

# Reversibel A/C unit med CO<sub>2</sub> som kølemiddel

Dantherm Air Handling A/S

Danfoss A/S

Teknologisk Institut, Køle- og Varmepumpeteknik

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>SAMMENFATNING OG KONKLUSIONER</b>	<b>6</b>
<b>1 INDLEDNING</b>	<b>7</b>
<b>2 PROJEKTINDHOLD</b>	<b>8</b>
<b>3 PROJEKTETS GENNEMFØRELSE</b>	<b>10</b>
3.1 BESKRIVELSE AF LØSNINGSMULIGHEDER	10
3.1.1 <i>Løsningsforslag 1: Indirekte system, hvor køleanlægget er samlet i en unit med vandbaserede eksterne flader</i>	10
<i>Ulempen er:</i>	11
3.1.2 <i>Løsningsforslag 2: Kompakt og traditionelt kølesystemopbygning, hvor reversibiliteten kan opnås enten via 1 firvejsventil eller alternativt 2 tovejsventiler</i>	12
3.1.3 <i>Løsningsforslag 3: Kompakt og traditionel kølesystemopbygning, hvor reversibiliteten opnås ved at vende luftstrømmen, hvorved firvejsventilen kan spares, og anlæggets drift vil blive væsentlig mere stabil</i>	13
3.1.4 <i>Valg af løsning for opbygning</i>	14
3.1.5 <i>Systemanalyse for den valgte løsning</i>	14
3.1.6 <i>Opbygning af kølekredsløb for den valgte løsning</i>	15
<b>4 OPBYGNING OG AFPRØVNING</b>	<b>18</b>
<b>5 KOMMERCIEL VURDERING AF PRODUKTET</b>	<b>20</b>
<b>6 FORMIDLING AF PROJEKTETS RESULTATER</b>	<b>21</b>
<b>7 LITTERATURLISTE</b>	<b>22</b>
<b>8 ENGLISH SUMMARY</b>	<b>23</b>
<b>9 BILAG A</b>	<b>24</b>
<b>DEVELOPMENT OF REVERSIBLE HEAT PUMPS WITH CO<sub>2</sub> AS REFRIGERANT THAT COMBINES VENTILATION AND HEATING OF DOMESTIC HOT WATER</b>	

# Forord

Denne rapport beskriver projektet "Reversibel A/C unit med CO<sub>2</sub> 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 apparat.

Projektets overordnede mål er at bidrage til udbredelsen af renere produkter til køleområdet (hvor varmepumpebranchen hører under) ved at anvende køleanlæg med naturlige kølemidler, hvor der hidtil har været anvendt HFC-stoffer (med drivhuseffekt).

Projektet er økonomisk støttet af Miljøstyrelsen, Kontoret for Renere Produkter.

Projektets organisation består af følgende:

Dantherm Air Handling A/S

- Dennis Naldal Jensen
- Per Thorup Alexander
- Rasmus Jensen
- Per Pedersen

Danfoss A/S

- Christian Veje

Teknologisk Institut, Center for Køle- og Varmepumpeteknik

- Claus S. Poulsen (projektleder)
- Svend V. Pedersen
- Kenneth B. Madsen

Miljøstyrelsens Kemikaliekontor (følgegruppe)

- Lone Kielberg

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

Svend V. Pedersen

Projektleder

Teknologisk Institut, Center for Køle- og Varmepumpeteknik

November 2008

# Sammenfatning og konklusioner

Denne projektrapport beskriver gennemførelsen af projektet "Reversibel A/C unit med CO<sub>2</sub> som kølemiddel". Der er i projektet udviklet en ventilationsvarmepumpe til rumopvarmning og airconditioning, som også kan benyttes til brugsvandsopvarmning.

Projektet viser, at CO<sub>2</sub> har fremragende egenskaber i systemer, hvor der ønskes en høj temperatur på afgiversiden, samt at det er muligt at kombinere brugsvandsproduktion med rumvarmeproduktion.

Der er i projektet opbygget en simuleringsmodel, som kan beregne varmepumpens ydelse i forskellige driftstilstande. Simuleringer viste, at det var muligt at opnå en effektivitet på 3,91 ved en udetemperatur på 7°C. Desuden blev der gennemført en række analyser af forskellige systemløsninger, og der er afslutningsvis opbygget en prototype, der er testet i et laboratorium, for at optimere styringsstrategien og for at afprøve systemeffektiviteten. Der er lavet mange målinger og simuleringer af systemet for at forbedre den samlede systemeffektivitet.

Hovedkomponenterne anvendt i prototypen (kompressor, vekslere, ventil, styring og beholder) er alle kommercielt tilgængelige, hvilket betyder, at fokus har været rettet mod systemopbygningen samt systemoptimeringen. Der er i projektet gennemført en række simuleringer af systemet for at optimere designet. Der er lavet afprøvninger på forskellige kompakte fordampere og gaskølere, og disse har vist sig at have en god ydelse.

De gennemførte laboratorieprøvninger af apparatet viser, at det for varmepumpeanlæggets vedkommende er muligt at opnå en COP ved ventilationsopvarmning på 3,3. Denne ydelse er på niveau med, hvad ydelsen er for konkurrerende produkter.

Forbedringsforslag:

- Varmetab fra kompressoren bør reduceres – varmetabet er relativt stort, og det er nødvendigt, at det indgår som en del af opvarmningen, for at effektiviteten bliver god. I det nuværende system går varmen principielt til spilde i processen.
- Komplexiteten af systemet skal minimeres, således at effektiviteten forbedres. Det er vigtigt, at systemet opbygges, så der opnås en lav afgangstemperatur på gaskøleren.
- Der bør monteres en sugegasreceiver for at sikre, at anlægget hele tiden kører med optimal fyldning.

En samlet opsummering på projektets resultater:

I projektet er det lykkedes at konstruere en varmepumpeprototype med CO<sub>2</sub> som kølemiddel, og hvis de kommercielle forudsætninger er til stede, kan projektet med visse tekniske justeringer sættes i en egentlig serieproduktion.

# 1 Indledning

I forbindelse med udfasning af HFC'erne og indførelse af eksempelvis CO<sub>2</sub> som kølemiddel er der gennemført en række aktiviteter bl.a. gennem Miljøstyrelsens Renere Produktprogram. En af disse aktiviteter var gennemførelsen af projektet "Reversibel A/C unit med CO<sub>2</sub> som kølemiddel" (J.nr.: M 1231-0015), som er et projekt med to hovedfaser. Den første fase behandlede mulighederne for at opbygge en reversibel A/C unit med CO<sub>2</sub> som kølemiddel, mens anden hovedfase behandlede beregning og analyse samt test og opbygning af prototypen. Projektet har vist, at det kan lade sig gøre at opbygge en reversibel a/c unit med CO<sub>2</sub> med en ydelse og effektivitet på linje med de HFC-anlæg, der bygges i dag.

