

# Teknisk udvikling af chiller med CO<sub>2</sub> som kølemiddel

Torben M. Hansen

Miljøprojekt **Nr. 1143** 2007

Miljøstyrelsen vil, når lejligheden gives, offentliggøre rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, finansieret af Miljøstyrelsens undersøgelsesbevilling.

Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter.

Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

# Indhold

<b>FORORD</b>	<b>5</b>
<b>1 SAMMENDRAG</b>	<b>7</b>
1.1 BAGGRUND OG FORMÅL	7
1.2 UNDERSØGELSEN	7
1.3 HOVEDKONKLUSIONER	8
1.4 PROJEKTRESULTATER	8
<b>2 ENGLISH SUMMARY</b>	<b>13</b>
<b>3 INDLEDNING</b>	<b>15</b>
<b>4 VURDERING AF MARKED OG TEKNOLOGI</b>	<b>17</b>
<b>5 MODELBASERET ANALYSE</b>	<b>19</b>
5.1 GASKØLERTRYKSTYRING	19
5.2 DESIGNSPECIFIKATIONER	20
5.3 INDDRAGELSE AF VEJRDATA I DESIGNOVERVEJELSERNE	23
<b>6 ANLÆGSOPBYGNING</b>	<b>26</b>
6.1 KOMPONENTDESIGN	26
6.1.1 <i>Sammenføjningsmetoder og materialevalg</i>	26
6.1.2 <i>Gaskøler</i>	28
6.1.3 <i>Oliemanagement</i>	28
6.1.4 <i>Kompressor</i>	29
6.1.5 <i>Fordamper</i>	30
6.1.6 <i>Stilstandstryk</i>	30
6.1.7 <i>Sikkerhedsaspekter</i>	30
<b>7 VURDERING AF MARKEDSMÆSSIGT POTENTIALE</b>	<b>33</b>
7.1 BENCHMARKING AF CO <sub>2</sub> I FORHOLD TIL HFC-CHILLERE	33
7.2 DRIFTSØKONOMISKE KONSEKVENSBEREGNINGER	33
<b>8 PERSPEKTIVER</b>	<b>37</b>
8.1 EVALUERING AF PRODUKTETS MARKEDSMÆSSIGE OG MILJØMÆSSIGE POTENTIALE	37
8.2 MARKEDSVURDERING	37
<b>9 KONKLUSION</b>	<b>39</b>



# Forord

Nærværende rapport afslutter de indledende undersøgelser af tekniske og markedsmæssige muligheder for at anvende CO<sub>2</sub> som erstatning for HFC-kølemidler i vandkøleanlæg (chillere).

Rapporten indeholder en analyse af designforhold og driftsparametre, som er bestemmende for bæredygtigheden af CO<sub>2</sub>-chillerløsninger.

De driftsmæssige forhold er undersøgt med modelbaseret værktøjer og statiske data for temperaturforhold i Danmark med henblik på at optimere anlæggenes driftsparametre og for at etablere et rationelt sammenligningsgrundlag mellem CO<sub>2</sub> og HFC kølemidler.

Anvendelse af CO<sub>2</sub> som kølemiddel ved tryk over 45 bar er stadig ikke hyppigt udbredt. Det betyder, at udbuddet af egnede komponenter såsom kompressorer, varmevekslere, automatik og ventiler er begrænset og i visse tilfælde skal søges i andre industrianvendelser. I nærværende projekt er der endvidere fundet behov for at igangsætte udvikling af nye komponenter, idet kommercielle produkter ikke har været tilgængelig eller har været så dyre, at en anvendelse i et køleanlæg kan udelukkes.

Projektet er gennemført af ADVANSOR A/S som teknisk forundersøgelse af, hvorvidt der eksisterer et kommercielt og teknisk grundlag for produktion og opstilling af miljøvenlige chillere, der anvender CO<sub>2</sub> som kølemiddel.

Århus V  
18. september 2006  
Torben M Hansen



# 1 Sammendrag

## 1.1 Baggrund og formål

Med baggrund i den danske lovgivning på kølemiddelområdet, der træder i kraft fra 1. januar 2007, kalder det danske kølemarked nu på nye og bedre løsninger med naturlige kølemidler, som erstatning for de kraftige drivhusgasser. Allerede fra 2006 og 2-3 år frem vil der sandsynligvis opstå et vakuum på det danske kølemarked med færre udbydere af produkter, der på en omkostnings- og energieffektiv måde kan leve på til de gældende regler. Hovedparten af opstillede chillere i Danmark er produceret i udlandet, og de danske installatører og slutbrugere har derfor behov for danske alternativer. Dette vil øge behovet for nye aktører på markedet i Danmark, der med nye ideer og innovative løsninger kan frembringe konkurrencedygtige produkter, der opfylder såvel brugerkrav og lovgivningens retningslinier.

CO<sub>2</sub> har sammenlignet med de øvrige naturlige kølemidler, som kan anvendes i forbindelse med vandkøleanlæg (chillere) flere fordele. CO<sub>2</sub> er ugiftig og ubrændbar. Dette betyder, at der ikke behøves specielle anordninger mht. alarmer, nødventilation, brandsikring osv. Samtidig havner kølemidler i gruppe 2<sup>1</sup> (de ufarlige kølemidler), hvilket er en gevinst mht. design, konstruktion, service og vedligehold.

Udfordringerne for de CO<sub>2</sub> baserede chillere ligger på områderne omkring anlæggenes højere arbejdsstryk samt optimering af energiforbruget.

Det er projektets formål at undersøge designparametrene for 2 chillerløsninger hhv. i det høje og lave kapacitetsområde, hvor det højere arbejdsstryk er imødekommet gennem design og materialevalg, og hvor energiforbruget er minimeret således, at chilleren kan konkurrere med de bedste anlæg, der er på markedet i dag.

## 1.2 Undersøgelsen

Markedsorienteringen har haft høj prioritet i projektet, hvor markedets behov indledningsvis gennem interview med brugere er søgt afdækket indenfor klimatisering i kontorer og produktionsfaciliteter, samt proceskøling i fødevarer, farmaceutisk, plastsprøjtetøbning og anden fremstillingsindustri. Det tekniske udviklingsarbejde har været baseret på modelberegninger til optimering af komponenterne i systemet samt til af rørføringer. Modelforudsætninger er undervejs blevet valideret af komponentleverandørerne. Resultaterne af den tekniske undersøgelse er sammenlignet med HFC chillere på pris og ydelse ved bench-marking af 6 forskellige produkter på det danske marked.

---

<sup>1</sup> Bekendtgørelse 1141

Projektet er udført ved ADVANSOR i perioden april-september 2006.

### 1.3 Hovedkonklusioner

Den skærpede lovgivning vedrørende anvendelse af HFC kølemidler giver ikke anledning til reduceret mængde HFC i chillere, men anledning til ændret praksis, idet kølemidlet vil blive opdelt på et større antal kredse med mindre end 10 kg. Der er således ikke nødvendigvis et tvingende miljølovgivningsmæssigt motivationsgrundlag for ny anvendelse af CO<sub>2</sub> chillere.

En analyse af driftstidkostninger viser imidlertid, at der kan etableres et markedsdrevet købsmotiv for luftkølede CO<sub>2</sub> chillere med præference foran HFC chillere. Det er dog et springende punkt, at sådanne løsninger uden yderligere lovmæssigt understøttende foranstaltninger alene vil være bæredygtige, hvis der kan udarbejdes anlægsdesign som kan fremstilles og markedsføres til priser, som er sammenlignelige med HFC anlæg.

Varmevekslere og kompressorer (inkl. sikkerhedsautomatik) er de væsentligste omkostningsbærere i CO<sub>2</sub> chillere. Det er ikke så meget det højere tryk, som det er de lave producerede styktal, som giver anledning til højere anlægspriser. Det er således et forhold, der kan udbedres, hvis markedet stimuleres til øget efterspørgelse.

Fremstillingsprisen på en CO<sub>2</sub> chiller afhænger i høj grad af den valgte udformning. Det vurderes, at optimerede CO<sub>2</sub> chillere kan udgøre et konkurrencemæssigt seriøst alternativ under alle danske forhold.

Miljømæssigt er chillerområdet vigtig fordi flere og flere køleapplikationer vælger indirekte standard-units som teknologi. Der bliver således opstillet flere og flere chillere, da dette er en god, sikker og billig teknologi med minimal påvirkning for kunden.

Beregnes kølemiddelbesparelsen ved fuld markedsindtrængning under antagelserne i fodnoten<sup>2</sup> fås en besparelse på 1,7 tons CO<sub>2</sub> pr. anlæg pr. år for de små anlæg, hvilket svarer til 31.200 tons pr. år totalt. For de store anlæg fås en besparelse på 9 tons CO<sub>2</sub> per anlæg per år og 11.300 tons per år.

