

Udvikling af et demonstrations- og testkøleanlæg, der anvender CO₂ som kølemiddel

Mogens Grube
Christian Berg AS

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.

Indholdsfortegnelse

| | |
|---|-----------|
| FORORD | 5 |
| SAMMENFATNING OG KONKLUSIONER | 7 |
| SUMMARY AND CONCLUSIONS | 9 |
| PROPOSAL FOR IMPROVEMENTS: | 9 |
| SUMMARY OF PROJECT RESULT: | 9 |
| INDLEDNING | 11 |
| 1 PROJEKTINDHOLD | 13 |
| 2 PROJEKTETS GENNEMFØRELSE | 15 |
| 2.1. SYSTEMANALYSE OG VALG AF KOMPONENTER | 15 |
| 2.1.1 Løsningsforslag | 16 |
| 2.2 VALGT ANLÆGSOPBYGNING: | 18 |
| 3 KOMPONENTVALG | 21 |
| 3.1 KOMPRESSORVALG | 21 |
| 3.2 EKSPANSIONSVENTIL OG VENTILSTYRING | 22 |
| 3.3 VARMEVEKSLER | 23 |
| 3.4 FORDAMPER | 23 |
| 3.5 SUGEAKKUMULATOR / RECEIVER | 23 |
| 3.6 FREKVENSONFORMER | 24 |
| 3.7 GASKØLER | 24 |
| 3.8 RØRFORBINDELSER | 25 |
| 3.9 RESULTATFORSØG | 25 |

Forord

Nærværende rapport beskriver projektet ”Udvikling af et demonstrations- og testkøleanlæg, der anvender CO₂ som kølemiddel”.

Rapporten er en kortfattet gennemgang af de tekniske analyser, beregninger og forsøg, der er gennemført i projektet samt en kort beskrivelse af det udviklede aggregat.

Formålet med projektet er at finde frem til et aggregat, som benytter et kølemiddel der ikke, som ammoniak og propan (giftigt og eksplosivt), afholder brugerne fra at skifte til et naturligt kølemiddel.

Projektet er økonomisk støttet af Miljøstyrelsen.

Projektets organisation består af følgende:

Christian Berg A/S

- Mogens Grube (Projektleder)
- Jørgen Gamst (Montage)
- Bo Andersen (EL/Automatik)

Alberg Teknik A/S (Automatik)

- John Alberg

Cooling Consult A/S (Rådgiver)

- Per Skærbæk

Der skal fra projektlederens side rettes en tak til projektgruppen samt naturligvis til Miljøstyrelsen.

Mogens Grube
Christian Berg A/S

Januar 2008

Sammenfatning og konklusioner

Denne rapport beskriver design, opbygning og test af et prototype-vandkøleaggregat med CO₂ som kølemiddel.

Udbuddet af komponenter er ikke, for at sige det mildt, voldsomt – men som det fremgår af rapporten, er det trods alt muligt at designe, opbygge og teste et system, som lever op til de forventninger, der kan stilles til CO₂ vandkøleaggregat.

Projektet har vist at visse komponenter er relativt svære at skaffe til transkritiske CO₂-systemer. Specielt var kompressorer af en rimelig kvalitet stort set umulige at skaffe. Der er i projektet anvendt en semihermetisk stempelkompressor. Kompressoren (motoren) er forsynet med en frekvensomformer, der gør det muligt at kapacitetsregulere.

Andre komponenter, som ligeledes har været svære at skaffe, er motorventilen og trykbeholder samt fordamperen, varmeveksleren og gaskøleren / kondensatoren.

Årsagen til at det er svært at skaffe komponenter er, at antallet af fabrikanter er få grundet de relativt høje tryk, som det transkritiske system arbejder med.

Tillige skal nævnes at leveringstiderne også har været meget lange; kompressoren havde f.eks. en leveringstid på 1 år.

Den nævnte motorventil styres af en specialregulator. Modsat normale kølesystemer reguleres motorventilen ikke i henhold til fordamperen, men ud fra gastemperatur og -tryk i gaskøleren (kondensatoren). Styringen får også et tryksignal fra trykket efter fordamperen, dvs. sugeakkumulator/receiver-trykket.

