-arvo.

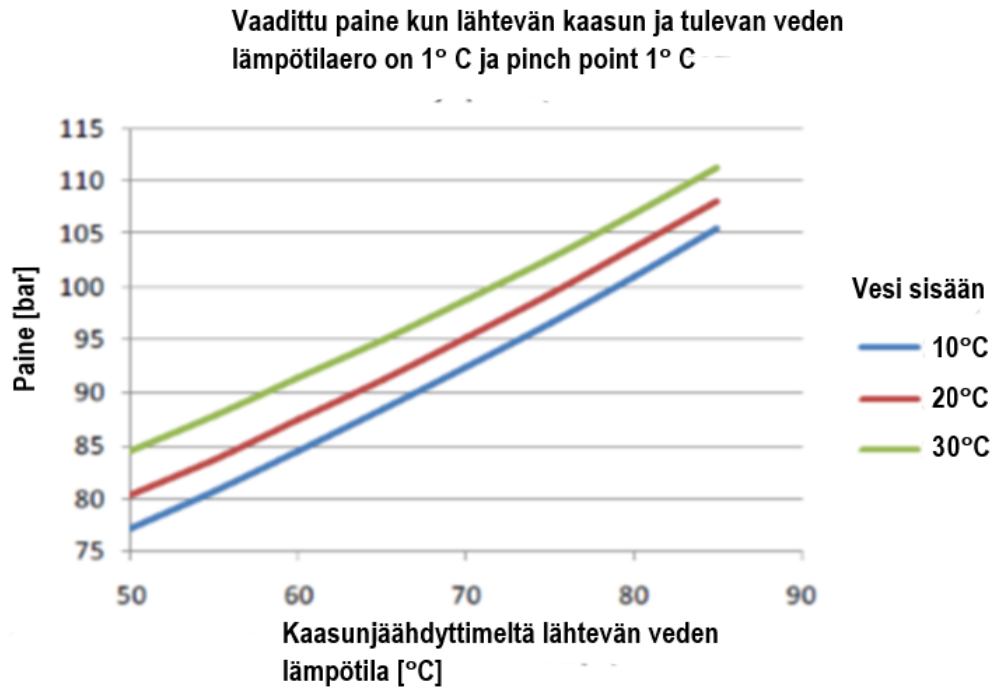
Helpoin ja eniten käytetty ratkaisu on käyttää järjestelmästä siirretty lämpö käyttöveden lämmittämiseen. Tämä voidaan toteuttaa tulistuksenvaihtimella, jonka avulla lämpöenergia siirretään suoraan veteen tai vesi-glykoliseokseen. Kuvassa 17 vihreä nuoli kuvaa tulistuksenvaihtimen talteen ottamaa energiamäärä subkriittisessä prosessissa. Transkriittisessä prosessissa nuoli kuvaa kaasunjäähdyttimen toimintaa. Kuvasta näkyy, että transkriittisessä prosessissa saatu energiamäärä on luonnollisesti suurempi kuin subkriittisessä ja siinä päästään myöskin korkeampiin lämpötilatasoihin. [9]



Kuva 17. Transkriittinen sekä subkriittinen lämmöntalteenotto [9]

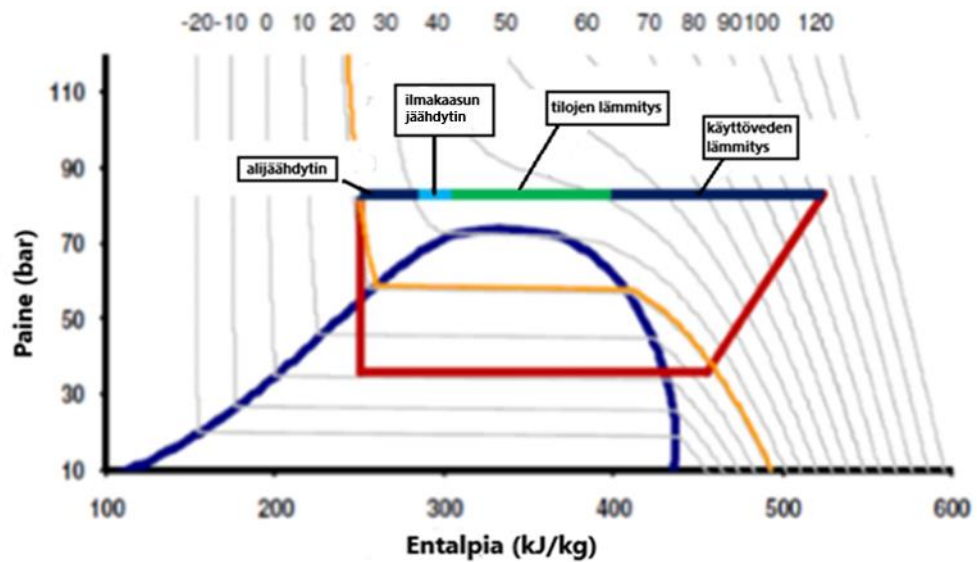
Käyttövedettä lämmitettäessä transkriittisessä prosessissa lämmönvaihtimen sisäisellä pinch pointilla on erittäin suuri vaikutus, kun siirretään lämpö kaasusta käyttöveteen. Sillä on merkitys käyttöveden lämpötilaan sekä siihen, miten pieneen lämpötilaeroon päästään tietyssä paineessa.