### 1.4 Projektresultater

Projektets tekniske udviklingsfokus har været knyttet til resultaterne fra en markedsundersøgelse, som angiver de overordnede rammer for den tekniske udviklingsdel:

---

<sup>2</sup> Kølemiddel: R134a, Lækage: 10%, Tab af kølemiddel ved skrotning: 50%, Levetid: 15 år



- Der vil normalt ikke være udbredt accept af, at et anlæg meromkostning tilbagebetales over en årrække af energibesparelse
- Ingen er afvisende overfor brug af CO<sub>2</sub>
- Lavere energiomkostning er salgsmotiverende, hvis prisen er identisk
- Man ønsker billigst muligt køling indenfor lovgivningens rammer
- Mange vil øge antallet af flerkredsopbyggede chillere med HFC
- I den lave ende af kapacitetsområdet (50-100 kW) anvendes sjældent rådgiver
- Proces og serverkøling har højere andel af rådgiverydelser involveret

Resultaterne forekommer ikke overraskende, men vigtigheden af, at der eksisterer et markedsmotiv for opstilling af flerkreds HFC-chillere, hvis ikke CO<sub>2</sub>-chiller kan udgøre et prisneutralt alternativ målt på drifts- og anlægsomkostninger skal ikke undervurderes. Dette faktum udstikker således rammerne for det tekniske udviklingsarbejde.

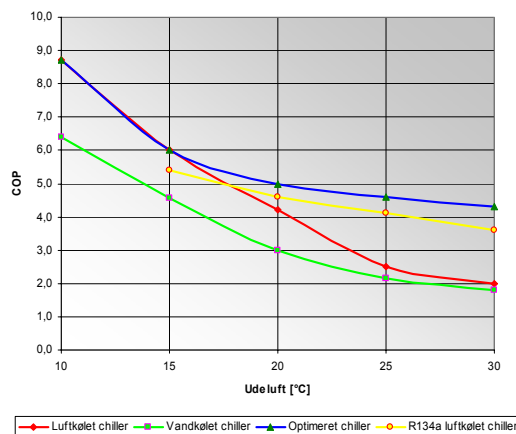
Tidligere danske og internationale undersøgelser har vist, hvorledes COP værdien i transkritiske CO<sub>2</sub>-anlæg udover fordampningstemperaturen kraftigt afhænger af trykket i gaskøleren, afgangstemperaturen fra gaskøleren, den interne varmeveksler og kompressorvirkningsgraden. Disse forhold er i høj grad relevante at forholde sig til, når et køleanlæg skal virke i et bredt og varierende driftsområde. Konklusion er entydigt, at der findes et energioptimalt gaskølertryk for ethvert transkritisk driftspunkt. For sikring af høj energieffektivitet er det derfor nødvendigt, at kunne styre trykket aktivt på højtrykssiden i forhold til de aktuelle driftskonditioner for en chiller opstillet under danske forhold.

Der er i projektet udviklet et optimeret gaskølerdesign, som muliggør maksimal udnyttelse af udeluftens kølepotentiale og derved tilsikrer laveste mulige afgangstemperaturer ud af gaskøleren ved udetemperaturer højere end 12-15°C. Det er værd at bemærke, at med dette design kan opnås bedre COP værdier for CO<sub>2</sub> chilleren i forhold til R134a i alle årets driftstimer. Som sammenlignende målestok er der opstillet ydelsesdata for 5 forskellige chiller-producenter med variation i anvendte kompressorer og kølemidler.

*COP for luftkølede chillere, kapacitet 300 ± 20 kW*

Leverandør	Tind	Tud	Kølemiddel	Kompressor	Udeluft	COP <sub>3</sub> <sup>footnote</sup>
-	[°C]	[°C]	-	-	[°C]	(Q <sub>o</sub> /P <sub>komp</sub> )
A	7	12	R-22	Hermetisk skrue	35	2.75
A	7	12	R407C	Semihermetisk	35	2.85
B	7	12	R407C	Semihermetisk	35	3.25
B	7	12	R134a	Semihermetisk	35	2.85
C	7	12	R407C	Scroll	35	3.37
D	7	12	R410A	Scroll	30	3.29
					35	2.85
E	7	12	R407C	Scroll	25	3.73
					30	3.21
					35	2.71

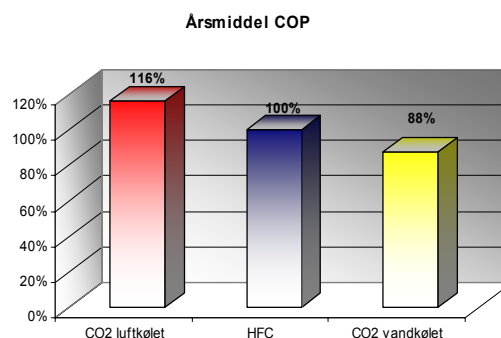
Sammenlignes COP værdier i tabellen med den gule kurve i nedenstående figur ses, at energiforbruget i praksis generelt er ca. 10-12% højere end beregnet og tallene understøtter således, at det er muligt at lave en luftkølet chiller, hvor energiforbruget med CO<sub>2</sub> som kølemiddel er lavere end for de HFC løsninger, der findes på markedet i dag.



*Figur: COP afhængighed af udeluftstemperatur for forskellige CO<sub>2</sub> chiller design*

Betydningen af den bedre performance med CO<sub>2</sub> er illustreret ved den årlige middel COP, som er beregnet drift ud fra time for time data fra DRY. I figuren herunder, er vist at en luftkølet CO<sub>2</sub>-chiller kan forventes at have ca. 15-20% lavere årligt energiforbrug end en HFC chiller. Vandkølede CO<sub>2</sub> chillere vil have højt energiforbrug pga. mange timer med høj temperatur ud af gaskøleren.

3 Køleydelse/kompressoroptag, excl pumper og ventilatorer



*Figur: Årsmiddel COP for CO<sub>2</sub> løsninger samt HFC til proceskøling*

Delkonklusionen på undersøgelserne er således, at det kan lade sig gøre at opfylde kriteriet fra markedsstudiet om lavere energiforbrug.

Det andet – og mest væsentlige kriterium – er at nedbringe salgsprisen til niveauet for HFC-chiller gennem anlægsdesign. Heri ligger fortsat en meget stor udfordring.

Der er forsøgt at anlægge en analytisk tilgang til vurdering af selve fremstillingsomkostninger vha. et 3D PLS program. Programmet er bl.a. blevet anvendt til at fortage konsekvensberegninger vedrørende montage og materialeomkostningerne ved alternative rørføringer og materialevalg samt til sammenligning af alternative systemudførelser. Det konkluderes om 3D PLS, at beregning af designomkostninger kan medføre besparelser, som kan tilbagebetale anskaffelsen. Det konkluderes samtidig, at montagen - til trods for de høje designtryk - ikke udgør den væsentligste omkostningsfaktor. Varmevekslere og kompressorer (inkl sikkerhedsautomatik) viser sig at være de væsentligste omkostningsbærere i CO<sub>2</sub> chillere. Det er ikke så meget det højere tryk, som det er de lave producerede styktal, som giver anledning til de højere komponentpriser. Det er således et forhold, der kan udbedres, hvis markedet stimuleres til øget efterspørgelse. Hertil kommer, at der på visse anvendelser mangler egnede konkrete produkter. Ekspempelvis eksisterede ved projektets begyndelse ikke kommercielle switches eller olieudskillere, hverken til CO<sub>2</sub> eller til de krævede trykspecifikationer. ADVANSOR har i samarbejde med en underleverandør udviklet en digital switch, der kan monteres i CO<sub>2</sub> kompressorer til styring af olieniveau. Gennem projektforløbet har der endvidere været dialog med flere producenter af olieudskillere til HFC kølemidler. En større international udbyder har som resultat valgt at udvikle 130 bars olieudskillere til CO<sub>2</sub>. Det er yderst positivt, da det vil blive medvirkende årsag til lavere pris på kommercielle CO<sub>2</sub> chillere. Projektarbejdet har således foranlediget, at der efterfølgende er mulighed for at opbygge et sikkert oliehandteringssystem til transkritiske CO<sub>2</sub> applikationen.



## 2 English summary

### 2.1 Objective

The new Danish legislation puts a ban on the use of HFC in units with refrigerant charges above 10 kg in new equipment installed after Jan 1, 2007. New solutions with natural refrigerant are demanded by the industry and currently quite a few viable solutions already exist and have proven well. However, in chiller applications in the capacity range from 80-400 kW viable solutions might be missing. Ammonia and hydro carbons may be applied, but the issue of price, toxicity and flammability, respectively, does represent an obstacle for the implementation of these refrigerants. For this reason a technical and economical feasibility study has been carried out to investigate the potential of applying carbon dioxide in medium sized chillers.

Compared to other refrigerants carbon dioxide is non-toxic and non flammable (group L1 refrigerant in EN-DS-378). Furthermore, carbon dioxide may have benefits from a thermodynamic point of view if low ambient temperatures can be exploited throughout the majority of the operating hours. On the other hand, the higher pressure and the trans-critical operation may cause challenges in practice.

The objective of the project is to evaluate how CO<sub>2</sub> chillers through design analysis and optimisation of operating strategies can be made competitive alternatives HFC in the range from 80-400 kW.

### 2.2 Conclusion

A detailed analysis of the operating conditions using hour by hour statistical Danish weather data reveals that the yearly average COP for CO<sub>2</sub> chiller can be improved by up to 20% compared to conventional HFC chillers. The conclusion is based on a fully optimised gas cooler design which together with the proper operating strategy is outmost important.