Der er i projektet gennemført en række teoretiske analyser af forskellige systemløsninger og der er afslutningsvis opbygget en prototype, der er testet efter gældende standard.

Den gennemførte prøvning af aggregatet viser en COP, i henhold til normal standard, der ligger på 3,4 – 4,0 hvilket ikke umiddelbart er tilfredsstillende. Men taget i betragtning, at det er en prototype, der efterfølgende bør optimeres, må resultatet betragtes som værende relativt fornuftigt.

Forbedringsforslag:

- Større fordamper (højere sugetemperatur)
- Anden type gaskøler, således at der kan køres i det subkritiske område i perioder med en højere udetemperatur og der opnås en lavere afgangstemperatur fra gaskøleren. Netop afgangstemperaturen og mest mulig drift i det subkritiske område er altafgørende i bestræbelserne på at optimere processen.

- Optimeret fyldning af kølemiddel som passer til den aktuelle afgangstemperatur fra gaskøleren. Den anvendte fyldning er ved afgangstemperatur for gaskøleren = 36° C.

En samlet opsummering på projektets resultater:

Det er i projektet lykkedes at konstruere en prototype med CO₂ som kølemiddel, der, såfremt de kommercielle forudsætninger (billigere komponenter) er til stede, med visse tekniske justeringer kan sættes i en egentlig serieproduktion.

Summary and conclusions

This project report describes design and test of a prototype chiller unit with CO₂ as refrigerant.

The fact that the transcritical system operates at a very high pressure has made it very hard to find the required main components applied in the prototype (compressor, heat exchangers, motor valves and relieves) - and at competitive prices.

The delivery time has been extremely long for most components - for instance, the compressor had a delivery time of 1 year.

The motor valve applied in the system is controlled by the pressure and the temperature after the gas cooler (air cooled condenser).

During the course of the project, a number of system solutions were analysed and at the end of the project a prototype was built and tested.

The tests carried out on the unit show that the COP is 3.4 – 4.0, which is not immediately satisfactory. However, considering the fact that the chiller unit is a prototype which will be optimised at a later stage, the result obtained now is relatively reasonable.

Proposal for improvements:

- Improvement of gas cooler in order to obtain a lower discharge temperature
- Evaporator with bigger surface (higher suction temperature)
- Optimisation of refrigerant charge which suits the current gas cooler leaving temperature

Summary of Project result:

The project constructing a prototype chiller with CO₂ has been a success. Provided that the components are available at competitive prices and effectuating some minor technical adjustments, it will be possible to start production of a CO₂ chiller unit.

Indledning

I forbindelse med udfasning af HFC'erne fra 1. januar 2007, er der et behov på det danske kølemarked for nye og bedre løsninger med naturlige kølemidler, som erstatning for de kraftige drivhusgasser. Allerede nu 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 op til de gældende regler. Dette skyldes at markedet i Danmark, der jo som bekendt har valgt at gå enegang, ikke er stort nok til at de store udenlandske producenter vil fremstille og udvikle de nødvendige komponenter/aggregater, der behøves på det danske marked.

Udfordringerne i forbindelse med konstruktion af vandkøleaggregater der anvender CO₂ som kølemiddel ligger i: at anlæggene opererer med et højt arbejdsstryk; at energiforbruget er højt; at sikre et effektivt olieretursystem og endelig at konstruere aggregatet af komponenter, der sikrer en konkurrencedygtig pris på det færdige produkt.

En undersøgelse af brugerne viser at en stor part af dem vil foretrække CO₂-aggregater, især hvor der er tale om udskiftning af eksisterende anlæg.

CO₂ har, sammenlignet med de øvrige naturlige kølemidler som kan anvendes i forbindelse med vandkøleanlæg (chillere), flere fordele. CO₂ er ugiftig og ubrændbar. Dette betyder, at der ikke behøves specielle anordninger mht. alarmer, nødventilation, brandsikring osv. Samtidig havner kølemidler i gruppe 2 (de ufarlige kølemidler), hvilket er en gevinst mht. design, konstruktion, service og vedligehold.

1 Projektindhold

Projektet blev inddelt i 5 faser med følgende aktiviteter:

- Fase 1: Systemanalyse

Projektet er inddelt med systemanalyser og der er udarbejdet en overordnet kravspecifikation, som danner grundlag for det videre arbejde i projektet.