Kuvassa 18 on esitetty optimaaliset paineet veden eri lämpötiloille eri paineessa. Sen avulla voimme nähdä millä käyttöpaineella saavutetaan tietty veden lämpötila pinch pointin sekä lähtevän veden ja tulevan kaasun lämpötilaeron ollessa 1 °C. Pinch pointin vaikutusta voidaan vähentää imukaasunvaihtimella, jossa höyrystimeltä lähtevä hiilidioksidi lämmitetään ja jäähdyttimeltä lähtevä hiilidioksidi alijäähdytetään. Minimilämpötilaeroon vaikuttavat laitoksen muut parametrit, kuten höyrystymislämpötila. [9]



Kuva 18. Optimaalinen paine veden eri lämpötiloille [10]

Lämmöntalteenotto pystytään myös yhdistämään käyttöveden sekä tilojen lämmittämiseen, jolloin siitä tulee hieman monimutkaisempi. Tällöin järjestelmästä otetaan lämpö talteen monessa eri lämmönvaihtimessa eri lämpötilatasoilla. Kuvassa 19 on esitetty prosessi, jossa kaasua jäähdytetään neljässä eri vaiheessa. Ensimmäisellä lämmönvaihtimella pystytään lämmittämään käyttövettä, minkä jälkeen pystytään tarvittaessa lämmitämään tiloja. Kaasunjähdyttimellä jäähdytetään osa kaasusta, ja lopuksi hiilidioksidi voidaan vielä alijäähdyttää vaikka käyttöveden esilämmitykseen, jolloin prosessi parane. [9]

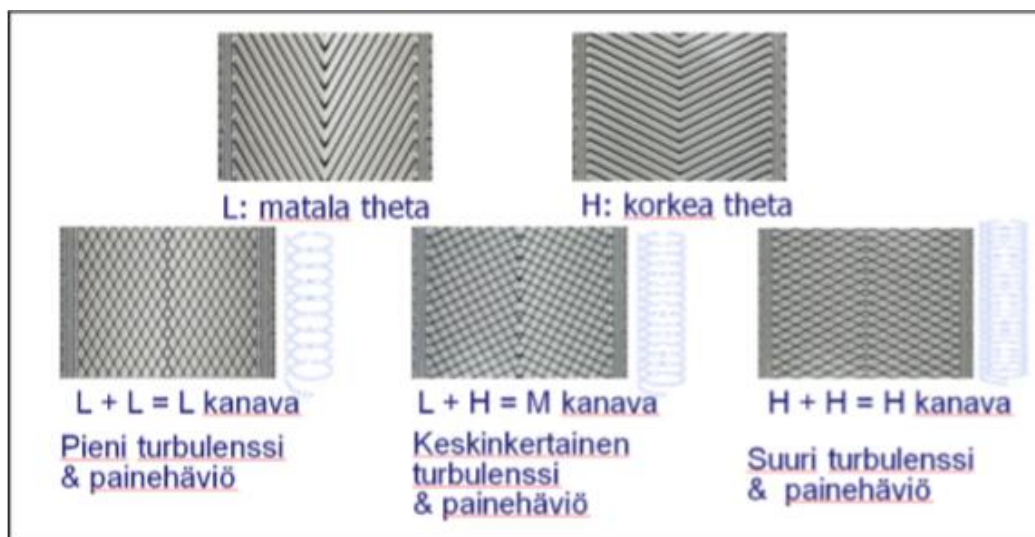


Kuva 19. Lämmöntalteenotto eri vaiheissa [9]

5.2 Lämmönvaihtimien vaatimukset

Hiilidioksidin korkeat paineet asettavat myös lämmönvaihtimille tiettyjä vaatimuksia valmistajille liittyen niiden kestävyys sekä termiseen pituuteen. Vaihtimesta riippuen rakennepaineen pitää olla vähintään 80 bar, mutta koska toisella puolella kulkee korkeapaineikaasu niin rakennepaineen pitää olla yli 120 bar.

Vaihtimen termisen pituuden määrää lähinnä lämpötilaeron suuruus, jonka mukaan pituus pitää osata valita. Nämä termiset vaatimukset voidaan täyttää käyttämällä erilaisia levykuvioita lämmönvaihtimessa, ja ne pystytään toteuttamaan eri Θ -arvoilla. Korkea Θ sekä matala Θ saavat aikaan kolme erilaista kanavaa, jotka antavat erilaiset arvot termiselle pituudelle. Lämpötilaeron sekä virtausten ollessa pienet tarvitaan suuri termisen pituus tai korkea Θ -arvo, joka tarkoittaa sitä, että lämmönsiirto on tehokkaampaa eli suurempaa lämmönsiirtokerrointa, ja korkeampaa painehäviötä. [9]



Kuva 20. Lämmönvaihtimien levykuvioita [9]

6 Hiilidioksidilaitoksen putkisto

Kylmäaine virtaa putkistossa nesteinä, höyrynä tai sitten näiden sekoituksena. Ylikriittisellä alueella hiilidioksidia kutsutaan fluidiksi. Suunniteltaessa kylmälaitoksen putkistoa on tärkeää ottaa huomioon kylmäaine ja sen eri olomuodot, järjestelmän perimmäinen tehtävä sekä öljyn palautuminen kompressorille kaikista putkiston osista. Putkien materiaaliin vaikuttavat kylmäaine, paine sekä koneiston teho, joka määrää putkikoon. Hiilidioksidilla voidaan käyttää kupariputkia. Putkitus tehdään kuparilla putkikokojen riittäessä, ja suuremmissa käytetään teräsputkia.