I disse år er ventilations- og kølebranchen inde i en kraftig udvikling, specielt pga. øgede krav til køling i kontorbyggeri, handels- og servicesektoren samt i beboelser. Boligventilation er ligeledes et område i kraftig udvikling, bl.a. som følge af stigende krav til reduceret energiforbrug (opvarmning), som bl.a. medfører øget krav om komfortkøling og krav om ventilering af boligen og eksempelvis kontorbyggeri. Det kan nævnes, at det nye bygningsreglement, som blev indført 1. januar 2006, vil vende op og ned på den danske energisektor, og specielt boligventilationssystemer indeholdende varmepumper vurderes som fremtidens opvarmningssystem, da udbygningen af den kollektive varmforsyning i områder med lavenergibyggeri forventes at aftage i fremtiden.

Som situationen er i dag, vil langt hovedparten af disse anlæg fortsat blive leveret med HFC-kølemidler, primært fordi der i dag ikke findes kommercielle systemer med naturlige kølemidler som eksempelvis CO<sub>2</sub>.

Dette projekt viser, at det er muligt at opbygge en reversibel a/c unit med CO<sub>2</sub>, som ydelsesmæssigt er på linje med de anlæg, der i dag bygges med HFC.

## 2 Projektindhold

Projektet er inddelt i 5 faser med følgende aktiviteter:

### Fase 1: Beskrivelse af løsningsmuligheder

Projektet blev indledt med, at der opstilles en kravspecifikation til anlægget, herunder ydelseseffektivitet, samt funktion. Anlægget er som udgangspunkt beregnet for køling og opvarmning af private ejendomme (lejligheder og villaer), men vil ligeledes kunne anvendes til komfortkøling i mindre kontorbygninger osv. Resultaterne vil have generisk værdi, således at de kan anvendes i forbindelse med udvikling af større anlæg.

Der gennemføres en analyse af forskellige systemløsninger for at afdække, hvilken bedst opfylder de opstillede krav. Følgende løsningsmuligheder planlægges undersøgt:

- Indirekte system, hvor kølesystemet er samlet i unit med vandbaserede eksterne flader.
- Kompakt og traditionelt kølesystemopbygning, hvor reversibiliteten opnås via enten 1 firvejsventil eller alternativt 2 tovejsventiler.
- Kompakt og traditionelt kølesystemopbygning, hvor reversibiliteten opnås ved at vende luftstrømmen, hvorved en firvejsventil kan spares, og anlæggets drift vil blive væsentlig mere stabil.

En række overordnede systemanalyser suppleret med beregninger af de enkelte løsnings køletekniske muligheder er blevet gennemført. Endvidere er en analyse af mulige styringsstrategier for det samlede system blevet gennemført.

### Fase 2: Teknisk og miljømæssigt udviklingsarbejde

Systemdesignet blev fastlagt i fase 1, og derefter blev en prototype opbygget. En række laboratorietest blev gennemført på prototypen for at klarlægge anlæggets effektivitet og ydelse. Derefter blev de nødvendige optimeringstiltag og efterfølgende test foretaget. Testene er med til at klarlægge, hvilken styringsstrategi, der skal anvendes. Et af de centrale punkter i projektet bliver en undersøgelse af, hvorledes det sikres, at anlægget kan køre som både aircondition- og varmepumpeanlæg. Her spiller anvendelsen af tovejs- eller firvejsventiler en vigtig rolle.

Anvendelsen af CO<sub>2</sub> i reversible anlæg vil desuden stille store krav til både fordampere og kondensator (eller gaskøler, når der køres transkritisk), og derfor er forskellige vekslerløsninger blevet undersøgt i projektet, for at sikre at de lever op til de stillede krav.

Drøveorganet har i de seneste gennemførte projekter været undersøgt nærmere, og på baggrund af disse undersøgelser er Danfoss' nye TBR-ventil til transkritisk CO<sub>2</sub> anvendt.

### **Fase 3: Kommerciel vurdering af produktet og driftsmæssig implementering**

Efter endt opbygning og prøvning af apparatet er der gennemført en kommerciel vurdering af produktet i samarbejde med Dantherms kundegruppe. Vurderingen er gennemført ved, at der er afholdt et temamøde hos Dantherm, hvor projektets resultater og prototypen præsenteres for kunderne.

Produktet vil efter produktmodning/tilretning kunne indgå i Dantherms produktsortiment og vil kunne markedsføres som et yderst miljø- og energivenligt produkt.

Der er i denne fase ligeledes gennemført en overordnet miljømæssig vurdering af anlægget, set i relation til anvendelsen af kølemiddel og anlæggets energieffektivitet.

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

### **Fase 4: Formidling af projektets resultater**

Projektets resultater vil løbende blive formidlet gennem eksempelvis artikler i fagtekniske tidsskrifter, og de køletekniske resultater vil indgå som videngrundlag for "Videncenter for HCF-fri køling". Desuden blev projektet præsenteret ved Gustav Lorentzen Konferencen, som er en af de større kølekonferencer.

Projektet afsluttes med en kortfattet teknisk rapport, som vil blive distribueret til "Videncenter for HCF-fri køling" og Miljøstyrelsen.

### **Fase 5: Projektledelse og videnformidling**

Projektet er afsluttet med en fase, der indeholder konklusioner og opsummering af de gennemførte aktiviteter. Der udarbejdes en kortfattet teknisk rapport. Fasen indeholder desuden aktiviteter, der er direkte relaterede til egentlig projektledelse, samt den kontakt, der skal være til Miljøstyrelsen og "Videncenter for HFC-fri køling" undervejs i projektet.



# 3 Projektets gennemførelse

## 3.1 Beskrivelse af løsningsmuligheder

Der er i projektet opstillet følgende overordnede krav til en reversibel a/c unit til boligventilation med CO<sub>2</sub> som kølemiddel:

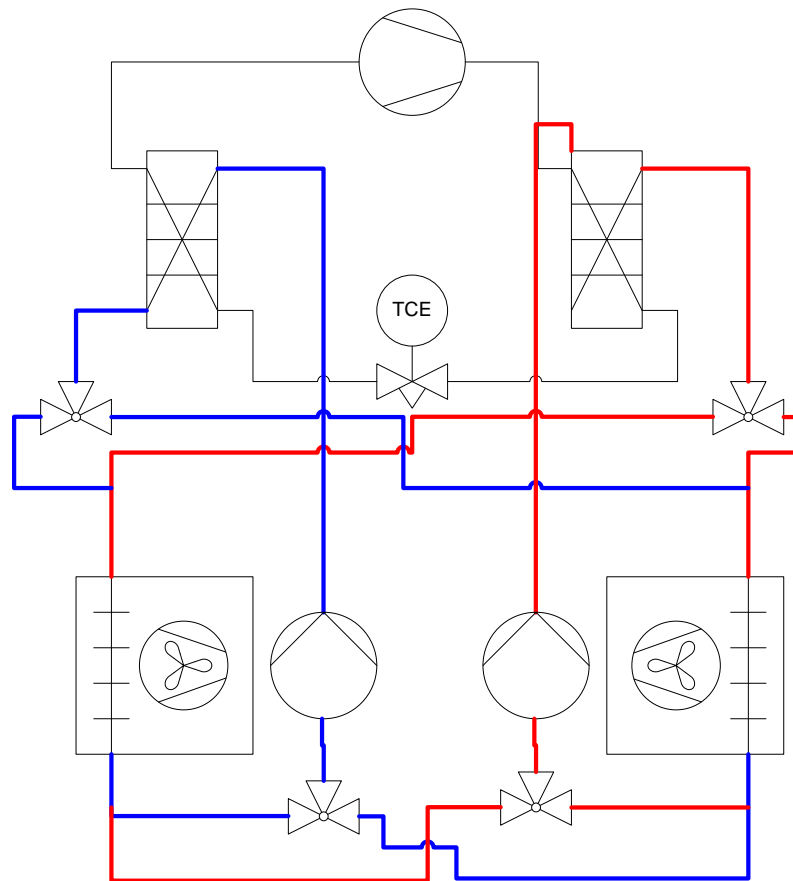
- Enheden består af en enhed til boligventilation med varmegenvinding, samt varmepumpe.
- Der skal til enheden kunne tilkobles en brugsvandstank.
- Anlægget skal kunne varme om vinteren og køle om sommeren.
- Ingen væsentlig meromkostning ved anvendelse af CO<sub>2</sub> sammenlignet med HFC.
- Effektiviteten (energi) skal mindst være på højde med den, der kan opnås ved anvendelse af HFC.

I det følgende gives nogle eksempler på de systemløsninger, der kan anvendes til det pågældende apparat.

### **3.1.1 Løsningsforslag 1: Indirekte system, hvor køleanlægget er samlet i en unit med vandbaserede eksterne flader**

Den første løsning består af et 1-trinskølesystem med væskebaseret fordamper og en væskekølet gaskøler/kondensator. Væsken kan cirkuleres fra kølekredsen/ varmepumpen til luftcoils eller til opvarmning af brugsvandstanken.

Fordelen ved denne løsning er, at luftstrømmen i unitten altid har den samme retning. Ønsker man varme, cirkuleres varmt vand over indblæsningsfladen, og ønsker man kulde cirkuleres koldt vand over indblæsningsfladen. Desuden er det let at tilkoble en brugsvandstank til enheden, da det blot kræver en trevejsventil. Reguleringen af varme og kulde foregår på væskesiden, og der kan benyttes vandventiler til reguleringen.



Figur 1: Løsningsforslag 1

Fordelene ved denne løsning er:

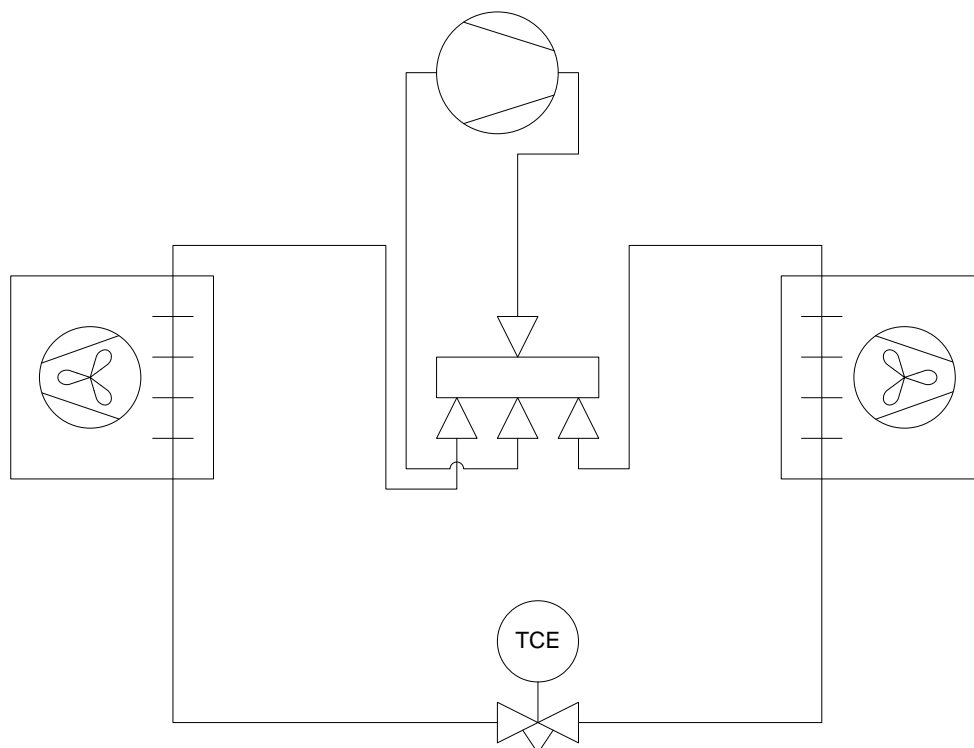
- Gaskøler og fordamper altid har den samme funktion, da der ikke laves reversibel kørsel af kølekredsen.
- Det er meget nemt at tilkoble en varmtvandsbeholder.
- Luftstrømmen har altid samme retning.

Ulempen er:

- Det medfører øgede temperaturdifferenser pga. en ekstra varmeveksling på fordamper- og gaskølersiden.

### 3.1.2 Løsningsforslag 2: Kompakt og traditionelt kølesystemopbygning, hvor reversibiliteten kan opnås enten via 1 firvejsventil eller alternativt 2 tovejsventiler

Den anden løsningsmulighed er en traditionel opbygning af kølesystemet, hvor reversibiliteten opnås ved, at der i systemet er opbygget en firvejsventil, som gør det muligt at vende kredsprocessen, og funktionen af gaskøler og fordamper kan byttes.



Figur 2: Løsningsforslag 2

Fordelene ved denne løsning er:

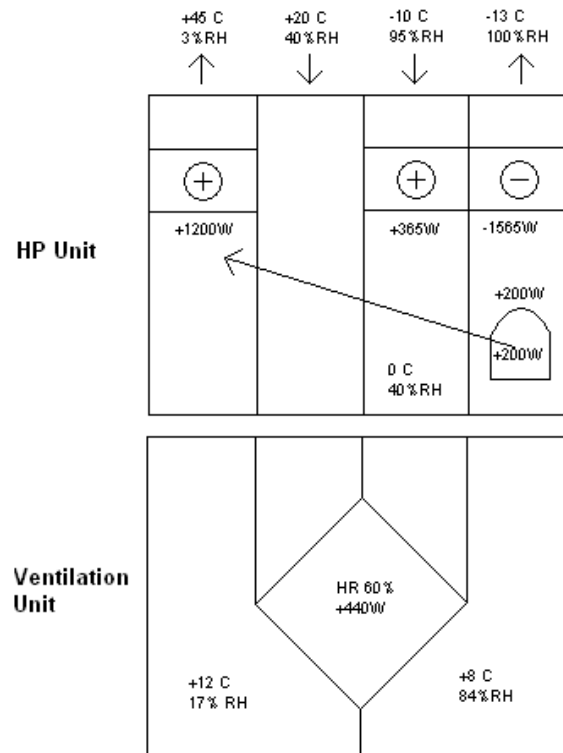
- Der er ingen mellemliggende vandkreds.
- Det er enkelt at skifte mellem varme og kølemode.
- Der er intet temperaturtab som følge de to ekstra varmevekslere.
- Der benyttes ikke energi til pumper.
- Luftstrømmene har altid samme retning.