- Fase 2: Design af kølesystem

Efter fastlæggelse af kravspecifikationen er kølesystemets design fastlagt, og der er undersøgt flere alternativer i denne fase - bl.a. om systemet skulle opbygges som et direkte ekspansionssystem, lavtryks receiversystem eller system med oversvømmet fordampere, væskeudskiller og selvcirkulation. Designet skulle ligeledes kunne skaleres op, således at de indhøstede erfaringer kan anvendes på anlæg med større kapacitet.

- Fase 3: Udvalgelse af komponenter

Med udgangspunkt i foregående faser er der fastlagt, hvilke komponenter, der skal anvendes til prototypen.

Fokus har bl.a. været lagt på designet af kompressoren, styring af oliereturssystemet og ekspansionsventilen.

- Fase 4: Opbygning og test

Med de udvalgte komponenter er der opbygget en prototype inklusive styring, som efterfølgende er testet ved de dimensionerende betingelser i det omfang, det var muligt.

- Fase 5: Projektledelse og videnformidling

Projektets resultater vil blive formidlet til kølebranchen og afslutningsvis er projektet præsenteret i nærværende rapport.

2 Projektets gennemførelse

2.1. Systemanalyse og valg af komponenter

Der er i projektet opstillet følgende overordnede krav til vandkøleaggregatet med CO₂ som kølemiddel:

- Ingen væsentlig meromkostning ved anvendelse af CO₂ sammenlignet med HFC
- Overordnede dimensioner på færdig unit skal være uændrede i forhold til HFC-units
- Effektivitet (energi) skal være på højde med den, der kan opnås ved anvendelse af HFC
- Komfortniveau skal være uændret i forhold til lignende eksisterende anlæg (samme ydelse, betjening etc.)
- Samme system og anlægsopbygning skal kunne anvendes til fremtidige anlæg med større kapacitet

Aggregatet skal levere koldt vand til luftkonditionering og til proceskøling ved de typisk anvendte driftsparametre 7° C frem/12° C retur. Der anvendes, hvis ikke andet er nævnt, en fast fordampningstemperatur på 3° C svarende til et fordampetryk på 37,7 bar.

Noget af det første, der skulle afklares ved projektets start var, hvordan testanlægget skulle opbygges ud fra hensyn til:

- Hvad forventes at blive de maksimale arbejdstryk, designtryk og trykprøvningstryk på anlægget?
- Anlægget skal kunne køre mest mulig tid som et underkritisk system. Dvs. når omgivelses temperaturen er lav nok, skal CO₂ kunne kondenseres i gaskøleren / kondensatoren. Dette lader sig gøre når gaskøleren / kondensatoren kan køle højtryks CO₂'en ned under 31° C. Ved drift i det subkritiske område hvor CO₂'en kondenserer til væske, opnås langt den bedste virkningsgrad på anlægget.
- Hvordan klares oliehandteringen i anlægget?
- Hvilke komponenter, der kan håndtere de krævede tryk, forventes det at kunne tilvejebringes?
- Hvilke relevante komponenter vil efterfølgende være til rådighed for masseproduktion?
- Vil disse komponenter kunne leveres med en fornuftig leveringstid og leveringssikkerhed?
- Vil komponenterne og anlægget kunne PED-godkendes (Pressure Equipment Directive) og være lovligt i henhold til standarderne?