Putkiston suunnittelu on tasapainottelua taloudellisuuden, painehäviöiden sekä öljyn palautuksen kanssa. Painehäviöitä syntyy putkistossa kitkan vaikutuksesta riippuen putken materiaalista sekä putkistovarusteista. Kaikki eri putkiston komponentit sekä varusteet aiheuttavat painehäviöitä, joilla on suuri merkitys järjestelmän tehokkuuteen. Liian suuret putkikoot kasvattavat putkien sekä eristeiden hankintahintaa, ja asennuskustannuksia kun taas liian pienet putkikoot aiheuttavat liian suuria painehäviöitä, jolloin koko koneikon toiminta saattaa häiriintyä. [13, s. 247–248.]

Suomessa teollisessa kylmässä hiilidioksidilla on käytetty haponkestävää putkistoa hitsattuna. Korkeilla paineilla päädytään helposti paksumpiin putkiseinämiin, jolloin

saatavuus ANSI-kokoluokassa on parempi. Ongelmaksi voi tulla viistettyjen osien saatavuus, jolloin putkiston hitsaamiseen menevä aika kasvaa merkittävästi. [11, s. 24.]

6.1 Putkiston mitoitus

Putkiston valintaa varten on saatavilla laitetoimittajilta mitoitusohjelmia, mutta on hyvä tarkistaa, toteutuvatko tavoitteelliset nopeudet öljynpalautuksen ja liian suurien nopeuksien estämiseksi. [13, s. 250].

Seinämäkitkan aiheuttama painehäviö voidaan laskea yhtälöllä 4:

$$\Delta p = \frac{\xi L}{d} * \frac{1}{2} * \rho w^2 \quad (\text{Yhtälö 4})$$

jossa

Δp on seinämäkitkan aiheuttama painehäviö

ξ on kitkakerroin

L on pituus

d on sisähalkaisija

ρ on tiheys

w on nopeus

Kitkakerroin voidaan laskea Petukovin yhtälöstä 5:

$$\xi = [0,790 \ln(Re) - 1,64]^{-2} \quad (\text{Yhtälö 5})$$

jossa

ξ on kitkakerroin

Re on Reynoldsin luku

Reynoldsin luku voidaan laskea yhtälöllä 6:

$$Re = \frac{\rho w d}{\mu} = \frac{G d}{\mu} \quad (\text{Yhtälö 6})$$

jossa

w on nopeus

d on sisähalkaisija

ρ on tiheys

μ on dynaaminen viskositeetti

G on massavirran tiheys, joka lasketaan yhtälöllä 7:

$$G = \frac{\dot{m}}{A} \quad (\text{Yhtälö 7})$$

jossa

G on massavirran tiheys

\dot{m} on massavirta

A on pinta-ala

Massavirta voidaan laskea tehon ja entalpian erotuksen perusteella:

$$\dot{m} = \frac{\Phi}{\Delta h} \quad (\text{Yhtälö 8})$$

jossa,

\dot{m} on massavirta

ϕ on teho

Δh on entalpiaero

Putkihalkaisijaa ei näistä kaavoista saada suoraan vaan sopiva koko haetaan kokeilemalla, jotta painehäviöt osuudella pysyvät tarpeeksi matalina.

Kokonaispainehäviössä pitää ottaa huomioon lisäksi putkiosien ja varusteiden kertavastukset, ja ne on helpointa ottaa huomioon ns. ekvivalenttipituutena eli ne lisätään putkiston kokonaispituuteen. [13, s. 250–251]. Yleensä käytännössä kertavastukset huomioidaan kertomalla todellinen putkimatka 1,5. [16, s. 54]. Helpointa on käyttää suurissa kokonaisuuksissa mitoitusohjelmia.

6.1.1 Imuputket

Painehäviöiden kasvaessa imuhöyryn tilavuus kasvaa, jolloin kompressorin imupaine laskee. Tämä vaikuttaa kylmäaineen massavirtaan ja sitä kautta suoraan koneikon jäähdytystehoon. Tällöin myös kompressorin painesuhde kohoaa ja kylmäkerroin huononee. Painehäviöiden vuoksi kompressori mitoitetaan imuputken painehäviöitä matalammalla höyrystymislämpötilalla kuin höyrystin. [16, s. 53.]

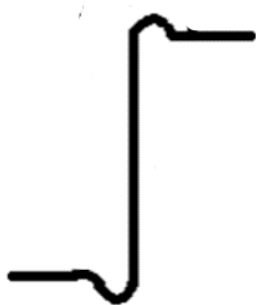
Hiilidioksidin korkean höyryn tiheyden vuoksi märkähöyrystysjärjestelmien paluuputket ja kuivahöyrystysjärjestelmien imuputket ovat huomattavasti pienempiä halkaisijaltaan kuin muilla kylmäaineilla vastaavalla teholla. Ero johtuu hiilidioksidin höyrynpainekäyrän suuremmasta jyrkkyydestä. Painehäviöt ilmoitetaan havainnollisuuden vuoksi tavallisesti paineita vastaavana kylästymislämpötilan muutoksena. [13, s. 248–250.]