This results is important because it incorporates an economical advantage of CO<sub>2</sub> along with the obvious environmental benefit. In other words, a buying motivation can be stimulated if CO<sub>2</sub> chillers can be manufactured at prices comparable to HFC chillers.

A thorough analysis of assembly methods, skid arrangements and selection of optimised components indicate that the challenge in reducing cost is to a lesser degree associated with the high operation pressure compared to the cost influence of lower production volumes.

In conclusion, the potential exist to manufacture competitive chiller solutions with carbon dioxide for the Danish market. A commercial breakthrough is highly dependent on reduced prices trough simplified design and, hopefully production of scale benefits.



## 3 Indledning

CO<sub>2</sub> kan med fordel anvendes som kølemiddel i vandkøleanlæg (chillere). I modsætning til de øvrige naturlige kølemidler, der kan anvendes i denne applikation, er CO<sub>2</sub> ugiftig og ubrændbar. Dette betyder, at der ikke behøves specielle anordninger mht. alarmer, nødventilation, brandsikring osv. Samtidig havner kølemidler i gruppe 2<sup>4</sup> (de ufarlige kølemidler), hvilket er en gevinst mht. design, konstruktion, service og vedligehold.

Samlet set er der mange parametre der indikerer, at en CO<sub>2</sub>-baseret chiller bør kunne produceres, sælges og drives på meget konkurrencedygtige vilkår i Danmark.

Udfordringerne for de CO<sub>2</sub>-baserede chillere ligger på områderne omkring anlæggenes højere arbejdstryk samt optimering af anlægget i forhold til reduktion af energiforbruget.

Det er projektets formål at undersøge designparametrene for chillerløsninger i hhv. det høje og lave kapacitetsområde, hvor det højere arbejdstryk er imødekommet gennem design og materialevalg, og hvor energiforbruget er minimeret således, at chilleren kan konkurrere med de bedste anlæg, der er på markedet i dag. Projektets resultater skal danne baggrund for chillerløsninger, der kan produceres kommercielt og demonstreres i direkte forlængelse af projektet.

---

<sup>4</sup> Bekendtgørelse 1141





## 4 Vurdering af marked og teknologi

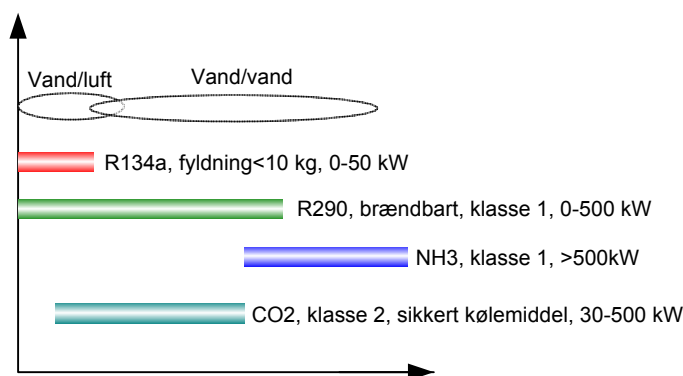
Med baggrund i den danske lovgivning på kølemiddelområdet, der netop nyligt er godkendt af Europa-Parlamentet, kalder det danske kølemarked på nye og bedre løsninger med naturlige kølemidler. Allerede fra 2006 og 2-3 år frem vil der sandsynligvis kunne opstå vakuum på det danske kølemarked med færre udbydere af produkter, der på en omkostnings- og energieffektiv måde kan leve på til de gældende regler.

Flere udenlandske producenter kan forventes fravælge levering til det danske marked, da udviklingsomkostningerne vil være væsentligt større end markedets størrelse vil kunne bære. Hovedparten af opstillede chillere i Danmark er produceret i udlandet, og de danske installatører og slutbrugere har derfor behov for danske alternativer.

Dette vil øge behovet for nye aktører på markedet i Danmark, der med nye ideer og innovative løsninger sandsynligvis vil have en konkurrencemæssig fordel.

Endvidere vurderes det at det danske forbud mod F-gasserne over en årrække vil kunne brede sig til resten af Europa gennem fælles lovgivning, hvilket vil kunne give markedsmæssige muligheder udenfor Danmarks grænser.

Undersøgelser<sup>5+6</sup> viser at der ca. er installeret 18.000 mindre chillere i DK med kuldeydelse under 30 kW og ca. 1.300 store chiller-anlæg til industriel køling. Dette projekt vil både fokusere på mindre luftkølede chillere omkring 50-300 kW, og større vandkølede chillere på 100-500 kW. Det vurderes, at de mindre chillere med kapaciteter under 50 kW hovedsagligt vil forsvinde med HFC-kølemidler, da fyldningerne kan holdes under 10 kg. Der findes i dag ikke CO<sub>2</sub>-baserede chillere tilgængelige på det danske marked<sup>7</sup>.



Figur 4.1: Oversigt over kølemidler i chillere afhængig af kølekapacitet

Det markedsmæssige potentiale, tekniske og økonomiske forudsætninger for en mulig introduktion af CO<sub>2</sub>-baserede chillere på det danske marked vil blive vurderet i forlængelse af tekniske og designmæssige analyser nedenfor.

<sup>5</sup> PSO 2005 - projektet "Energimærkning af industrielle produkter"

<sup>6</sup> EFP 2003 - projektet "Energioptimal styring og regulering af køleanlæg, ESO"

<sup>7</sup> Miljøstyrelsen, <http://www.naturlige-koelemidler.dk/>



# 5 Modelbaseret analyse

Chillere i Danmark anvendes både til luftkonditionering og til proceskøling. Luftkonditionering af bygninger i Danmark starter typisk ved udetemperaturer over 12°C (i moderne bygning dog væsentlig ved lavere udetemperatur), mens behovet for proceskøling er mere uafhængigt af udetemperaturen.

## 5.1 Gaskølertrykstyring

I modsætning til andre kølemidler er styringen af trykket i gaskøleren en væsentlig forudsætning for at opnå maksimal COP under varierende driftsforhold forårsaget af udekonditioner.

Højtryksiden i CO<sub>2</sub>-anlægget skal være underkritisk, i det omfang det er muligt, da energiforbruget herved er mindst muligt. Ved almindelige kondenserende drift er det kondenseringstemperaturen, som bestemmer trykket på højtryksiden.

Når anlægget skal køre overkritisk, er det nødvendigt at regulere trykket på højtryksiden.

Trykket ( $p_{ht}$ ) på højtrykssiden er bestemt af sammenhængen mellem massen af kølemiddel ( $M$ ), det indvendige volumen ( $V$ ) og temperaturen ( $T$ ):

$$p_{ht}=p(v,T)=p(V/M,T).$$

Denne tilstandsligning angiver, at der findes 3 principielle metoder til at regulere trykket på højtrykssiden, nemlig:

- ved at afstemme massen ( $M$ ) af kølemiddel på ht-siden til det ønskede tryk
- ved at afstemme det indvendige volumen ( $V$ ) på ht-siden til det ønskede tryk
- ved at afstemme temperaturen ( $T$ ) af kølemiddel på ht-siden til det ønskede tryk

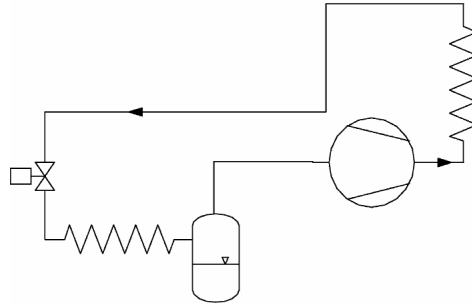
Af de 3 muligheder er det tilpasning af massen ( $M$ ) den hyppigst anvendte og bedst egnede. Metoden er relativ simpel og princippet består i momentan styring af massen af CO<sub>2</sub> som findes mellem kompressorens trykport og et ekspansionsorgan.

Idet massen af kølemiddel er konstant i anlægget, er det nødvendigt med en buffer, som kan optage de variationer, der opstår i massen på højtrykssiden, når trykket reguleres. Det kan praktisk foranstalles med en lavtryksreceiver efter fordamperen, som vist i nedenstående figur 5.1.

Den nødvendige buffervolumen afhænger af driftskonditionerne ( $p,T$ ) samt volumen på ht-siden. Kompakte anlæg kræver mindre buffervolumen – men stiller større krav til reguleringsorganets responstid og nøjagtighed.

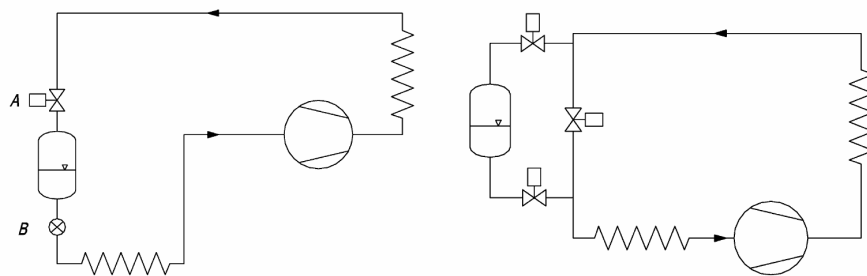
LT-receiveren kan også installeres før fordamperen, som dermed kan fungere som oversvømmet fordamper. Oversvømmet fordampning giver bedre kølemiddelfordeling i fordamperen og derfor bedre ydelse.