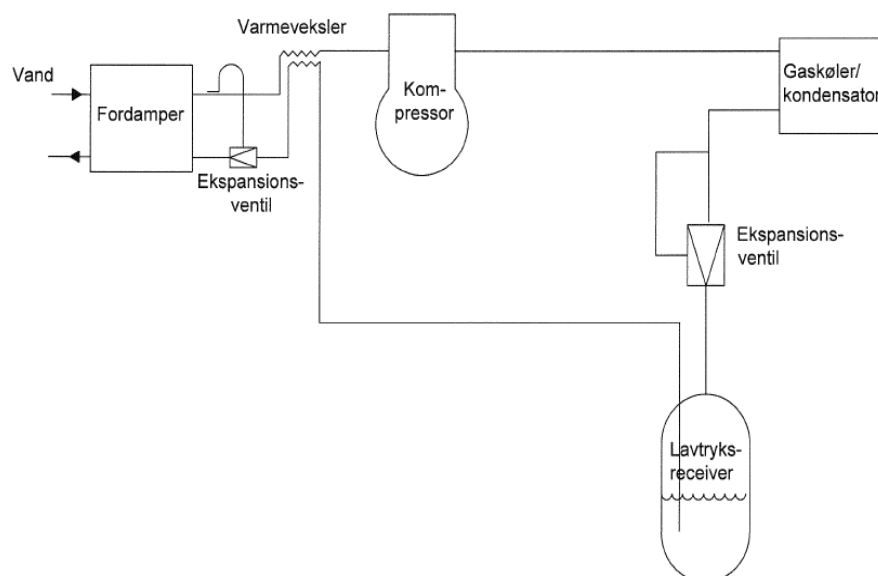
- Kan anlægget produceres til en fornuftig pris, så det er kommercielt salgbart?
- Kan der bygges anlæg med større kapacitet med denne anlægsopbygning og kan man ligeledes skaffe komponenter til dette?

2.1.1 Løsningsforslag

De forskellige systemløsninger, som kunne være relevante, er vist ved nedenstående illustrationer:

2.1.1.1 Konstruktion med direkte ekspansion

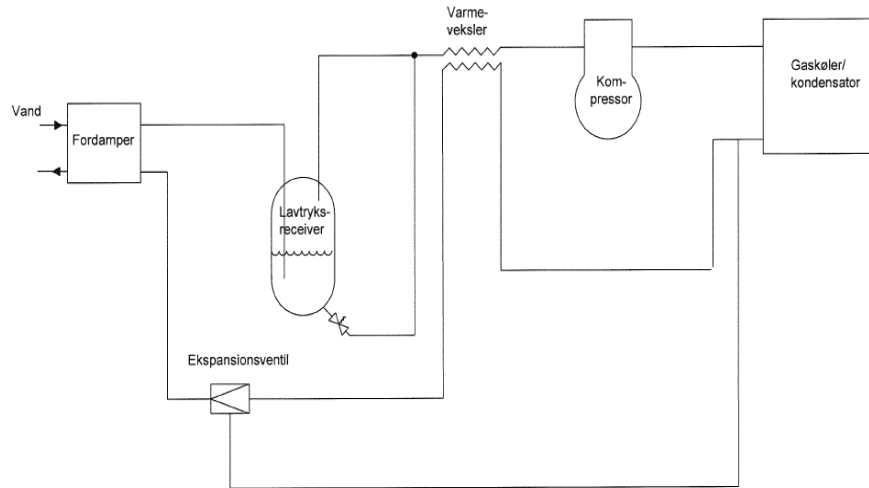
Illustration 1 – Direkte ekspansion



Denne anlægsopbygning er i princippet meget lig den velkendte opbygning af små køleanlæg med syntetiske kølemidler; der er dog den afgørende forskel at der er en trykstyringsventil på afgangen af gaskøleren, en mellemtryksbeholder og en ekspansionsventil, der styrer fordamperen.

2.1.1.2 Konstruktion med lavtryksreceiver

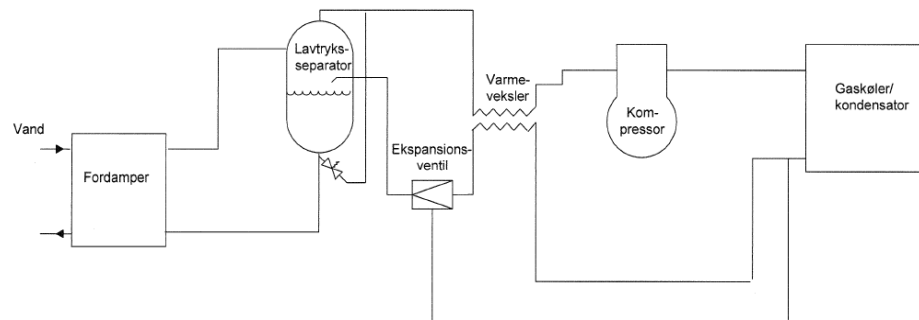
Illustration 2 – Lavtryksreceiversystem



Fordelen ved denne anlægsopbygning er, at der kun anvendes en reguleringsventil, da gasvæskeblandingen efter trykstyringsventilen ledes direkte gennem fordamperen uden anden styring. Den overskydende væske blandet med olie opsamles i en lavtryksreceiver efter fordamperen. Dette er umiddelbart en billigere anlægsopbygning i første omgang, men der opstår til gengæld et problem med at få olien returneret til kompressoren, da olien vil blive fanget og opkoncentreret i lavtryksreceiveren.