Taulukko 2. Eri kylmäaineiden painehäviöt (kPa) 1 K:n kylästä lämpötilan muutoksena [17, s. 46.]

	20°C	0°C	-20°C	-50°C	-40°C
R717	27,4	16,1	8,4	3,8	2,4
R22	25,4	16,2	9,5	4,9	3,3
R404	29,8	19,2	11,4	6	4,1
R744	134,5	92,3	60,7	37	27,7

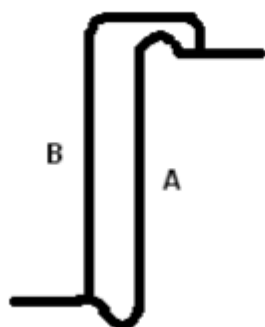
Painehäviöt imuputkessa aiheuttavat kylästä lämpötilan nousua höyrystimellä, jonka tuloksena on jäädytystehon lasku sekä huonompi hyötysuhde. Hiilidioksidi sietää muita kylmäaineita paremmin imuputken painehäviöitä ennekuin se alkaa vaikuttaa höyrystimen kylästä lämpötilaan, joka myötävaikuttaa pienempien putkien käyttöä hiilidioksidilla. [17, s. 46.]

Öljyn palautumisen vuoksi imuputken nousevissa kaasulinjoissa pitää olla suuri virtausnopeus, sillä öljy kulkee kaasuvirtauksen mukana. Nousevien kaasulinjojen öljyn kulkua varten tehdään öljymutkat n. 5 metrin välein. Tämä turvaa sen, että öljyn kerääntyessä mutkan pohjalle kaasun virtausnopeus lisääntyy, jolloin se kaappaa öljyä mukaansa. Nousulinjojen yläpäähän tehdään myös mutka, jotta öljy ei pääse valumaan linjaa alas. Runkolinjoja kallistetaan loivasti 0,2–0,5 cm/m kompressorille päin laskevaksi. [16, s. 146–148.]



Kuva 21. Öljymutka [16, s. 147].

Öljyn palautuksen pitää toimia sekä täydellä teholla että tarvittaessa myöskin osatehoilla. Tämän vuoksi tehdään esimerkiksi kaksois- ja jopa kolmoisputkinousuja. Kuvassa 14 on esitetty kaksoisputkinousu. Putki B mitoitetaan minimitehon mukaan, ja putkien A+B yhteinen painehäviö mitoitetaan koko tehon mukaan. Tällöin voidaan taata öljyn kulkeutuminen putkistossa. [16, s. 147.]



Kuva 22. Kaksoisputkinousu [16, s. 147.]

6.1.2 Paineputket

Paineputken painehäviöt nostavat kompressorin puristuspainetta, jolloin puristuksen lopulämpötila nousee. Tällöin kompressorin sähkön ottoteho kasvaa, jolloin kompressorin ottama sähköteho kasvaa ja koneikon hyötysuhde laskee. Painehäviöiden vuoksi

kompressori mitoitetaan paineputken painehäviötä korkeammalle lauhtumislämpötilalla kuin lauhtutin. [16, s. 53–54.]

Öljyn palautuminen pitää huomioida myöskin paineputkissa. Niissä voidaan käyttää kaksoisputkinousua kuten imuputkissakin. Kompressorin tai öljynerottimen jälkeen paineputkeen asennetaan takaiskuventtiili, joka estää lauhtumisen kanteen tai öljynerottimeen [16, s. 149–150.]

6.1.3 Lauhdeputket

Lauhdeputket mitoitetaan siten että kaasun jäähdyttimeltä tuleva neste saataisiin mahdollisimman helposti staattisen korkeuseron avulla varaajalle. Kirjallisuudessa on esitetty virtausnopeutena 0,5 m/s, mutta yleensä se mitoitetaan yhtä putkidimensioita pienemmäksi kuin paineputki. [16, s. 54.]

Öljynpalautus ei aiheuta ongelmia lauhdeputkissa, sillä molemmat ovat nesteenä ja liukenevat riittävän hyvin toisiinsa [16, s. 152].

6.1.4 Nesteputket

Nesteputkessa nopeuden tulisi olla luokkaa 1 m/s, jotta vältetään äkkipysähdysten aiheuttamat paineiskut [18, s. 7]. Nesteputken mitoituksessa pitää ottaa muiden painehäviöiden lisäksi huomioon korkeuserosta johtuva painehäviö, sillä pystynousussa nestepatsas aiheuttaa staattista painehäviötä. Nesteputken staattisen sekä dynaamisen painehäviön pitää olla pienempi, kuin alijäähdytyksen kompensoiva vaikutus, sillä muuten neste alkaa höyrystymään ennen paisuntaventtiiliä. [16 s. 54.]