Ulemperne ved systemet er:

- Det kræver en ekstra veksler at tilslutte en brugsvandstank.
- Fordamper og gaskøler skal kunne operere som både fordamper og gaskøler og omvendt.

### 3.1.3 Løsningsforslag 3: Kompakt og traditionel kølesystemopbygning, hvor reversibiliteten opnås ved at vende luftstrømmen, hvorved firvejsventilen kan spares, og anlæggets drift vil blive væsentlig mere stabil

I det tredje løsningsforslag laves reversibiliteten ved at ændre luftstrømmene på luftsiden. Dette gøres ved at ændre luftens passage gennem unitten med bypass-spjæld.



Figur 3: Løsningsforslag 3

Fordelene ved denne løsning er:

- Reverseringen foretages på luftsiden
- Der er ingen mellemliggende væskekreds.

Ulempen er:

- Det er pladskrævende at lave flowreguleringen på luftkredsen.



### 3.1.6 Opbygning af kølekredsløb for den valgte løsning

I det følgende afsnit vil der være en kort beskrivelse af systemopbygningen samt en beskrivelse af hovedkomponenterne.

Den valgte løsning betyder, at kølekredsløbet kan opbygges som en 1-trins-køleproces.

Gaskøleren er opbygget som en pladevarmeveksler, og derfor er den kompakt og let at montere. Da der er væske på sekundærsiden, er det valgfrit, om man vil benytte enheden til opvarmning af luft til rumopvarmning, eller om den skal benyttes til opvarmning af brugsvand.

Da der ikke køres reversering, er der også valgt en pladevarmeveksler som fordamper. Da der er glykol på sekundærsiden, kan fordamperen enten bruges som energioptager eller til at lave komfortkøling.

Drøvlingen foretages ved hjælp af Danfoss' nyudviklede TBR-ventil, alternativt kan kapillarrør anvendes.

Kompressoren, der benyttes, er en 1-cylindret Danfoss stempelkompressor.

#### 3.1.6.1 Kompressor

Kompressoren, som blev benyttet, er en Danfoss TN1416 CO<sub>2</sub> kompressor til transkritisk anvendelse. Det er en 1-cylindret stempelkompressor med et driftsområde, som angivet i følgende tabel.

Den benyttede kompressor er en serieproduceret kompressor, som til forskel fra den i figur 4 viste kompressor har indbygget mufler, og desuden er den optimeret i forhold til prototypen.



Figur 5: Danfoss TN1416 kompressor til CO<sub>2</sub>

Kompressoren anvender 230 V, 50 Hz og har et nominelt effektforbrug på 530 W ved 0°C fordampning, 30°C gaskøler udgangstemperatur og 30°C sugetemperatur ved et højtryk på 74 bar (maks. COP ved denne betingelse).

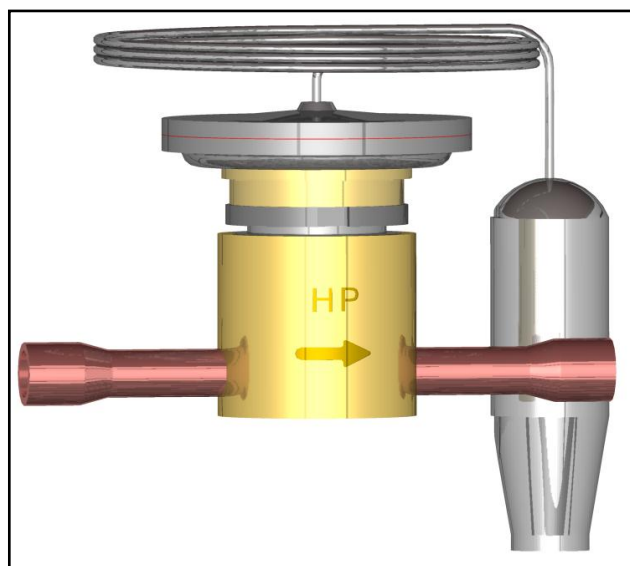
	Maks.
Afgangstryk [bar]	120
Sugetryk [bar]	70
Sugetemperatur [Celcius]	40

### 3.1.6.2 Ventil

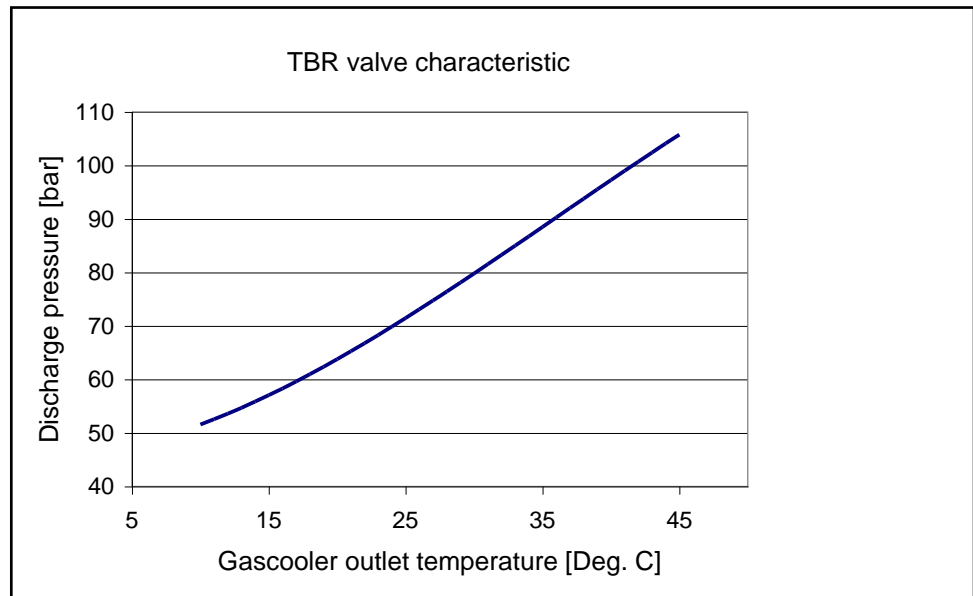
Den anvendte ventil er en Danfoss højtryksekspansionsventil af typen TBR (Thermal Backpressure Regulator), som ligeledes er udviklet til brug i en trans-kritisk CO<sub>2</sub>-proces.

Membranen er belastet af et termostatelement med føler. Temperaturen i føleren sætter åbningstrykket for ventilen. Føleren placeres ved gaskølerafgangen og giver en trykarakteristik, som vist i figur 3.