2.1.1.3 Konstruktion med oversvømmet fordamper med selv-cirkulation

Illustration 3 - Oversvømmet system



Denne konstruktion vil givetvis sikre den bedste udnyttelse af fordamperen, men øger aggregatets højde, da der er specifikke krav til den fysiske højdeforskel mellem væskeudskiller og fordamper. Endvidere bliver kølemiddelfyldningen relativt stor.

Den samme problematik ved denne opbygning, med at få tilbageføring af olie til kompressoren fra lavtryksseparatoren, gør sig gældende ved opbygningen med lavtryksreceiver.

2.2 Valgt anlægsopbygning:

Valget er faldet på anlægsopbygning med lavtryksreceiver af følgende årsager:

Det er øjensynligt den billigste opbygnings måde for et transkritisk køleanlæg af de størrelser og den type (chiller-unit med en fordamper), der undersøges i dette testanlæg.

Det virker sandsynligt, at der kan laves et funktionelt oliereturssystem til anlægget.

Systemet stiller ikke nogen krav til en separatorplacering med min. højde over fordamperen for at holde selvcirculationen af kølemiddel i fordamperen i gang.

Udnyttelsen af fordamperen vurderes til at blive næsten på højde med den, der kan opnås i et oversvømmet system og bedre end den, der vil gøre sig gældende i et direkte ekspansionsanlæg.

Anlægget kræver ikke nogen styring af fordamperen men kan nøjes med kapacitetsstyring, gaskøler- / kondensatorstyring og oliereturstyring.

Anlægget vil øjensynligt være mere sikkert mod væskeslag i kompressoren end et direkte ekspansionsanlæg.

Det er meget svært at styre en direkte ekspansionsfordamper med CO₂ som kølemiddel, så der med sikkerhed ikke kommer CO₂ på væskeform i sugeledningen ved voldsomme opkog af kølemiddel i fordamperen. Voldsomme opkog er en nærliggende mulighed ved kapacitetsændringer på anlægget og disse opkog vil pga. CO₂'s termodynamiske egenskaber ske mere momentant og fra væsken helt ned i "bunden" af fordamperen lige efter ekspansionsventilen. Dette opkog kunne "skyde" en del af den væske, der står i fordamperen, ud i sugeledningen ved hurtige kapacitets skift på systemet.

Der er gennemført og rapporteret en lang række danske og internationale undersøgelser af, hvorledes COP-værdien i transkritiske CO₂-anlæg udover fordampningstemperaturen afhænger af trykket i gaskøleren, afgangstemperaturen fra gaskøleren, den interne varmeveksler og kompressorvirkningsgraden.

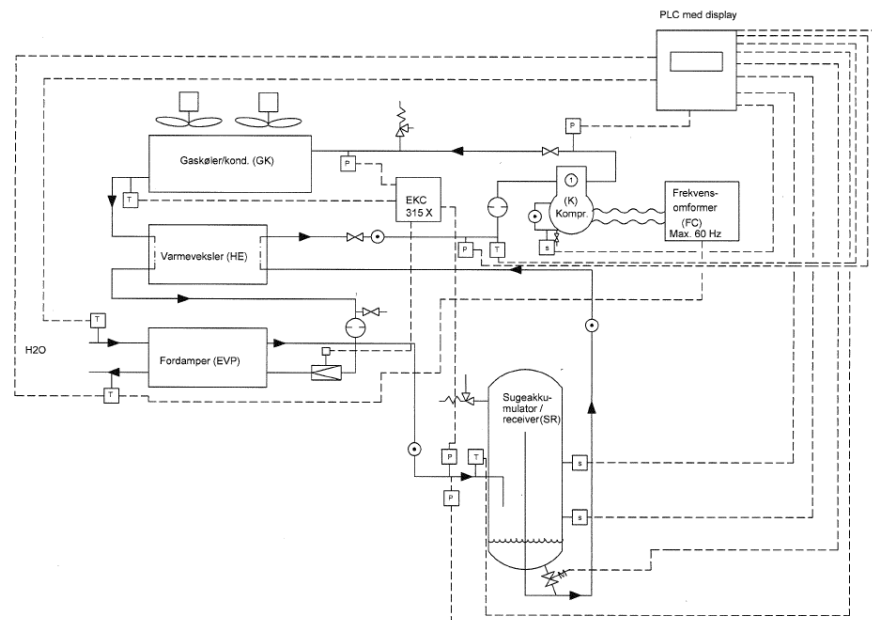
Disse forhold er i høj grad relevante at forholde sig til, når et køleanlæg skal virke i et bredt og varieret driftsområde. Konklusionen er entydigt at:

Der findes et optimalt gaskølertryk for ethvert transkritisk 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.

Disse betragtninger, samt ønsket om et aggregat som er relativt let at opbygge, med simpel styring og høj driftssikkerhed, førte os frem til nedenstående opbygning.

Illustration 4 -- Valgt anlægsopbygning



3 Komponentvalg

3.1 Kompressorvalg

Der er valgt en Bock RXX 26/31-2 CO₂ T-kompressor til projektet. Valget er foretaget ud fra flg. argumenter:

Kompressorleverandøren er en stor udbyder af kølekompresorer, der arbejder seriøst med udviklingen af kompressorer for CO₂ transkritisk drift.

Kompressorens kapacitet er passende for den størrelse testanlæg der ønskes.

Kompressoren behøver iflg. leverandøren ingen olieudskiller, da olieudkastet fra denne kompressormodel skulle være meget lavt.

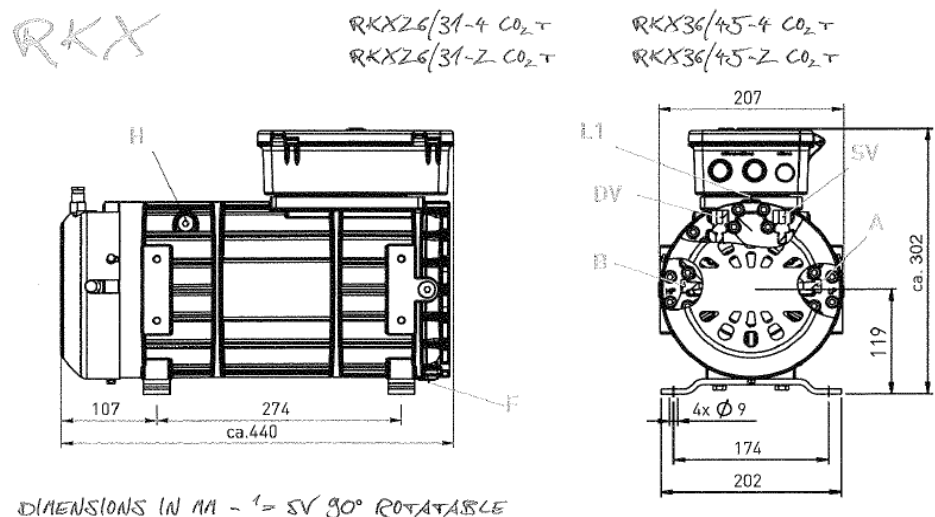
Kompressoren kræver ingen olietøler, som nogle af de alternative kompressorleverandører kræver til deres kompressorer.

Kompressoren kan køre med et med variabelt omdrejningstal i et meget stort variationsområde, som giver mulighed for et fornuftig kapacitetsreguleringsområde (600 til 3600 rpm) ved kapacitetsstyring via en frekvensomformer. Dette giver et kapacitetsreguleringsområde på ca. 17 % til 100 %.

Iflg. leverandøren vil kompressoren senere kunne leveres som en standardunit med påbygget frekvensomformer til kapacitetsregulering.

Illustration 5 -- Kompressor

DIMENSIONS AND CONNECTIONS



3.2 Ekspansionsventil og ventilstyring

Som ekspansionselement er valgt en Danfoss ICMT 20-A motorventil med ICAD 600S aktuator og den tilhørende EKC 315 X-styring.

Motorventilen styres iht. gaskølerens tryk og gas afgangstemperatur for at give anlægget optimal COP værdi under transkritisk drift.