Kokonaispainehäviö lasketaan yhtälöllä 9:

$$\Delta p_{kok} = \Delta p_p + \rho * g * h \quad (\text{Yhtälö 9})$$

jossa

Δp_{kok} on kokonaispainehäviö (Pa)

Δp on nesteputken sekä sen varusteiden painehäviö

ρ on tiheys (kg/m^3)

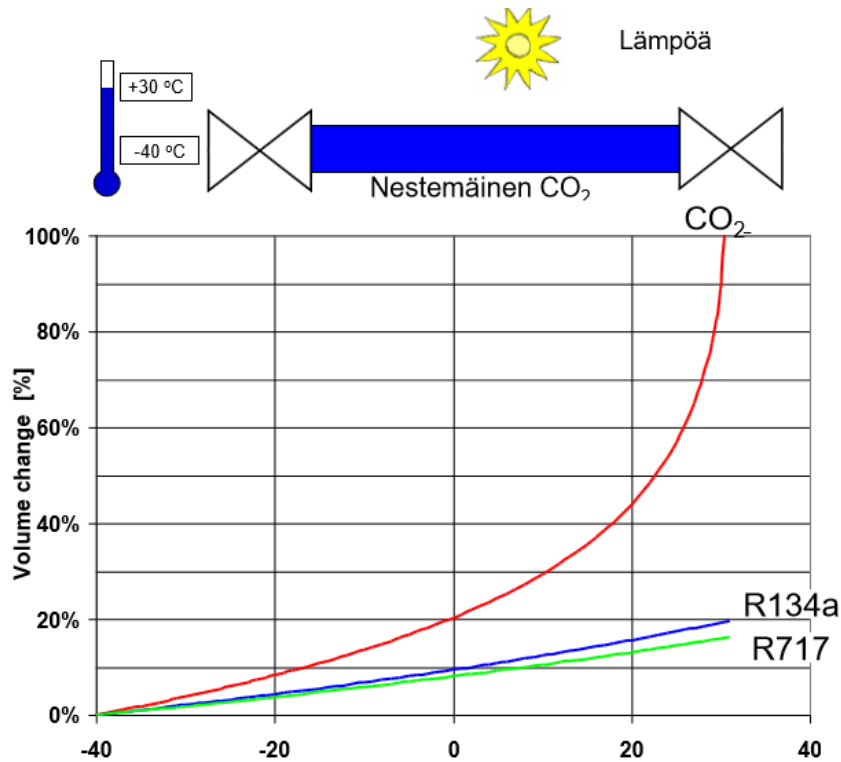
h on putkinousu (m)

g on maan vetovoima ($9,81 \text{ m/s}^2$)

Putkistoon on jo asennusvaiheessa hyvä laittaa tarpeeksi sulkuventtiileitä ja huoltoyhteitä, jotta koneiston osa pystytään tyhjentämään kylmäaineesta ennen korjaus- tai huoltoimenpiteitä ja tyhjiöityä ennen käyttöönottoa.

6.2 Lämpölaajeneminen

Hiilidioksidin kanssa pitää olla tarkkana, ettei se jää putkistoon loukkoon esimerkiksi huolto- tai korjauskatkon aikana. Tällöin hiilidioksidin lämpölaajeneminen voi hajottaa putkiston osia. Tämän vuoksi käyttökatkosten aikana on syytä tarkkailla painemittareita, ja katkokset on hyvä pitää mahdollisimman lyhyinä. [19, s. 8.] Kuva 23 havainnollistaa miten lämmitessään -40°C :sta $+30^\circ\text{C}$:seen hiilidioksidin tilavuus kaksinkertaistuu. [7, s. 10.]

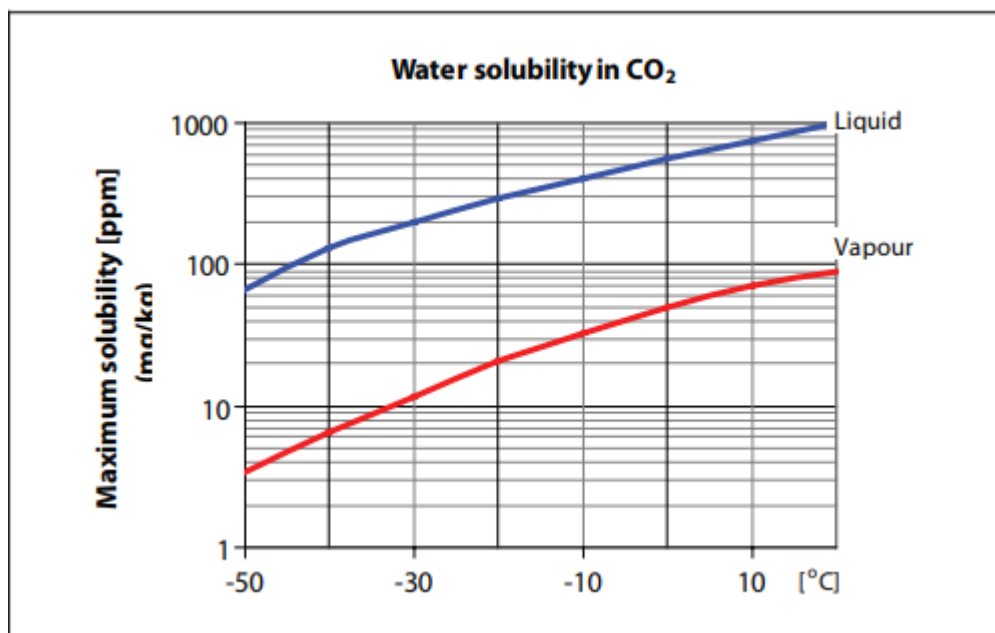


Kuva 23. Hiilidioksidin lämpölaajeneminen lämpötilan mukaan [7, s. 10].