Ventilen er designet for en gaskølerudgangstemperatur på op til 50°C med et resulterende tryk på 120 bar.



Figur 6: TBR ventil til CO<sub>2</sub> - fra Danfoss



Figur 7: TBR-ventilens karakteristik

### 3.1.6.3 Design af gaskøler

Der er gennemført beregninger på to prototyper af gaskølere, som er opbygget med plader. Specielt har der været fokus på udviklingen af nogle gaskølere med en lang termisk længde. Dette skyldes, at det er nødvendigt med en stor temperaturforskelle mellem indløb og afgang på CO<sub>2</sub>. Årsagen til, at man gerne vil have en stor temperaturredifferens gennem gaskøleren, er, at man ønsker at kunne varme vand op til en høj temperatur (f.eks. 70°C), og samtidig ønsker man at afgangstemperaturen bliver så lav som mulig for at få en høj effektivitet på anlægget.

### 3.1.6.4 Pressostater

Der er til anlægget benyttet Saginomiya pressostater.



## 4 Opbygning og afprøvning

Der er opbygget en prototype på en varmepumpe, som er testet og ombygget og videreudviklet til en prototype 2.

De første test blev udført med en Danfoss TN 1416 prototype kompressor, og med en reguleringsventil til konstanttryk. Danfoss TN 1416 prototype kompressoren blev hurtigt udskiftet med en seriefremstillet TN 1416 kompressor med indbygget mufler, hvilket medførte, at støjniveauet blev mindsket betragteligt. MBR-ventilen til konstanttryk blev ligeledes udskiftet med en TBR-ventil.



Figur 8: Prototype på en varmepumpe

### Prototype 1:

Den første prototype med TBR-ventil blev prøvet, og der blev målt en effektivitet på mellem 2,35 og 2,97 ekskl. ventilatorer og pumper. Den lave effektivitet skyldtes, at der var et stort tryktab på væskesiden gennem fordamper og gaskøler. Dette tryktab blev minimeret ved opbygningen af den anden prototype. Desuden blev der skiftet til en anden vekslerstype.

### Prototype 2:

På prototype 2 er luftfladerne ændret, og der er benyttet en anden type fordamper og gaskøler.

	Tilstand	Beregnet	Måling	Måling	Måling
	2.3	Tilpasning	2501-3	2801-2	2801-3
Udetemperatur	7		7	7	7
Beregningsstryk	66	84	77,21	81,6	77,6
Luftflow	330		350	350	350
Temperatur på luft ud af gaskøler	41,5		39,6	41,2	39,4
Fordampningstemperatur	-8,3	-2	-1,5	-0,1	1
Ydelse W	2090	1974	1814	1816,8	1762,1
Optaget effect	583	595	573	598	574
COP vp	3,91	3,31	3,17	3,04	3,07
Temperatur gaskøler ind CO2	95,8	74,3	83,6	78,5	69,0
Temperatur gaskøler ud CO2	21	21	22,9	24,4	27
Temperatur Luft gaskøler ind	14,8		17,1*	18,7*	17,6*
Temperatur Luft gaskøler ud	41,5		39,6*	41,2*	39,4*
Temperatur Luft fordamper ind	12,2		7,3*	5,8*	6,2*
Temperatur Luft fordamper ud	-0,06		2,8*	1,8*	2,2*
Varmetab kompressor		50%			
Virkningsgrad Isentropisk		58,2%			
			*Glykol	*Glykol	*Glykol

Testforløb 2: Måling, hvor glykolkredsene simulerer luftcoil

Målingerne viste en COP på 3,17, og generelt stemmer den simple kredsprocesmodel godt overens med målingerne.

I beregningen er det forudsat, at varmetabet fra kompressoren ikke udnyttes. Desuden er der ikke medregnet ventilatoreffekter, samt effekten overført i krydsvexleren. Beregningen viser kun den opnåede effekt på varmepumpekredsen. Målingerne viser, at det godt kan lade sig gøre at opnå den beregnede effektivitet og ydelse. Den målte effektivitet ligger 7-8% under den beregnede effektivitet, men målingerne er også foretaget ved tilgangstemperaturer, der er 5-6 K lavere på fordampersiden, og en gaskølerafgangstemperatur, der er 3 K højere end beregnet.

Det er af stor vigtighed, at gaskølertrykket er optimalt. Målingerne viste, at det ikke altid er optimalt at køre med så lavt et gaskølertryk som muligt ved transkritisk drift. Målingerne viste også, at det i praksis ikke var muligt at køre subkritisk, da temperaturniveauet simpelthen blev for lavt. Dette skyldes, at det kritiske punkt ligger ved 32 °C. Såfremt det skal være muligt at køre subkritisk, kræver det, at man påmonterer en sugegasveksler inden kompressoren. Herved overhedes sugegassen, og trykgassen vil da nå en højere temperatur.

På den tilpassede kredsprocesmodel er der lavet beregninger for optimal COP som funktion af tryk og overhedning.

## 5 Kommerciel vurdering af produktet

Efter testene med prototyperne er resultaterne og prototypen blevet præsenteret for nogle af Dantherms større kunder, og de har vist stor interesse for produktet. Desuden er produktet løbende blevet vurderet og evalueret i samarbejde med Dantherms salgsafdeling. Især på det tyske marked er der stor interesse for produktet i forbindelse med lavenergihuse og passiv huse.

Det er derfor bestemt, at produktet skal produktionsmodnes til videre produktion, og produktet forventes at komme på markedet i 2009. Måske vil produktet blive installeret til test i projektet Energy FlexHouse, som Teknologisk Institut i Taastrup opfører i 2009.

Effektivitetsmæssigt er varmepumpen fuldt på højde med de luft/vand varmepumper, der findes på markedet i dag. Varmepumpen er i dens endelige udformning på samme niveau som de nyeste varmepumper, der i dag benyttes til lavenergiboliger.

Produktet differentierer sig på den måde, at der benyttes et naturligt kølemiddel CO<sub>2</sub>, hvilket er en meget vigtig salgsparameter.

## 6 Formidling af projektets resultater

Nærværende projektrapport vil blive offentlig tilgængelig, da den vil være en del af videngrundlaget i "Videnscenter for HFC-fri køling", og den placeres derfor på hjemmesiden [www.hfc-fri.dk](http://www.hfc-fri.dk).

Projektet og resultaterne fra projektet er blevet præsenteret på den 8. internationale Gustav Lorentzen Konference for naturlige kølemidler, som blev afholdt i København den 7. -10. september 2008.

Desuden vil resultaterne blive præsenteret i tidsskrifter og ved større kølekonferencer.

## 7 Litteraturliste

/1/ CO<sub>2</sub> som kølemiddel i varmepumper

<http://www.mst.dk/udgiv/publikationer/2001/87-7944-330-3/pdf/87-7944-387-7.pdf>

/2/ Artikler fra Purdue 4<sup>th</sup> IIR-Gustav Lorentzen Conference on Natural Working Fluids At Purdue. July 25-28, 2000 Purdue University. West Lafayette, Indiana 47907 USA (se detaljeret oversigt i /1/).