Alle kompressorer på markedet til CO<sub>2</sub> har olie carry-over på mellem 2-5% og anlægsudformning med LT-receiver kræver en anordning for olietilbageførelse, da olien ellers vil opkoncentreres i receiveren med nedsat ydelse til følge og eventuelt kompressorhavari.



Figur 5.1: Transkritisk anlæg med LT-receiver

Der findes også systemer med mellemtryksreceiver, som er relevante, idet de tillader brug af ekspansionsventil til styring af væsketilførelsen til fordamperen. To forskellige varianter er vist på figur 5.2 nedenfor.



Figur 5.2: Transkritiske anlæg med MT-receiver

Der er gennemført og rapporteret en lang række danske og internationale undersøgelser af, hvorledes COP-værdien i transcritical CO<sub>2</sub>-anlæg udover fordampningstemperaturen afhænger af trykket i gaskøleren, afgangstemperaturen fra gaskøleren, den interne varmeveksler og kompressorvirkningsgraden. Disse forhold er i høj grad relevante at forholde sig til, når et køleanlæg skal virke i et bredt og varieret driftsområde. Konklusion er entydigt at:

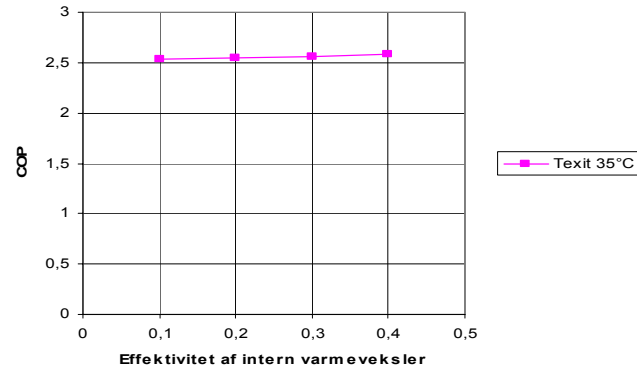
*Der findes et optimalt gaskølertryk for ethvert transcritical driftspunkt*

Det er derfor nødvendigt, at kunne styre trykket på højtryksiden. Afhængigheden af gaskølertrykket skal derfor undersøges i forhold til de aktuelle driftskonditioner for en chiller.

## 5.2 Designspecifikationer

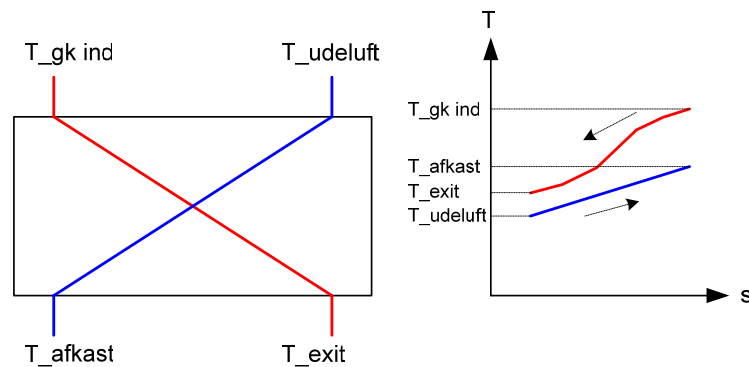
Chilleren skal levere koldt vand til air conditioning og til proceskøling ved de typisk anvendte driftsparametre 7 °C frem/12 °C retur. Der anvendes for alle analyser, hvis ikke andet er nævnt, en fast fordampningstemperatur på 3 °C svarende en fordampningstryk 37,7 bar samt en intern varmeveksler med en termisk effektivitet 0,1.

Anvendelsesområdet til komfort- og proceskøling fastlåser fordampningstemperaturen som parameter, og dermed reduceres kompleksiteten af reguleringen samtidig. Af analyserne fremgår, at effektiviteten af den interne varmeveksler stort set er neutral i forhold til det optimale gaskølertryk og har neutral indflydelse på COP-værdien.



Figur 5.3: Betydning af intern varmeveksler for chillerens energiforbrug

Hvis man betragter gaskøleren som vist nedenfor i figur 5.4, ses det at  $CO_2$ -temperaturen ( $T_{exit}$ ) ud af gaskøleren - for et givet transkritisk design - afhænger af udeluftstemperaturen.

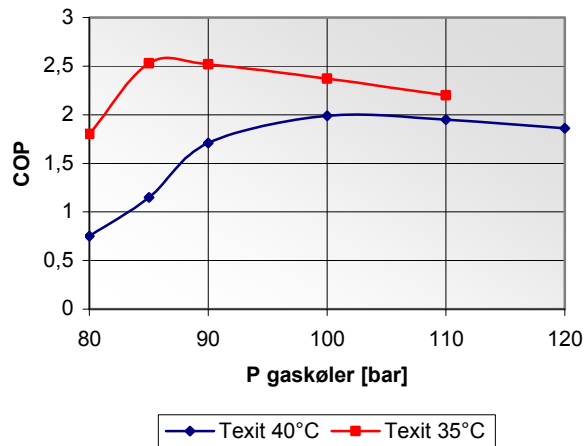


Figur 5.4: Udetemperaturens indflydelse på afgangstemperaturen fra gaskøleren

Det optimal gaskølertryk kan således for en given varmevekslerudformning henføres til udeluftstemperaturen og skal i en chillerapplikation varieres mellem 75 bar og 100 bar for at sikre optimal COP i det transkritiske område.

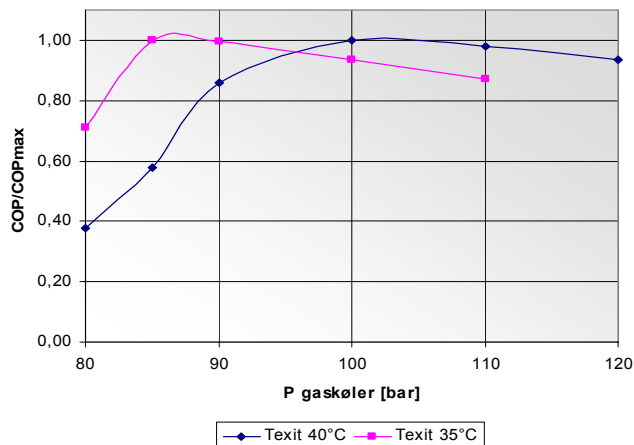
Det fremgår af figur 5.5 og 5.6, at COP værdien reduceres kraftigt ved tryk lavere end optimum, mens moderat højere tryk end optimumtrykket påvirker COP mindre signifikant. Sagt med andre ord er det bedre at ligge trykket lidt for højt end for lavt - især ved varme udekonditioner.

Dette er nødvendigt at inkludere i anlæggets styring af COP. Samtidig fremgår det ikke overraskende, at der i alle tilfælde skal tilstræbes en maksimal afkøling af trykgassen, og gaskølerens udformning skal nøje designes i forhold til at sikre denne afkøling.



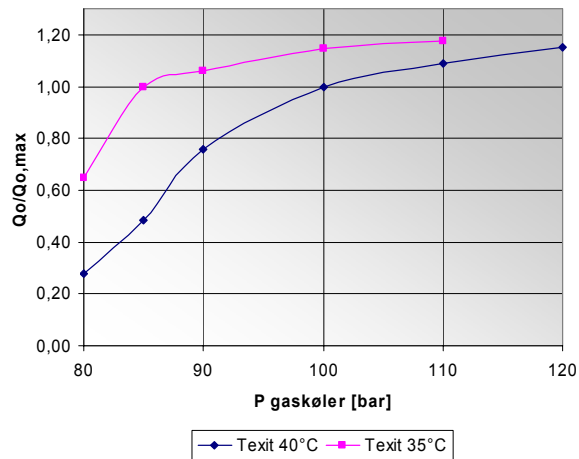
Figur 5.5: COP værdiens afhængighed af gaskølertrykket

Der ligger hermed også en reel mulighed for at udøve aktiv kapacitetsregulering – både op og ned - ved at styre højtrykket, når anlægget kører transkritisk. Ved underkritisk (kondenserende) drift er man hensat til traditionelle former for tabsgivende kapacitetsregulering i form af eksempelvis varmgas-bypass eller aflastning af kompressorer.



Figur 5.6: COP-værdiens relative afhængighed af gaskølertrykket

I praksis er den resulterende køleydelse mindst lige så vigtig som COP-værdien for anlæg der producerer koldt vand til proces eller luftkonditionering. I modsætning til COP-værdien stiger køleydelsen ensidigt med højere tryk i gaskøleren, se figur 5.7. Det betyder, at anlægget kraftigt mister ydelse ved driftstryk under set-punktet for COP optimum – et forhold som i øvrigt var velkendt blandt sejlede maskinmestre i 1930'erne, som øgede trykket ved at lukke lidt for højtryksventilen, når et skib sejlede ind i varme vande.