6.3 Hiilidioksidi ja vesi

Vesi liukenee hiilidioksidiin huonosti, ja aiheuttaa putkistossa suuria ongelmia. Yleensä vesi päätyy järjestelmään yleensä öljyn mukana, käytettäessä huonolaatuista hiilidioksidia, täytettäessä järjestelmää sekä painekokeiden aikana.

Kuvassa 24 on esitetty veden liukenevuutta hiilidioksidiin sekä nestemäisenä että höyrynä. Veden liukenevuus riippuu lämpötilasta sekä olomuodosta. Nestemäinen hiilidioksidi sietää vähän enemmän vettä kuin höyrymäinen hiilidioksidi. Vesipitoisuuden pysyttyä liukenevuus rajojen alapuolella ei siitä ole ongelmaa, mutta jos pitoisuus kasvaa yli niin vesi alkaa tiivistyä pisaroiksi. Pisarat voivat aiheuttaa ongelmia järjestelmässä, etenkin lämpötilan laskettua alle 0 °C:n. Tällöin jääkiteet tukkivat venttileitä sekä muita komponentteja. [12, s. 17.]



Kuva 24. Veden liukenevuus hiilidioksiidiin [12, s. 17.]

7 Esimerkkikohte

Esimerkkikohteena toimii elintarvikkeita valmistavan yrityksen varasto, jossa siirrytään uuden laajennuksen myötä käyttämään hiilidioksidia kylmäaineena. Hiilidioksiidiin siirrytään asteittain eli osa vanhoista kylmäkoneista jää vielä toistaiseksi toimintaan, mutta tulevaisuutta varten asennetaan tarvittavat lämmönvaihtimet. Vanhoja kylmäjärjestelmän komponentteja ei voida käyttää hiilidioksidin kanssa, joten ne kaikki uusitaan.

Kylmälaitos toteutetaan siten että uusi hiilidioksidilla toimiva koneikko asennetaan uuden laajennuksen konehuoneeseen, ja kaasunjäähdyttimet sen katolle. Järjestelmä toteutetaan siten, että pakkas- ja kylmäkalusteista syntyvä lauhde-energia pyritään käyttämään mahdollisimman tehokkaasti lämmöntalteenoton sekä lämpöpumppujen avulla kiinteistön käyttövesi- ja lämmitysverkoissa.

7.1 Koneikko

Koneikko on ruotsalaisen Green& Coolin valmistama, ja se on toteutettu booster-kytkennällä. Koneikko toimii 50–80 baarin paineella riippuen siitä, miten sitä halutaan ajaa. Nestevaraajasta lähtevän nestemäisen hiilidioksidin lämpötila on 10–20 °C riippuen lämmöntalteenoton määrästä. Koneikko toimii kolmella eri painetasolla eli järjestelmässä on kolme eri hiilidioksidin höyrystymislämpötilaa. Periaatekytkentäkaavio on Jetitekin esitys järjestelmän kytkennästä, ja sitä on muokattu työhön sopivaksi.

7.2 Lämmönvaihtimet

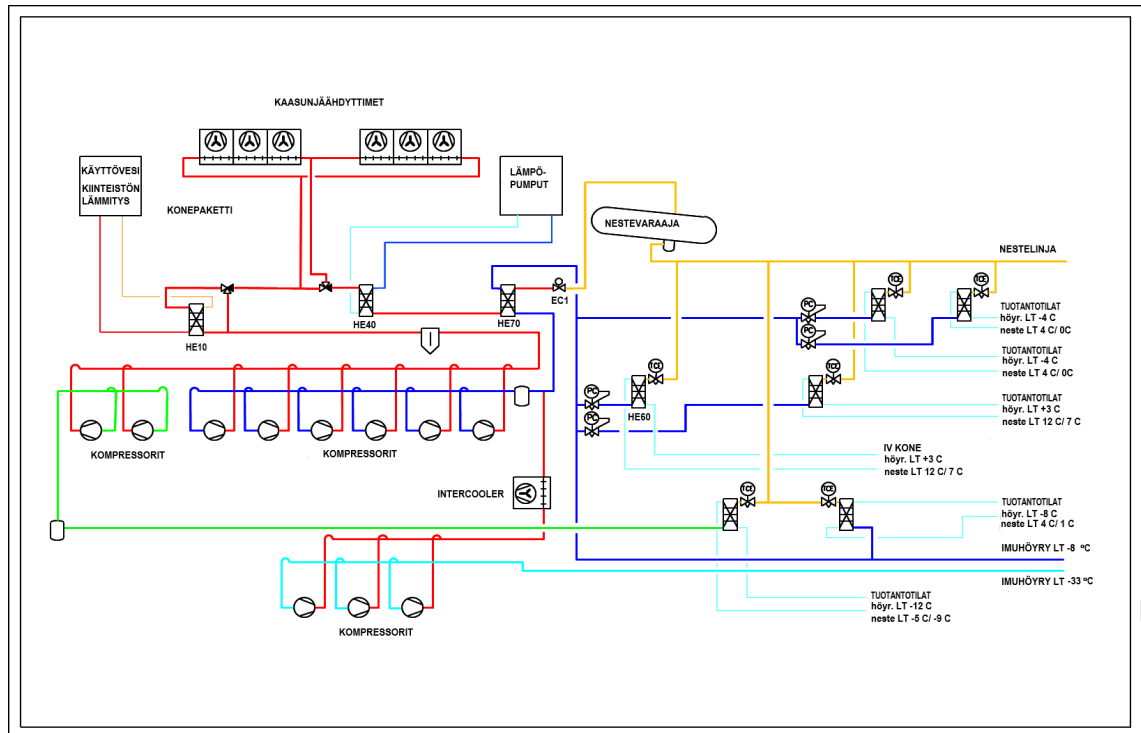
Lämmönvaihtimet ovat levylämmönvaihtimia, ja jokaisen vaihtimen toisella puolella virtaa hiilidioksidi ja toisella puolella vesi tai jokin jäätymätön pakkasneste.