/3/ CO<sub>2</sub> som kølemiddel i varmepumper, anden fase i udviklingsprojekt

<http://www.mst.dk/udgiv/publikationer/2003/87-7972-453-1/html/>

# 8 English Summary

This project report describes the implementation of the project "Reversible A/C unit with CO<sub>2</sub> as refrigerant". A ventilation heat pump for space heating and air-conditioning was developed in the course of the project. It can also be used for heating of domestic water.

The project demonstrates that CO<sub>2</sub> has excellent properties in systems where a high temperature is requested on the gas cooler side and that it is possible to combine the production of domestic water with the production of space heating.

In the course of the project, a simulation model was built that can calculate the output of the heat pump at different working conditions. Simulations showed that it was possible to obtain an efficiency of 3.91 at an ambient temperature of 7°C. In addition, a number of analyses were carried out of different system solutions and at the end a prototype was built that was tested in a laboratory to optimise the control strategy and to test the system efficiency. Many measurements and simulations have been carried out on the system to improve the total system efficiency.

The main components used in the prototype (compressor, exchangers, valves, control system and tank) are all commercially available which means that focus has been on system design and system optimisation. During the project, a number of simulations were carried out to optimise the design. Tests were carried out on various compact evaporators and gas coolers and they have shown good performance.

The laboratory tests that were carried out on the unit demonstrate that in connection with the heat pump unit it is possible to obtain a COP during ventilation heating of 3.3. That is in the same area as the efficiency of competing products.

Proposed improvements:

- Heat loss from the compressor should be reduced – the heat loss is rather large and it is necessary that it forms part of the heating in order to obtain good performance. With the current system the heat is principally lost in the process.
- The complexity of the system has to be minimised in order to improve the efficiency. It is important to construct the system so a low gas cooler discharge temperature is obtained.
- A suction gas receiver should be mounted to ensure that the system continuously operates with optimum charge.

A summary of the results of the project:

In the course of the project, we succeeded in constructing a prototype heat pump with CO<sub>2</sub> as refrigerant that after certain technical adjustments can be put into an actual series production if the commercial conditions are available.

# 9 Bilag A

## DEVELOPMENT OF REVERSIBLE HEAT PUMPS WITH CO<sub>2</sub> AS REFRIGERANT THAT COMBINES VENTILATION AND HEATING OF DOMESTIC HOT WATER

SVEND V. PEDERSEN, B.Sc.

Danish Technological Institute  
Centre for Refrigeration and Heat Pump Technology  
Kongsvang Allé 29

DK-8000 Aarhus C, Denmark

Fax: +45 7220 1212; E-mail: [svend.pedersen@teknologisk.dk](mailto:svend.pedersen@teknologisk.dk)

### ABSTRACT

During recent years, more and more CO<sub>2</sub> heat pumps have appeared in the market – especially from Japan. In Denmark, we have also been busy developing CO<sub>2</sub> heat pumps and there is a great interest in the development of heat pumps that utilize natural refrigerants. Special focus has been placed on trans-critical CO<sub>2</sub>.

This presentation will focus on results and experience gained in two heat pump projects utilizing heat pumps for houses. The projects were carried out by Danish Technological Institute and trans-critical CO<sub>2</sub> was used. The projects are:

- CO<sub>2</sub> used in domestic hot water heat pumps
- CO<sub>2</sub> used in HVAC systems combined with tap water production.

This presentation will describe the design of the two systems and elaborate on the experience that has been gained through the development work. Finally, this presentation will introduce which conditions are necessary to obtain a high coefficient of performance with trans-critical COP in heat pumps.

### 1. CO<sub>2</sub> used in domestic hot water heat pumps

The reason for seeing possibilities in using CO<sub>2</sub> as an alternative for use in heat pumps is that the need for domestic water in connection with low-energy constructions constitutes a larger share of the heat demand than earlier, and during a great part of the year, there is no need for room heating.

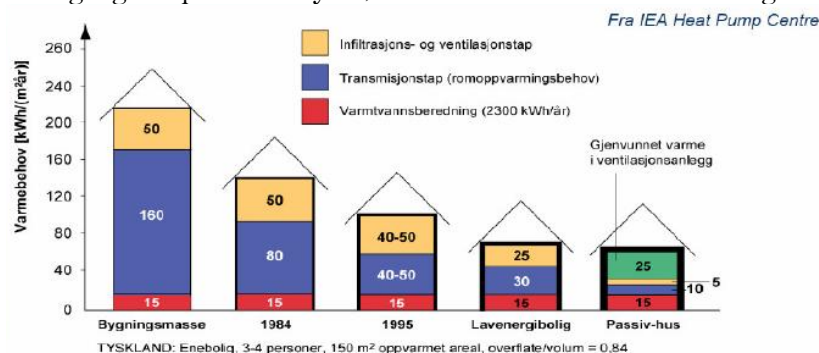


Figure 1: Development in need for heating

In the two projects there has been focus on the development of small heat pumps which can be used for low-energy housing.

In the first project a domestic water heat pump was developed for regeneration of the energy from the output air. Actually, the construction is traditional compared to the standard output heat pumps that can be found on the market today.

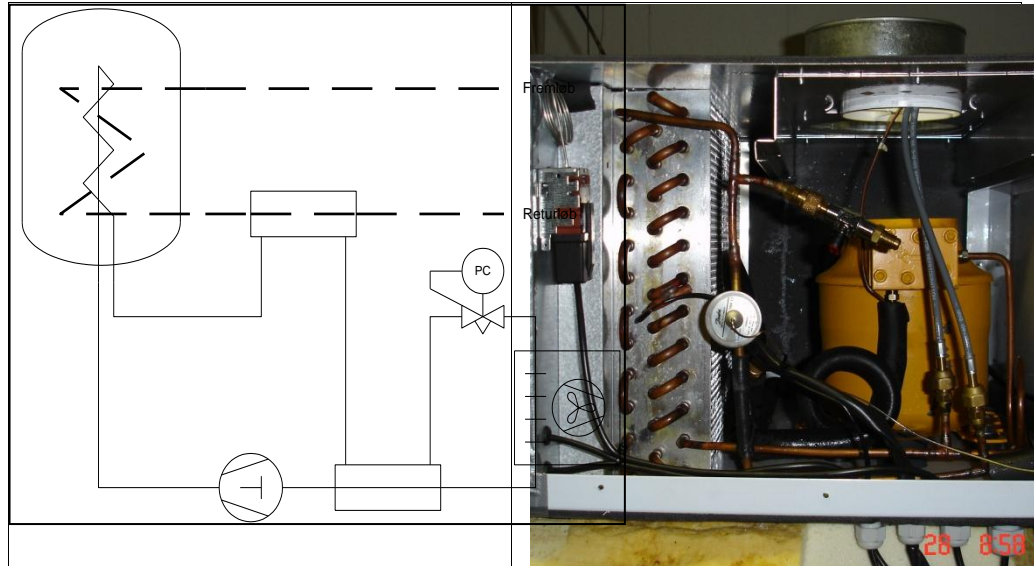


Figure 2: Construction of domestic water heat pump

By the development of the heat pump unit, standard components were applied, which however were adapted to the higher operating pressure. The evaporator was adapted for CO<sub>2</sub>, and an analysis was elaborated of the gas cooler's function in the container, both by CFD analysis and by practical experiments. Furthermore, tests were carried out on different expansion elements.