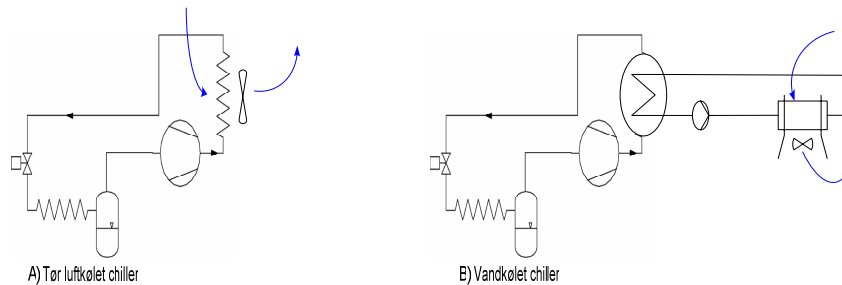
Figur 5.7: Kølekapacitetens ( $Q_o$ ) relative afhængighed af gaskølertrykket

### 5.3 Inddragelse af vejrdata i designovervejelserne

Til vurdering af udendørsconditioners indflydelse i relation til figur 5.4 er der taget udgangspunkt i klimadata fra DRY<sup>8</sup> for København. Materialet indeholder time for time oplysninger om sammenhørende temperatur- og luftfugtighedsdata.

Materialet er således anvendeligt til:

- fastlæggelse af det årlige antal timer med behov for komfortkøling
- beregning af års-COP og driftsomkostning (cost/benefit) for alternative anlægsudformninger og alternative kølemidler
- vurdering af anordninger til regulering (begrænsning) af stilstandstryk



Figur 5.8: Transkritiske  $CO_2$ -chillere, 2 principielle anlægsudformninger for varmeafkast

I alle anlægsudførelserne vil chillerdriften og energiforbruget være afhængig af udeluftstemperaturen. Da energiforbruget er stærkt afhængig af luftens tilgangstemperatur vil der være god fornuft i at vælge en løsning som sikrer den lavest mulige afgangstemperatur for  $CO_2$  ud af gaskøleren.

<sup>8</sup>Design Reference Year

Tabel 5.1: DRY data for udetemperaturen i København

T_udeluft (tør termometer)		
	°C	Timer/år
<b>Årsmax</b>	<b>32,1°C</b>	<b>1</b>
Temperatur	>30°C	3
Temperatur	>25°C	49
Temperatur	>20°C	351
Temperatur	>15°C	1490
Temperatur	>10°C	3553
Temperatur	<10°C	5207

Det antages normalt, at komfortkøling anvendes ved temperaturer højere end 12 °C, hvilket forekommer 2723 timer om året.

Det er almindeligt at lægge den højest forekommende udelufttemperatur til grund for dimensionering og design af anlægget. I så fald er den dimensionerende tilstand 32°C – i praksis vil de fleste acceptere en dimensionerende tilstand omkring 28°C under hensyn til de få timer, hvor temperaturen reelt er højere.

Til sammenligning af energiforbruget i forskellige designpunkter er vist 3 kredsprocesser (figur 5.12):

**A:**

Ved anvendelse af standard-design baseret med en luftkølet gaskøler og en dimensionerende udelufttemperatur 32°C og  $\Delta T=8K$  ud af gaskøleren fremkommer grønne kredsproces.

Anvendes enten en lavere dimensionerende udelufttemperatur end 32°C eller en fuldt optimeret gaskøler med  $\Delta T=3K$  kan processen angivet med rød opnås. Den røde kredsproces er sammenfaldende med den grønne kredsproces – bortset fra afgangstemperaturen. Ved faldende udetemperatur fremgår, at køleydelsen øges med faldende exit-temperatur fra gaskøleren, mens kompressorarbejdet kun øges i begrænset omfang. COP-værdien stiger derfor med faldende exit-temperatur.

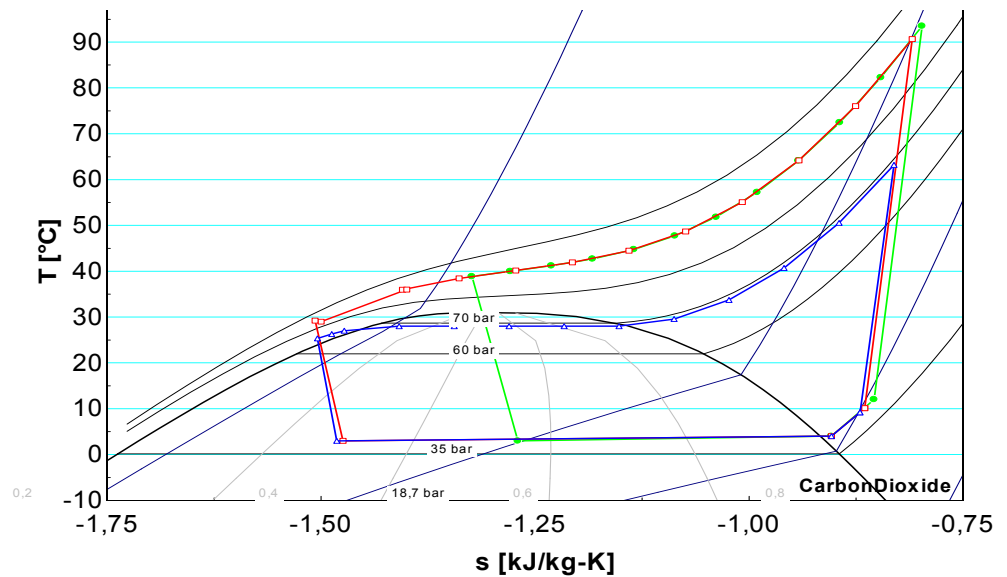
**B:**

Den blå kurve viser kredsprocessen ved kondenserende drift ved lave udetemperaturer. Det fremgår, at kompressorarbejdet er langt lavere end for de to transkritiske kredsprocesser. Beregnet er kompressorarbejdet ca. det halve og COP er således dobbelt så høj. Det er således værd at fastslå, at det er optimalt i videst muligt omfang, at henlægge driften til det subkritiske område.

**C:**

Driftsmæssigt ligner den case A, blot med den forskel, at der indgår en ekstra varmeveksling med omgivelserne (tørkøler) og heraf følger højere exit-temperatur fra gaskøleren. Her er regnet med 8K temperaturdifferens på tørkøleren og 4K i selve den vandkølede gaskøler – i praksis er dog påvist mulighed for lav temperaturdifferens mellem 2K og 3K mellem vand og CO<sub>2</sub>.

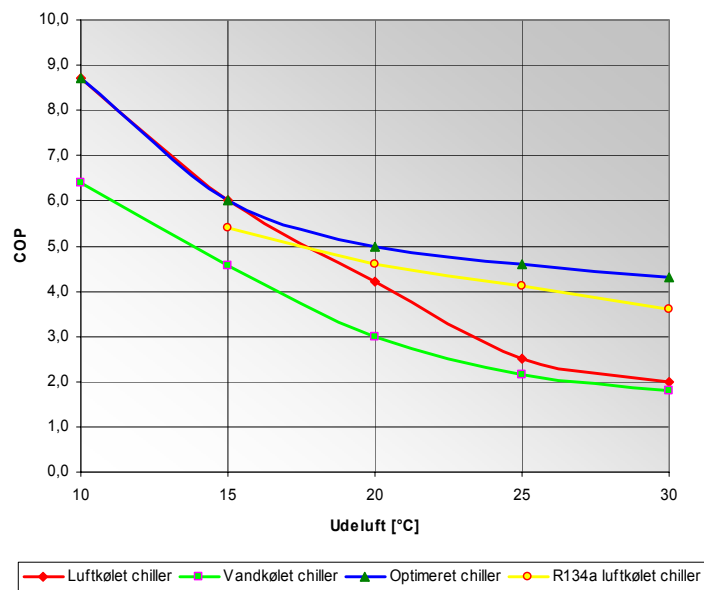




Figur 5.12: Kredsproces (i designpunkt) for case A, B og C.

Der er i projektet udviklet et optimeret gaskølerdesign som muliggør udnyttelse af luft maksimale afkølingspotentiale, hvor lavest mulige afgangstemperaturer ud af gaskøleren, ved udetemperaturer højere end 12-15°C, giver den optimale COP.

Det er værd at bemærke, at man med dette design kan opnå bedre årsmiddel COP (COSP<sup>9</sup>, vægtet for alle året driftstimer) for CO<sub>2</sub>-chilleren sammenlignet med R134a ("Optimeret chiller", blå kurve på figur 5.13).



Figur 5.13: COP's afhængighed af udelufttemperatur for forskellige design af CO<sub>2</sub>-chilleren

<sup>9</sup> Coefficient of Seasonal Performance

# 6 Anlægsopbygning

## 6.1 Komponentdesign

### 6.1.1 Sammenføjningsmetoder og materialevalg

I tidligere projekter er der anvendt kobber i subkritiske anlæg (op til 40 bar), mens der til transkritiske anlæg (op til 120 bar) hyppigt ses hydrauliske rør og skæringfittings, som er dyre, men giver kort montagetid. Endvidere viser erfaringer, at skæringfittings løsnes under drift pga. vibrationsudbredelse i rørsystemet, mens kobber er følsomt overfor udmattelsesbrud.