Kylmäntuotannossa muodostuva lämpöenergia johdetaan lämmönvaihtimien avulla kiinteistön käyttövesi- ja lämmitysverkostoon. Järjestelmässä on myös kaksi kaasunjäähdytintä, joiden avulla saadaan hiilidioksidi jäähdytettyä, kun lämmöntarvetta ei ole. Kyseisessä järjestelmässä kaasunjäähdyttimien tarve onkin jatkuva, sillä kaikelle saadulle lauhde-energialle ei ole käyttöä.

7.3 Lämpöpumput

Järjestelmään liitetään kaksi lauhdelämpöpumppua, joiden avulla kuumakaasusta saatu lauhde-energiaa pystytään korottamaan tarvittavalle lämpötila tasolle. Näin sitä pystytään käyttämään edelleen käyttövesi- ja lämmitysverkostossa. Kylmäaineena lämpöpumpuissa kiertää 134a.

7.4 Kytkentäkaavio



Kuva 25. Kylmäjärjestelmän periaatekytkentä

7.4.1 Lämmönvaihdin HE10

Lämmöntalteenoton ensimmäisenä vaihtimena toimii HE10, ja siitä saadulla lauhde-energialla lämmitetään kiinteistön käyttövesi- ja lämmitysverkostoa. Vaihtimen välitysaiheena toimii liuospuolella vesi. Vaihtimessa kuumakaasu luovuttaa lauhde-energiansa veteen, jolloin kuumakaasu lauhtuu veden lämpötilan kasvaessa.

7.4.2 Lämmönvaihtimet HE40 ja HE70

Lämmönvaihdin HE40 toimii ikään kuin kaasunjäähdyttimen jatkeena, jossa liuospuolella toimii pakkasneste. HE40-vaihtimen avulla kuumakaasusta poistetaan se lämpöenergia, jota ei ole pystytty käyttämään hyödyksi HE10-lämmönvaihtimessa. Liuospuolella toimii pakkasneste, jonka avulla kuumakaasusta saatu energia siirretään kahdelle

lauhdelämpöpumpulle. Lämpöpumppujen avulla energia siirretään edelleen kiinteistön käyttövesi- ja lämmitysverkostoon.

HE70-lämmönvaihdin toimii tässä järjestelmässä lähinnä pisaraerottimena, jolla imuhöyrystä poistetaan nestekuplat ja varmistetaan siten että kompressoreille ei pääse nestettä. Imuhöyry hieman tulistuu lämmönvaihtimessa, ja kuumakaasu lauhtuu ennen nestevaraajaa.

7.4.3 Lämmönvaihdin HE60

HE60 toimii höyrystimenä, jolla jäähdytetään uusien tuotantotilojen IV jäähdytyspatteri. Vaihtimen liuospuolella toimii jokin jäätyvätön pakkasneste, josta hiilidioksidi sitoo itseensä lämpöä höyrystyessään. Vaihtimen jälkeen on asennettu imupainesäätöventtiili, jonka avulla säädetään hiilidioksidin höyrystymislämpötilaa. Näin voidaan varmistua siitä, ettei lämpötila vaihtimessa laske liian alas, jolloin vaihdin voisi jäätyä.

7.4.4 Lämmönvaihdin HE150

HE150 toimii höyrystimenä, jolla jäähdytetään tuotantotiloja. Se toimii eri lämpötilassa kuin HE60, mutta muuten periaate on sama. Vaihtimen liuospuolella kiertää etyleeniglykoli tai vesi- etanoliseos, josta hiilidioksidi sitoo lämpöä itseensä höyrystyessään. Höyrystymisen jälkeen hiilidioksidi siirtyy varaajaan, josta kompressorit imevät höyryn varaajan yläosasta. Varaaja toimii pisaranerottimena, jotta kompressoreille ei pääse nestettä.

7.4.5 Intercooler

Intercooler toimii välijäähdyttimenä, jossa pakkaspuolen kompressoreiden kuumakaasun lämpötila tasataan sopivaksi, jotta se voidaan johtaa edelleen plussapuolen kompressoreiden imulinjaan.

7.4.6 Paineenalennusventtiili EC1

Automaattisen paineenalennusventtiilin EC1 avulla pystytään säätämään korkeapaineinen kuumakaasu optimaaliselle tasolle lämmöntalteenoton kannalta.