The compressor used was a TN compressor from Danfoss, which is developed for bottle coolers and domestic appliances.

Before initiating the construction of the heat pump, an examination was carried out on different expansion elements, including an electronic expansion valve and a thermal expansion valve, TBR valve from Danfoss.

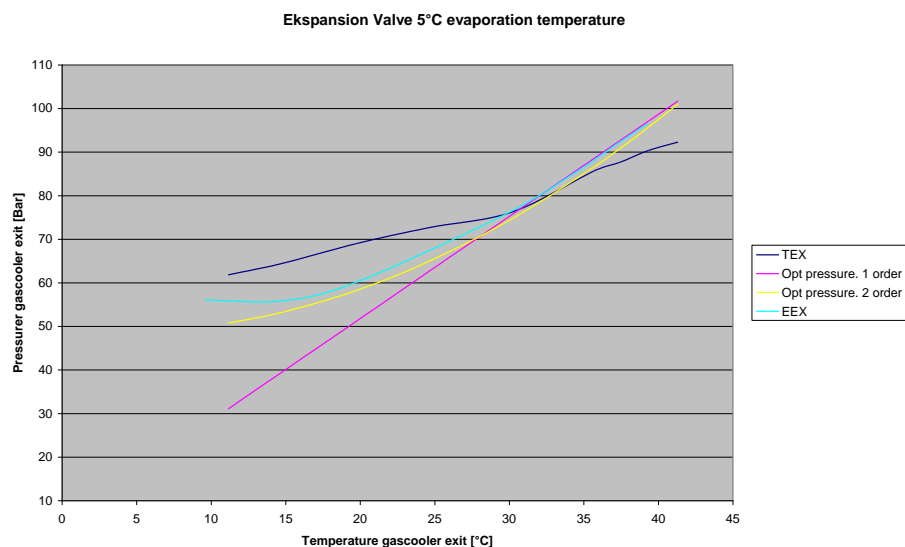


Figure 3: Result of test of expansion elements



The measurements showed that with an electronic expansion valve there could be made a regulation that corresponded satisfactory to the optimal pressure curve, but the measurements also showed that the thermal expansion valve regulated satisfactory compared to the optimal pressure curve.

Before the construction of the heat pump, a series of CFD simulations were made with the purpose of finding the most optimal construction of the gas cooler for the hot-water tank. Furthermore, temperatures were measured in the container during testing.

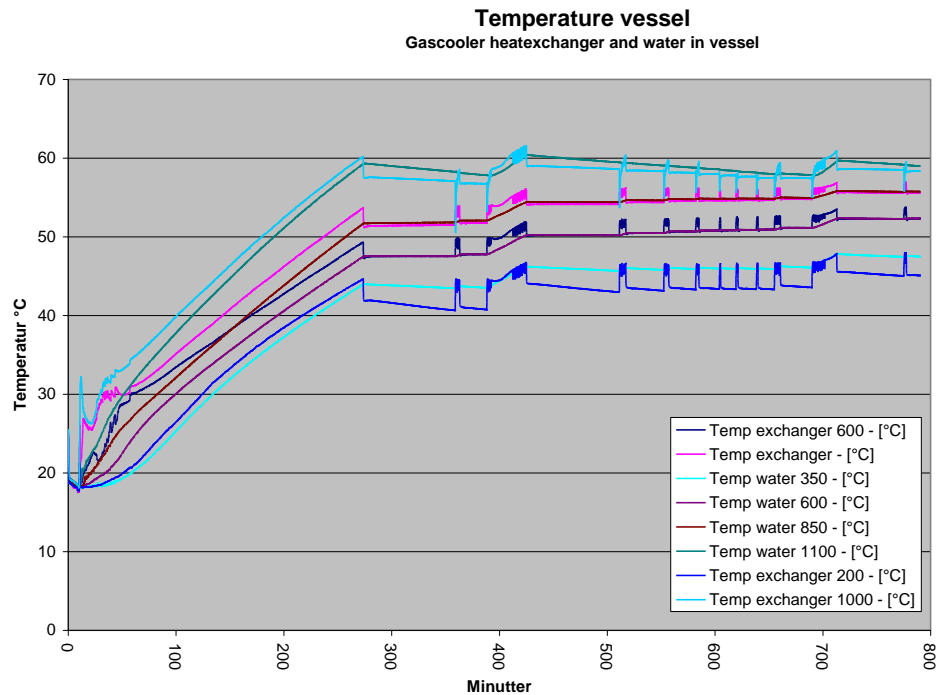


Figure 4: Heating process

The reason why it is important to measure the temperature profile in the container is that it was desirable to examine the cooling properties of the gas cooler. But it was also desirable to see the temperature distribution in the container.

The theoretical COP for the system was calculated to 2.7 at an evaporation temperature of 8 °C and a gas cooler pressure of 105 bars and a gas cooler outlet temperature of approximately 45°C. The heat pump was tested in an accredited laboratory according to a Dutch test standard in which was included a tap test that runs during 24 hours and which corresponds to the consumption in a house. The test showed a temperature difference of the gas cooler between top and bottom of 12-15 K, but also that the outlet temperature of the gas cooler during normal operation exceeds 35°C

During this test the heat pump was measured to have a COP at 1.39 with ventilator and 1.47 without ventilator.

The calculation also showed that an extra heating surface for super-cooling of the gas after the tank would raise the heat pump's COP with up to 70 %.

## 2. CO<sub>2</sub> used in HVAC systems combined with tap water production

In the next project the starting point was to develop a housing vent pump which also would be able to manage air condition operations. The primary function was to let it operate as heating/cooling ventilation air used in low-energy housings.