Ekspansions / gasstyrings ventil:

Systemet sælges kommercielt til udvalgte kunder, der skønnes at vide nok om transkritiske CO₂-køleanlæg til, at de ville kunne anvende systemet på de CO₂-køleanlæg, de bygger. Disse kunder skal ligeledes kunne acceptere, at der stadig kan være detaljer i styringen, som endnu ikke er helt færdigudviklet.

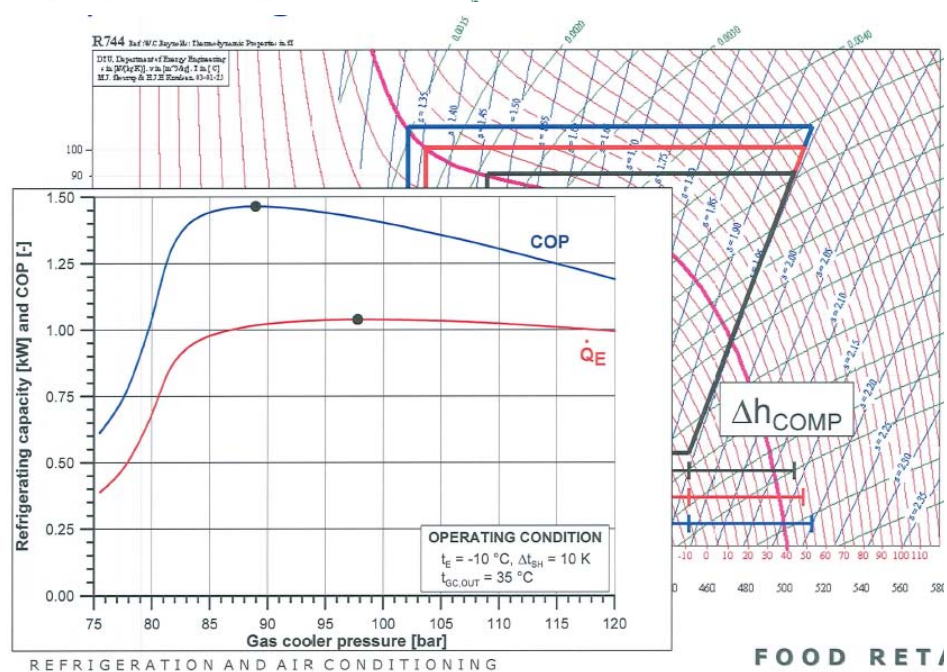
Der findes muligvis andre ventiler på markedet i kemi- eller dampsektoren, der vil kunne anvendes, men ikke med en tilhørende styring, der kan håndtere at arbejde i både det transkritiske og det subkritiske område med indbygget optimering af COP-værdien for CO₂-køleanlæg.

Illustration 6a -- ICMT gasventil med styring for transkritisk CO₂



- Optimum pressure compared to gascooler temperature.
- Automatic change-over to sub-critical operation when possible

Optimal High Pressure



3.3 Varveksler

Varveksler Coaxial exchanger type WVCI.

Varveksleren har to vigtige funktioner; den skal dels forøge anlæggets virkningsgrad, specielt under transkritisk drift, og dels sikre afkogning af kølemiddelvæske fra sugeledningen, der tilføres sammen med olien fra oliereturssystemet.

3.4 Fordamper

Fordamper Coaxial exchanger type VCI.

Fordamperen arbejder efter modstrømsprincippet og bliver tilladt at kunne levere væske til sugesiden, der bliver opfanget i lavtryksreceiveren / sugeakkumulatoren.

3.5 Sugeakkumulator / receiver

Max. arbejdstryk 90 bar, trykprøvning 135 bar. Receiveren kan rumme hovedparten af anlæggets fyldning samt olie opløst i CO₂-væske. Sugeakkumulatorens funktioner på dette aggregat er, at sikre kompressoren mod indtag af overskydende kølemiddelvæske fra fordamperen via sugeledningen og at opbevare CO₂ væske, hvori der er opløst olie. Olien ledes retur til sugeledningen og dermed til kompressoren via oliereturssystemets magnetventil i bunden af receiveren.

3.6 Frekvensomformer

Til styring af kapaciteten på anlægget er valgt en styring af omdrejningstallet på kompressoren med en frekvensomformer.