8 Yhteenveto

F- kaasuasetuksen (EU 517/2014) myötä kylmäala on ollut viime vuodet vahvassa murroksessa, minkä vuoksi opinnäytetyön aihe oli erittäin ajankohtainen. Kasvaneet energiatehokkuusvaatimukset sekä ympäristöystävällisyys ovat kasvattaneet hiilidioksidin kysyntää viime vuosina. Vanhoista epäorgaanisista kylmäaineista halutaan eroon, jonka vuoksi luonnollisten kylmäaineiden merkitys on kasvanut. Kaupan kylmässä hiilidioksidi on erittäin suosittu kylmäaine, sillä se on myrkytöntä ja sopii hyvin käytettäväksi elintarvikkeiden kanssa. Lisäksi hiilidioksidia syntyy teollisuuden sivutuotteena, joten sen saatavuus on hyvä ja se on melko halpa kylmäaine.

Tämän insinööriyön tarkoituksena oli perehtyä hiilidioksidiin kylmäaineena, mitoitusperusteisiin putkiston ja lämmönvaihtimien osalta sekä järjestelmän toimintaan esimerkki-kohteen avulla. Työn yhteydessä huomattiin, että kylmäjärjestelmän liittäminen muuhun kiinteistön LVI-tekniikkaan vaatii paljon suunnittelutyötä sekä järjestelmän tuntemista. Hiilidioksidijärjestelmän tekniikka vaatii kylmätekniikan lisäksi erittäin paljon automaation sekä sähkötekniikan osaamista, jotta järjestelmä toimii halutulla tavalla. Kylmäjärjestelmien suunnittelu on ihan oma erityisalansa, joten on hyvä tiedostaa sen haasteet, ja käyttää alan asiantuntijoita tarpeen mukaan.

Kiitokset

Lopuksi haluan esittää kiitokset kaikille työssä mukana olleille henkilöille. Työn ohjaajia Rauno Virtaa R.J. Virralta sekä työn ohjaajia Esko Kaappolaa Danfoss Oy:stä ja Aki Valkeapäättä Metropolia Ammattikorkeakoulusta. Lisäksi haluan esittää erityiskiitokset Jetitekille arvokkaista tiedoista ja materiaaleista koskien hiilidioksidilaitoksen toimintaa.

Lähteet

- 1 Esittely. Verkkoaineisto. Insinööritoimisto R.J. Virta Oy. <<http://www.rjvirta.fi/>>. Luettu 5.9.2018.
- 2 Yritys. Verkkoaineisto. Rejlers Finland Oy. <<https://www.rejlers.fi/Yritys/>>. Luettu 5.9.2018
- 3 Padalkar A.S; Kadam A.D.2010. Carbon Dioxide as Natural Refrigerant. Verkkoaineisto. International Journal of Applied Engineering Research, Dindigul. Volume 1, No 2, 2010. Luettu 1.9.2018.
- 4 Energiatehokas Jäähalli. 2018. Huurre Finland Oy.
- 5 Laitinen, Ari; Räimä Miikka; Airaksinen Miimu. 2016. Jäähdytyksen teknologiset ratkaisut. Verkkoaineisto. <https://energia.fi/files/1359/Jaahdytysteknologiaselvitys_VTT_221216.pdf>. Luettu 15.11.2018.
- 6 Manner, Kaijaleena. 2013. Hiilidioksidikylmälaitoksen ja maalämpöjärjestelmän optimointi liikennemyymäläkiinteistössä. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. TUT TPub -tietokanta.
- 7 Kaappola, Esko. 2018. CO₂-kylmäaine ja -koneistot. Metropolia Ammattikorkeakoulu.
- 8 Sawalha, Samer. 2008. Carbon Dioxide in Supermarket Refrigeration. Doctoral Thesis. Tukholma: KHT Industrial Engineering and Management.
- 9 Carlberg, Petter. 2018. CO₂-laitoksen levylämmönsiirtimien mitoitus. Alfa Laval Nordic Oy.
- 10 Christensen, Rolf. 2014. Design of Heat Exchangers for Heat Recovery in Transcritical CO₂ Systems. Verkkoaineisto. <<http://www.r744.com/knowledge/papersView/1607>>. Luettu 16.10.2018.
- 11 Pulkki, Laura. 2017. Teollinen kylmä- ammoniakki vs. hiilidioksidi. Kylmäteknikan koulutuspäivät. Suomen Kylmäyhdistys ry.
- 12 Transcritical Refrigeration Systems with Carbon Dioxide (CO₂). 2008. Oy Danfoss AB.
- 13 Aittomäki, Antero. 2012. Kylmäteknikka. Porvoo: Suomen Kylmäyhdistys ry.

- 14 Brazed plate heat exchangers. 2018. Verkkoaineisto. Alfa Laval AB. <<https://www.alfalaval.com/products/heat-transfer/plate-heat-exchangers/brazed-plate-heat-exchangers/>>. Luettu 21.1.2019.
- 15 Yrjölä, Jukka. 2015. Vasta- ja myötävirtasiirtimet. Yliopettaja, Metropolia Ammattikorkeakoulu.
- 16 Hakala, Pertti; Kaappola Esko. 2013. Kylmälaitoksen suunnittelu. Tampere: Juvenes Print- Suomen Yliopistopaino Oy.
- 17 Natural Refrigerant CO2. 2009. Verkkoaineisto. Katholieke Hogeschool Limburg. <<http://www.koudecentraal.nl/documents/NaReCO2-handbook-2009.pdf>> Luettu 17.9.2018.
- 18 Kaappola, Esko. 2010. Putkiston mitoitus. Metropolia Ammattikorkeakoulu.

Kytentäkaavio