I nærværende projekt fokuseres på svejste stålrør, som materialemæssigt er billigt, mens montageprisen (svejsesamling) skal holdes nede gennem kompakt rørføring og nøje planlagte rørtræk, som kan standardiseres. I denne forbindelse er der i projektet valgt at inddrage anvendelse af 3D plant layout system (3D-PLS), som eksempelvis kendes fra planlægningen af store rørinstallation ombord på skibe eller i kemisk industri. Der findes flere udbydere af disse meget avancerede 3D-PLS systemer, hvoraf hovedparten ved nærmere eftersyn viser sig at være for omkostningstunge til at kunne retfærdiggøre investeringen indenfor produktionsforberedelse af chillere.

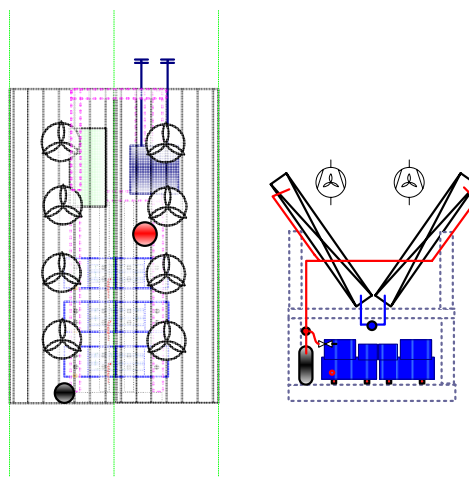
Der er derfor valgt at fokusere på løsninger med nedenstående minimum kravspecifikation.

- 2D og 3D layout faciliteter
- Prædefinerede rør, fittings og ventiler
- Design af trykbeholdere
- Automatisk styklistegenerator
- Komponentdatabase
- Kompatibelt med AutoCAD
- P&ID facilitet

Et 3D PLS program er bl.a. blevet anvendt til at fortage konsekvensberegninger vedrørende montage og materialeomkostningerne ved alternative rørføringer og materialevalg samt til sammenligning af alternative systemudførelse (2x4 cases, se afsnit 7).

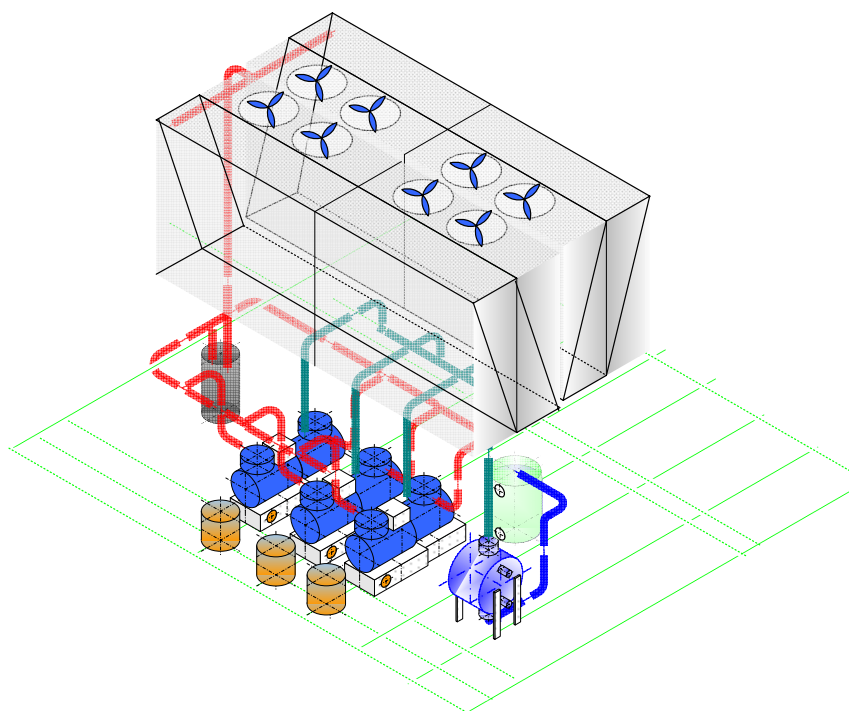
Det konkluderes om 3D PLS, at beregning af designomkostninger kan medføre besparelser, som kan tilbagebetale anskaffelsen.

Chillerløsninger kan udføres ganske kompakt, som vist i figur 6.1 nedenfor.



Figur 6.1: Planarrangement af luftkølet CO<sub>2</sub>-chiller med 300 kW kuldeydelse.

3D PLS er anvendt til at planlægge komponenternes indbyrdes placering på rammen. Der anvendes i den viste konfiguration et minimum af fittings og ventiler (ikke vist). Antallet af samlinger (svejsesømme) og forbruget af fittings fremkommer direkte fra tegningen. Det fremgår endvidere, at gaskøleren er den dimensionsgivende komponent i systemet.



Figur 6.2: Isometrisk komponentlayout for 300 kW chiller

Tabellen nedenfor viser hhv. driftstryk og designtryk for hhv. lavtrykssiden og højtrykssiden samt de komponenter der tilhører disse dele af anlægget.

Tabel 6.1: Oversigt over driftstryk og designtryk for hovedkomponenter

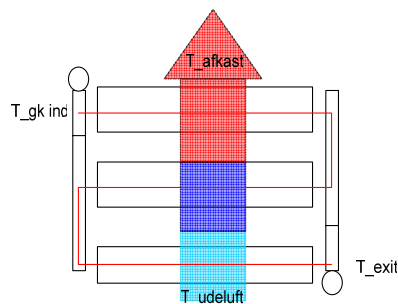
	Driftstryk [bar]	Designtryk [bar]	Hovedkomponenter
Lavtrykside	38	60	Sugeledning Ventiler Skueglas Fordamper Væskereceiver
Højtrykside	60-90	100	Trykledning HT ventiler Olieudskiller Oliereservoir Gaskøler

Rørdimensionerne er små for CO<sub>2</sub>-chilleren sammenlignet med HFC og ammoniak. For 300 kW kan alle hovedrør udføres i Ø40mm, mens der kan anvendes Ø32mm til 80 kW enheden.

### 6.1.2 Gaskøler

Ved udformning af gaskøleren skal tilstræbes at opnå lavest mulig afgangstemperatur på CO<sub>2</sub>-siden. Ved temperaturer under 31°C skal gaskøleren endvidere fungere som almindelig kondensator med mulighed for fri væskedræning.

I figur 6.3 nedenfor er vist den principielle udformning af en gaskøler egnet til transkritiske CO<sub>2</sub>-chillere. Princippet med at opdele gaskøleren i sektioner er udøvet med henblik på at tilnærme modstrømsvarmeveksling mellem luft og CO<sub>2</sub>.



Figur 6.3: Principiel udformning af luftkølet gaskøler

### 6.1.3 Oliemanagement

CO<sub>2</sub> kompressorer har forholdsvis højt olie carry-over i trykgassen pga. den høje gasdensitet. Under transkritiske forhold kan der være op til ca. 3-5 olieprocent i trykgassen, og der findes ikke standardolieudskillere tilgængelige. Uden en form for olieudskilning vil kompressoren efter kort tid mangle olie og havarere. Der har været mange nylige eksempler på dette såvel i praksis som i laboratorier. Endvidere vil store mængder olie i f.eks. mikrokanaler kunne reducere varmeovergangen i varmevekslere og dermed øge energiforbruget unødigt. Det er derfor væsentligt, at inkludere løsninger på såvel olieudskilning som balanceret olietilbageføring i projektet. For at minimere

potentielle problemer med oliereturnen skal anvendes olier (PAG eller POE), som er blandbare med CO<sub>2</sub> ved de forekommende driftstryk. Dette er forhold løst i samråd med kompressorleverandøren.

Ved anlæg opbygget med en enkelt kompressor er kravene til oliehandling mindre problematiske, da al olien fra olieudskillere, reservoir og fra fordamper via sugeledningen i sagens natur skal ledes tilbage til en og samme recipient. Det er imidlertid pga. kapacitetsområdet nødvendigt at opbygge CO<sub>2</sub>-chillere med multiple kompressorer. De enkelte kompressorer skal have samme mængde olie retur, som de mister under driften, og samtidig må de ikke overfyldes med olie, da det også kan føre til kompressorhavari. Hvis alle kompressorer altid er i drift samtidig kan der tilsigtes en balanceret olieretur til de enkelte kompressorer ved at udforme rørføring således, at oliens strømningsvej tilbage til hver kompressor er identisk. Ved kapacitetskontrol med ind- og udkobling af kompressorer stiger kompleksiteten og sikring af balanceret olietilbageføring alene gennem rørudformningen kan blive en risikofyldt affære.

Den sikre løsning består at udstyre hver kompressor med en olieniveauswitch, som sikrer oliereturnen til hver kompressor individuelt. Niveauswitchen kalder automatisk på olie til kompressoren, når niveauet falder under en mindste tilladelig værdi og lukker omvendt for oliereturnen, når niveauet i kompressoren stiger over et givet niveau. Løsningen indeholder således 1 stk. olieswitch med aktueret ventil pr. kompressor, 1 stk. fælles olierecipient og en fælles olieudskillere.

Der eksisterede ved projektets begyndelse ikke kommercielle switches eller olieudskillere, hverken til CO<sub>2</sub> eller til de krævede trykspecifikationer.