En frekvensomformer er en dyr løsning, men den vurderes at være nødvendig på et anlæg af denne karakter med kun en kompressor uden kapacitetsregulering. Anlægget har en kølekapacitet på ca. 15 kW og skal kunne bibeholde denne kapacitet ved transkritisk drift.

Transkritisk drift forekommer når gaskøleren / kondensatoren ikke kan afkøle kølemiddelgassen til en temperatur under 31° C. Ved denne driftstilstand falder anlæggets effektivitet med 20-40 % i forhold til subkritisk drift, alt efter anlæggets opbygning.

Det betyder at anlægget skal dimensioneres til at kunne yde de ca. 15 kW kapacitet ved transkritisk drift, men skal køre langt den overvejende tid subkritisk og dermed have 20-40 % overkapacitet. Dette forhold nødvendiggør kapacitetsregulering af systemet og kræver at den valgte kapacitetsregulering af anlægget er energieffektiv. At løsningen skal være energieffektiv udelukker et varmgas by-pass som mulighed og gør frekvensomformerdrift af kompressoren til den bedste løsning, selv om den er dyr.

Ved kapacitetsregulering af kompressoren kan der opretholdes en højere effektivitet (COP-værdi) under kapacitetsregulering end ved andre former for kapacitetsregulering på kompressor eller anlæg.

Der er valgt en Danfoss VLT som frekvensomformer til kapacitetsreguleringen, da denne lever op til følgende krav:

- Frekvensomformeren skal kunne godkendes af kompressorleverandøren
- Den skal kunne styres efter signalet fra en føler placeret i vand ud af fordamper
- Den er fra en anerkendt leverandør, der kan yde teknisk assistance på produktet fra dag til dag
- Den er betjeningsvenlig og kendt blandt de fleste potentielle kunder til denne type køleanlæg
- Kendt for at være af høj kvalitet på markedet

Der er valgt en Danfoss VLT FC 302/5000

3.7 Gaskøler

Model TTC – LPT 21.

Den her anvendte veksler virker som gaskøler ved transkritisk drift, hvor det på grund af en høj udelufttemperatur ikke er muligt at afkøle kølemiddelgassen i veksleren til en temperatur under 31° C.

Veksleren virker som kondensator når udelufttemperaturen tillader afkøling af kølemiddelgassen til 31° C.

Ved transkritisk drift er anlæggets kapacitet mellem 20 og 40% lavere end ved subkritisk drift og dermed er anlæggets effektivitet (COP) også betydeligt forringet.

Dette forhold betyder at gaskølerens kapacitet og effektivitet er af afgørende betydning for hele anlæggets effektivitet. Jo tættere på de 31° C udetemperatur gaskøleren kan arbejde under og holde gassen kølet ned til 31° C, jo mere effektivt er hele CO₂-køleanlægget, da man i længere tid kan arbejde med subkritisk drift.

Gaskøleren er til gengæld også en meget dyr komponent på anlægget. Vælges denne med stor effektivitet og kapacitet, bliver den også forholdsvis meget dyrere.

Et af de interessante testresultater bliver netop hvor meget af tiden anlægget kan holdes på subkritisk drift med den valgte gaskøler.

Den valgte gaskøler / kondensator skal kunne leve op til følgende krav:

Max. arbejdstryk: 90 bar

Testtryk: 135 bar

CO₂-gas ind i køler: 94° C og 87 bar

CO₂-gas ud af køler: 35° C og ca. 86,5 bar ved 30° C omgivelsestemperatur og luftfugtighed svarende til danske konditioner.

3.8 Rørforbindelser

Rørene udføres i rustfrit stål, der søvloddet sammen, hvilket samlet set skulle billiggøre montagen ligesom det undgås at skulle male rørforbindelserne. Der må ikke anvendes gevindsamlinger, og hvis det ikke kan undgås, bør disse efterfølgende loddet for at opnå tilstrækkelig tæthed.

3.9 Resultatforsøg

- Der er gennemført test af aggregatet ved at det blev indbygget i et eksisterende varme/kølesystem
- Den viste buffertank har monteret varmelegeme så man kan tilføre ekstra kølebelastning
- I vandkredsen er der monteret måleudstyr