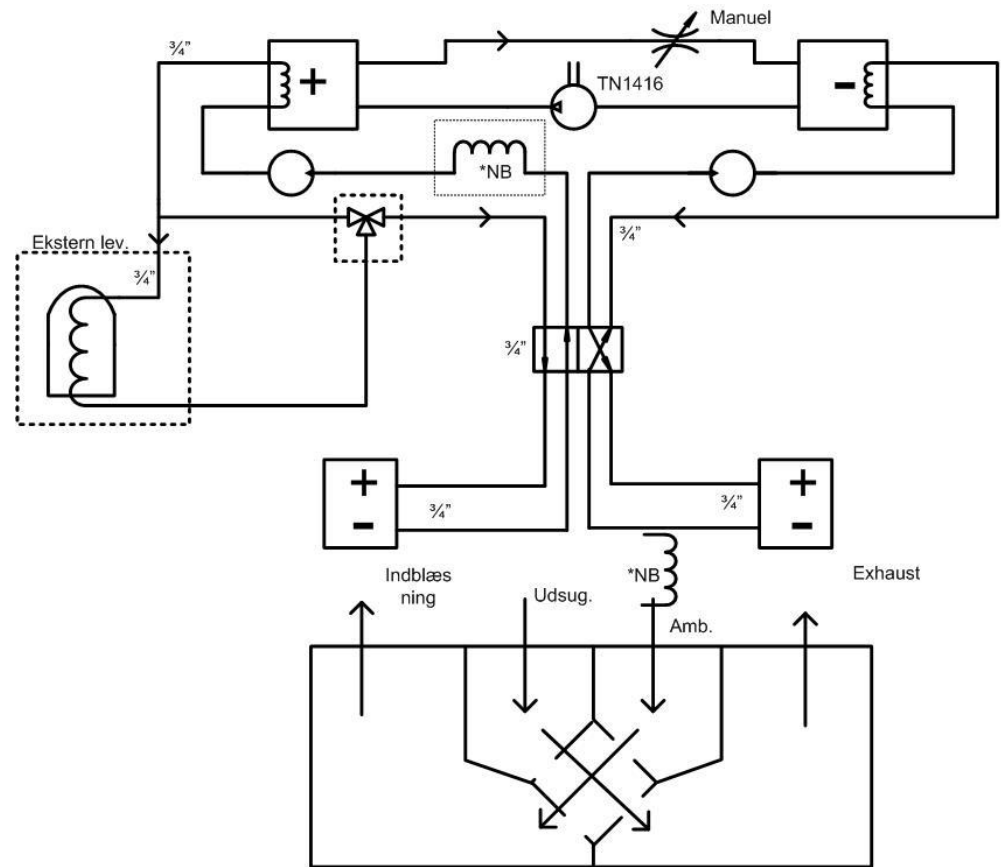


Figure 5: Construction of ventilation heat pump

In this case the construction is made as a single-stage closed cycle in which a heat transmission takes place to heating surfaces by means of a secondary water cycle. This solution was chosen due to the fact that at the time of the development it was not possible to find a suitable four-way valve which should be applied at reversible operation. One of the reasons why this design was chosen is that it appears easy to connect a domestic water tank to this system. But one of the disadvantages is that this causes increased temperature differences due to the extra heat exchange.

The actual cooling circuit is constructed as a single-stage process, and the components used are commercially available. The compressor is a Danfoss TN compressor, and as expansion element was used a thermal expansion valve of the type TBR from Danfoss.

A large series of measurements have been carried out on the heat pump, and the heat pump has been subject to attempts of optimization several times.

	Calculation Condition 2.3	Measurement 2 1402
Outdoor temperature	7	"7"
Calculation pressure	66	83.48
Air flow	330	350
Air temperature from gas cooler	41.5	34.61
Evaporation temperature	-8.3	-3.28
Output W	2090	1435.5
Taken up effect	583	605
COP vp	3.91	2.37
Temperature gas cooler in CO <sub>2</sub>	95.8	88.87
Temperature gas cooler out CO <sub>2</sub>	21	31.39
Temperature air gas cooler in	14.8	22.82
Temperature air gas cooler out	41.5	34.61
Temperature air evaporator in	12.2	9.18
Temperature air evaporator out	-0.06	6.9
Heat loss compressor		
Efficiency isentropic		

Table1: Test results

Generally, our measurements showed that we could obtain a COP of 2.37 in the constructed cycle.

The measurements also showed that the cycle must be optimized before it runs optimal.

Furthermore, measurements showed that it is of great importance to operate with an optimal gas cooler pressure. Our calculations showed that it is most optimal to operate with a gas cooler pressure as low as possible. But our measurements showed that it often pays to operate with a higher pressure. This is due to the fact that having a low gas cooler pressure, a temperature difference which is too low will often occur inside the gas cooler.

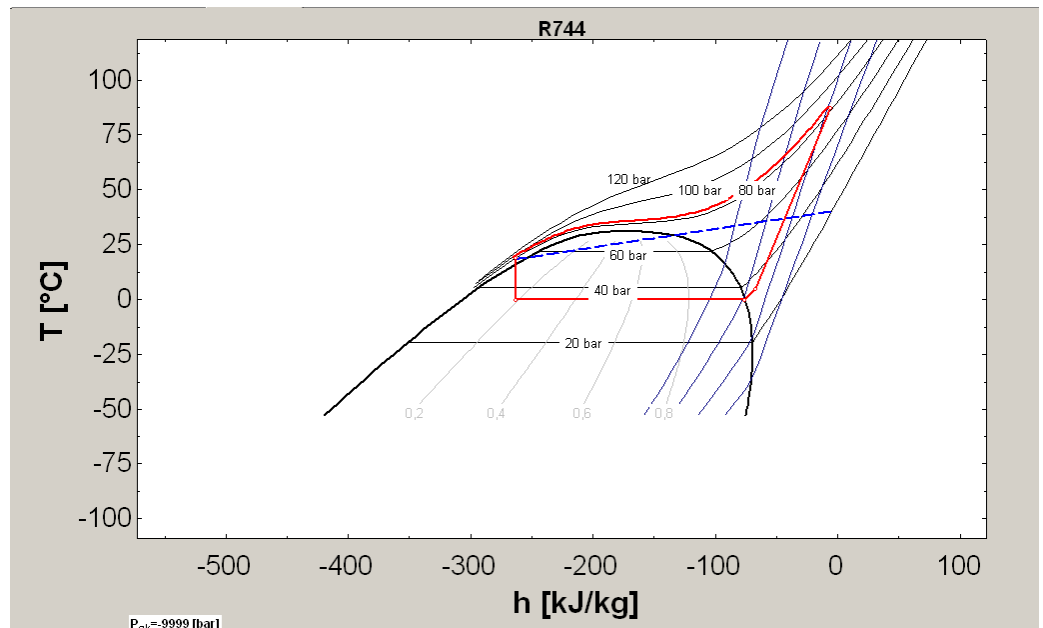


Figure 6: Temperature sequence in gas cooler

The above figure shows the temperature sequence through the gas cooler at a gas cooler pressure of 80 bars. As it appears from the curve, there is a point inside the gas cooler where the temperature difference is low. If a higher pressure is chosen, the temperature difference inside the gas cooler will be more even through the gas cooler which results in the fact that the impact of this gets better.

### **3. Conclusion**

Generally speaking, it can be established that the room heating needs are decreasing in newer housings, which means that the heating of domestic water constitutes a higher share of the total needs for heating.

Today, a series of components are available for construction of CO<sub>2</sub> heat pumps which are commercially available, including compressors, expansion valves, gas coolers, evaporators, pressure monitors, etc. The experiments with the two types of heat pumps showed the importance in having a low gas cooler outlet temperature if a high COP is desirable. The experiments also showed the importance in setting the pressure of the gas cooler in a way that the gas cooler will get to operate optimal. Focus should especially lie with the temperature sequence through the gas cooler.