ADVANSOR har i samarbejde med en underleverandør udviklet en digital switch, der kan monteres i CO<sub>2</sub> kompressorer til styring af olieniveau.

Det er muligt at fremstille egne olieudskillere, som dels virker vha. gravitation (de større oliedråbers medrivning i gassen reduceres, når gashastigheden reduceres) dels ved gennemstrømning af filterlignende materialer. Gennem projektforløbet har der været dialog med flere producenter af olieudskillere til HFC-kølemidler. En større international udbyder har som resultat valgt at udvikle en 130 bars olieudskillere til CO<sub>2</sub>. Det er yderst positivt, da det vil blive medvirkende årsag til lavere pris på kommercielle CO<sub>2</sub>-chillere.

Projektarbejdet har således foranlediget, at der efterfølgende er mulighed for at opbygge et sikkert oliehandteringssystem til den transkritiske CO<sub>2</sub>-applikation.

#### **6.1.4 Kompressor**

Der findes flere leverandører af højtrykskompressorer på markedet. Mange af producenterne har dog ikke store kompressorer, men kun mindre kompressorer for anvendelse til kommerciel køling og AC. Dog findes der 4 leverandører der producerer større kompressorer. Dette er Mycom, Dorin, Bock og Bitzer. Afhængig af chillerens kapacitetsområde kræves mellem 6 og 10 kompressorer på en ramme for at opfylde kølebehov op til 300 kW. For at reducere anlægsomkostningerne er det ønskeligt at reducere antallet af kompressorer, da hver enkelt kompressor indebærer ekstra omkostninger i form af olieniveauekontrol, sikkerhedsautomatik, ventiler og instrumentering.

### 6.1.5 Fordamper

Valget er varmevekslere er vanskeligt primært ud fra de strenge krav til små temperatur-differencer (små tab) samt de høje tryk. På baggrund af er det vurderet nødvendigt at anvende en oversvømmet fordamper (høj effektivitet) og diverse varmevekslertyper er vurderet i forhold til de høje tryk. "Plate and shell" eller "Plate and disc" varmevekslerne har pladevarmevekslernes fordel forhold til kompakthed og pris, men samtidig rørbundtvekslerens egnethed til anvendelse ved høje tryk.

Designtryk for varmevekslerne er fastlagt til 38 bar driftstryk / 60 bar stilstandstryk.

Der er udsendt specifikationer på fordamper til 8 mulige leverandører, hvoraf 3 er i stand til at opfylde specifikationerne. Prisindekset for de 3 tilbud på en fordamper med 300 kW kuldeydelse er angivet i tabellen.

Leverandør	A	B	C
Prisindeks	100	136	147

Der ses at eksistere en forholdsvis stor spredning på producenterne. Sammenlignet med varmeveksler-priser til HFC-chiller er prisniveauet mellem 50 og 100% højere.

### 6.1.6 Stilstandstryk

Ved stilstand vil trykket på fordampersiden stige pga. varmeindfald. Man kan vælge at lade en kompressor fjerne damp fra fordampersiden til HT-siden (pump down) eller udforme anlægget så fyldningen trykudlignes i det samlede anlægsvolumen (samme tryk på HT og LT siden). Stilstandstrykket er således afhængigt af anlægsvolumen, anlægsvolumen og stilstandstemperatur.

Der er forskel på vandkølede og luftkølede anlæg. Luftkølede anlæg har større volumen på højtrykssiden hvilket både reducerer stilstandstrykket ved total trykudligning og trykket på HT siden ved pump-down.

### 6.1.7 Sikkerhedsaspekter

CO<sub>2</sub> henregnes til kølemiddelklasse 2, sikkerhedskølemidler, som ikke er brændbare eller giftige.

CO<sub>2</sub> betragtes i almindelig henseende ikke som toksisk, men som med alle andre stoffer er det et spørgsmål om koncentration, man udsættes for. Ved langstidsophold i forhøjet CO<sub>2</sub> atmosfære vil kroppen udvise forskellige fysiologiske reaktioner. Følgende grænser er relevante at observere:

- Mellem 2-3 volumeprocent kan der forekomme øget åndedrætsfrekvens og hovedpine
- 4% er normalgrænseværdi for IDLH (Immediate Danger to Life and Health)
- 5% sætpunkt anvendes for lav alarm som starter nødventilation.
- 10% er den lavest rapporterede dødbringende koncentration

Frostforbrænding fra væske er ikke relevant, idet CO<sub>2</sub> ikke kan eksistere på væskeform under trippelpunktet ved 5,2 bar a.

CO<sub>2</sub> udvikler ingen reaktionsprodukter ved varme og ild.

Det høje tryk som er 5-10 gange højere end i andre anlæg kan give anledning til overvejelser omkring energiudladning ved brud på rørledning, beholdere o.lign. Ved fri atmosfærisk ekspansion er ekspansionsenergi (eksplosionsenergi) er afhængig af massen i komponenten, trykket samt kølemidlets isentrope forløb.

Sammenlignet med eksempelvis R22 har R22 en højere eksplosionsenergi ved høje temperaturer ( $>120^{\circ}\text{C}$ ), som f.eks. ville kunne opstå ved brand.

Ved fri ekspansion kan  $\text{CO}_2$  danne tøris, og rørføring fra ekspansionsventil skal derfor udføres, så det ophobning og blokering fra tøris ikke kan opstå.

I enkelte undersøgelser er der gennemført teoretiske beregninger omkring BLEVE (Boiling Liquid Explosion), et fænomen som tidligere primært er undersøgt ifm. LPG tanke. Fænomenet opstår, når et indespærret volumen af væske eller overkritisk fluid udsættes (ved brud eller lign.) for en pludselig trykreduktion, hvorved der dannes en overhede væskefase, som fordamper momentant. Den momentane fordampning udvikler så stor gasmængde, at der dannes en ultrahøj trykgradient, som kan sprænge beholder på samme måde som ved en eksplosion. I praktiske forsøg med  $\text{CO}_2$  har ingen dog kunne identificere fænomenet under styrede laboratorieforhold. Det har heller ikke i litteraturen været muligt at fremdrage eksempler på  $\text{CO}_2$  tanke, hvor der skulle være problemer med opbevaring. Forholdet omkring BLEVE synes således primært at være af akademisk interesse snarere end af praktisk karakter.

Samlet vurderet er der ikke sikkerhedsmæssige aspekter, som kræver ekstraordinære foranstaltning sammenlignet med andre kølemidler.





# 7 Vurdering af markedsmæssigt potentiale

## 7.1 Benchmarking af CO<sub>2</sub> i forhold til HFC-chillere

For opnå et retvisende billede af, hvorvidt CO<sub>2</sub> kan finde anvendelse som kølemiddel i energieffektive chillerprodukter, er der gennemført en sammenlignende analyse, som inkluderer producenternes oplysninger om energiforbruget for luftkølede HFC-chillerløsninger fra 5 forskellige producenter med variation i anvendte kompressorer og kølemidler.

Tabel 7.1: COP for luftkølede chillere, kapacitet 300 ± 20 kW

Leverandør	Tind	Tud	Kølemiddel	Kompressor	Udeluft	COP <sup>footnote</sup>
-	[°C]	[°C]	-	-	[°C]	( $Q_o/P_{komp}$ )
A	7	12	R-22	Hermetisk skrue	35	2.75
A	7	12	R407C	Semihermetisk	35	2.85
B	7	12	R407C	Semihermetisk	35	3.25
B	7	12	R134a	Semihermetisk	35	2.85
C	7	12	R407C	Scroll	35	3.37
D	7	12	R410A	Scroll	30 35	3.29 2.85
E	7	12	R407C	Scroll	25 30 35	3.73 3.21 2.71

Sammenlignes COP-værdier i tabellen med den gule kurve ovenfor i figur 5.13 ses, at energiforbruget generelt i praksis er ca. 10-12% højere end beregnet ovenfor og tallene understøtter således, at det er muligt at lave en luftkølet chiller, hvor energiforbruget med CO<sub>2</sub> som kølemiddel er lavere end for de HFC løsninger, der findes på markedet i dag.

## 7.2 Driftsøkonomiske konsekvensberegninger

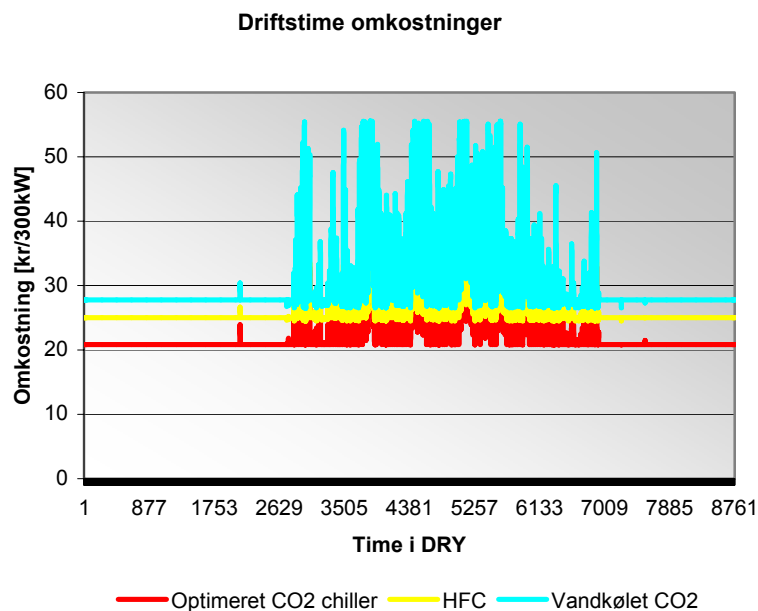
Det er naturligt at undersøge den praktiske betydning af forskellen i COP-værdi mellem CO<sub>2</sub> og en standard HFC-chiller på baggrund af ovenstående. Der skal ved analysen skelnes mellem chillerdrift til proceskøling og til luftkonditionering.

I det følgende regnes med 5000 årlige driftstimer for et proceskøleanlæg, og for luftkonditionering anvendes udetemperaturer over 12°C som kriterium.

Ved temperaturer lavere end 12°C er der endvidere forudsat konstant COP-værdi, som følge af minimum kondensatortrykstyring, som normalt anvendes aht. anlæggets funktionalitet.

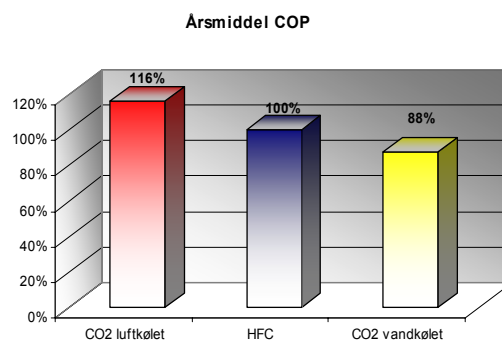
Nedenstående figur viser driftstimeomkostningen i DRY's 8760 timer for 300 kW køling produceret hhv. på den optimerede CO<sub>2</sub>-chiller, luftkølet HFC-chiller samt vandkølet CO<sub>2</sub>-chiller.

På baggrund af time for time omkostninger vist i grafen kan de årlige driftsomkostninger for de respektive løsninger summeres op.



Figur 7.1: Driftstimeomkostningen i DRY's 8760 timer for 300 kW køling

Betragtes den årlige middel COP, vist i figur 7.2, fremgår at en optimeret luftkølet CO<sub>2</sub>-chiller kan forventes at have ca. 15-20% lavere årligt energiforbrug end HFC-chilleren. Den vandkølede CO<sub>2</sub>-chiller har højt energiforbrug pga. mange timer med høj temperatur ud af gaskøleren.

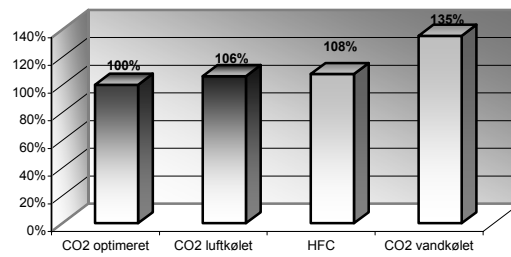


Figur 7.2: Årsmiddel COP for CO<sub>2</sub> løsninger samt HFC til proceskøling

For luftkonditionering, som vist i figur 7.3 er den relative forskel tydeligere, da det relative timeantal er større med høj udetemperatur. Den absolutte årlige driftsbesparelse er imidlertid kun omtrent 5000 kr/år<sup>10</sup> ved 300 kW.

<sup>10</sup> Ved en elpris på 0,50 kr/kWh

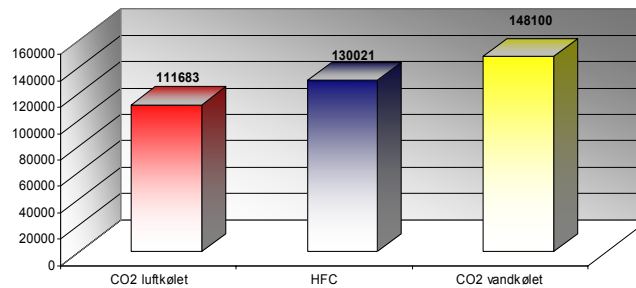
**Driftsomkostning til luftkonditionering**



*Figur 7.3: Relative årlige driftsomkostninger med CO<sub>2</sub> løsninger og HFC til luftkonditionering*

Mere interessant ser det imidlertid ud, når de årlige driftsomkostninger sammenlignes for 300 kW proces køling. Ved en forudsat gennemsnitlig elafregning på 0,50 kr/kWh, og 300 kW i 5000 timer pr. år kan der opnås en besparelse med CO<sub>2</sub>-chillere på ca. 20.000 kr/år.

**Årlige driftsomkostning til 300 kW proceskøling**



*Figur 7.4: Absolutte årlige driftsomkostninger med CO<sub>2</sub> løsninger og HFC til proces køling*



# 8 Perspektiver

## 8.1 Evaluering af produktets markedsmæssige og miljømæssige potentiale

Denne fase er baseret på delkonklusionerne af projektfaserne 1,2 og 3. De miljømæssige betragtninger inddrager såvel substitueret HFC såvel som energiforbruget under danske driftsforhold. Produktet forventes udbudt på komponentmarkedet som chillerblokke, dvs. uden øvrige tilhørende delsystemer og installationer på vandsiden. Analyserne omfatter således kun en miljømæssig sammenligning på komponentniveau og ikke på systemniveau.

Miljømæssigt er chillerområdet vigtigt fordi flere og flere køleapplikationer vælger indirekte standard-units som teknologi. Der bliver således opstillet flere og flere chillere, da dette er en god, sikker og billig teknologi med minimal påvirkning for kunden.

Beregnes kølemiddelbesparelsen ved fuld markedsindtrængning under antagelserne i fodnoten<sup>11</sup> fås en besparelse på 1,7 tons CO<sub>2</sub> pr. anlæg pr. år for de små anlæg, hvilket svarer til 31.200 tons pr. år totalt. For de store anlæg fås en besparelse på 9 tons CO<sub>2</sub> per anlæg per år og 11.300 tons per år.

Hertil skal indregnes CO<sub>2</sub> besparelsen fra det reducerede energiforbrug (20%) som udgør en samlet reduktion på 80-120 tons CO<sub>2</sub> pr. år.

## 8.2 Markedsvurdering

Der er udsendt 20 spørgeskemaer og gennemført 5 interviews med til brugere, montører og rådgivere. Der er på ingen måde tale om en fyldestgørende markedsundersøgelse, hvorfor alene konklusioner opridses nedenfor:

- Der vil normalt ikke være udbredt accept af, at et anlæg meromkostning tilbagebetales over en årrække af energibesparelse
- Ingen er afvisende overfor brug af CO<sub>2</sub>
- Lavere energiomkostning er salgsmotiverende, hvis prisen er identisk
- Man ønsker billigst muligt køling indenfor lovgivningens rammer
- Mange vil øge antallet af flerkredsopbyggede chillere
- I den lave ende af kapacitetsområde (50-100 kW) anvendes sjældent rådgiver
- Proces og serverkøling har højere andel af rådgiverydelser involveret

---

<sup>11</sup> Kølemiddel: R134a, Lækage: 10%, Tab af kølemiddel ved skrotning: 50%, Levetid: 15 år



## 9 Konklusion

Den skærpede lovgivning vedrørende anvendelse af HFC-kølemidler giver ikke anledning til reduceret mængde HFC i chillere, men anledning til ændret praksis, idet kølemidlet vil blive opdelt på et større antal kredse med mindre end 10 kg per kreds. Der er således ikke nødvendigvis et tvingende miljølovgivningsmæssigt motivationsgrundlag for anvendelse af CO<sub>2</sub>-chillere.

Implementering af CO<sub>2</sub>-chillere i markedet kan udløses ved lavere anlægspris eller gennem energibesparelser i forhold til HFC-chillere. Baseret på analyse af driftstidomkostninger kan der etableres et markedsdrevet købsmotiv for luftkølede CO<sub>2</sub>-chillere med præference foran HFC-chillere. Det er dog et springende punkt, at sådanne løsninger uden yderligere lovmæssigt understøttende foranstaltninger alene vil være bæredygtige, hvis der kan udarbejdes anlægsdesign som kan fremstilles og markedsføres til priser, som er sammenlignelige med HFC-anlæg.

Ved en forudsat gennemsnitlig elafregning på 0,50 kr/kWh, og 300 kW i 5000 timer pr. år kan der opnås en besparelse med CO<sub>2</sub>-chillere på ca. 20.000 kr/år.

Varmevekslere og kompressorer (inkl sikkerhedsautomatik) er de væsentligste omkostningsbærere i CO<sub>2</sub>-chillere. Det er ikke så meget det højere tryk, som det er de lave producerede styktal, som giver anledning til højere anlægspriser. Det er således et forhold, der kan udbedres, hvis markedet stimuleres til øget efterspørgelse.

Fremstillingsprisen på en CO<sub>2</sub>-chiller afhænger i høj grad af den valgte udformning. Det vurderes, at optimerede CO<sub>2</sub>-chillere kan udgøre et konkurrencemæssigt seriøst alternativ under alle danske forhold.

Århus V  
18. september 2006

Torben M Hansen  
ADVANSOR A/S