

# Kombineret brugsvands- og rumvarmepumpe med CO<sub>2</sub> som kølemiddel

Claus Schøn Poulsen  
Teknologisk Institut

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

|  |           |
|--|-----------|
| FORORD   | 5         |
| SAMMENFATNING OG KONKLUSIONER  | 7         |
| 1 INDLEDNING   | 9         |
| 2 PROJEKTINDHOLD   | 11        |
| 3 PROJEKTETS GENNEMFØRELSE   | 13        |
| 3.1 SYSTEMANALYSE OG VALG AF KOMPONENTER   | 13        |
| <b>3.1.1 Løsningsforslag 1: Kombivarmepumpe – uden luftvarmefflade</b>             | <b>13</b> |
| <b>3.1.2 Løsningsforslag 2: Kombivarmepumpe – med luftvarmefflade</b>              | <b>14</b> |
| <b>3.1.3 Mulige systemløsninger – Kølesystem</b>                                   | <b>15</b> |
| <b>3.1.4 Opbygning af kølekredsløb – den valgte løsning</b>                        | <b>16</b> |
| <b>3.1.5 Det samlede system</b>  | <b>22</b> |
| <b>3.1.6 Billeder af system og varmepumpe</b>                                      | <b>23</b> |
| <b>3.1.7 Vurdering/analyse af rumvarmeproduktion med CO<sub>2</sub>-varmepumpe</b> | <b>25</b> |
| 4 RESULTAT AF FORSØG   | 28        |
| 4.1 RESULTATER   | 28        |
| <b>4.1.1 Standby tab</b>   | <b>28</b> |
| <b>4.1.2 Tappeprøvning</b>   | <b>28</b> |
| 5 LITTERATURLISTE  | 29        |
| 6 ENGLISH SUMMARY  | 31        |

.....



# Forord

Nærværende rapport beskriver projektet "Kombineret brugsvands- og rumvarmepumpe 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 udviklede apparat.

Projektets overordnede mål er at bidrage til udbredelse af renere produkter til køleområdet (hvorunder varmepumpebranchen hører) ved anvendelse af 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:

Nilan A/S

- Torben Andersen
- Mads Clausen Andersen
- Jens Frandsen
- Knud Rasmussen

Danfoss A/S

- Jürgen Süß

Teknologisk Institut, Center for Køle- og Varmepumpeteknik

- Peter Hansen
- Kenneth B. Madsen
- Svend V. Pedersen
- Ebbe Nørgaard
- Claus S. Poulsen (projektleder)
- 

Miljøstyrelsens Kemikaliekontor (følgegruppe)

- Frank Jensen

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

Claus S. Poulsen

Projektleder

Teknologisk Institut

Center for Køle- og Varmepumpeteknik

September 2005



# Sammenfatning og konklusioner

Nærværende projektrapport beskriver gennemførelsen af projektet "Kombineret brugsvands- og rumvarmepumpe med CO<sub>2</sub> som kølemiddel". I projektet er der udviklet en kombineret brugsvandsvarmepumpe til opvarmning af brugsvand og til rumvarmeproduktion.

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

Der er i projektet gennemført en række analyser af forskellige systemløsninger, og der er afslutningsvis opbygget en prototype, der er testet i laboratorium efter en gældende hollandsk standard for brugsvandsvarmepumper. Den opbyggede prototype er konstrueret uden rumvarmedelen, som alene er analyseret ud fra beregninger. Baggrunden for denne beslutning er, at der p.t. ikke foreligger anvendelige europæiske standarder for test af kombinerede systemer, og da systemets samlede effektivitet primært afhænger af temperaturen ud af gaskøleren, blev det besluttet ikke at ofre kræfter på opbygningen af det kombinerede system i prototypeudgaven af apparatet. Der er i stedet givet en række forslag til, hvorledes systemet med rumvarmedel kan opbygges.

Hovedkomponenterne anvendt i prototypen (kompressor, vekslere, ventil, styring og beholder) er alle delvist kommercielt tilgængelige, hvilket betyder, at fokus har været rettet mod systemopbygningen. Der er i projektet gennemført en række CFD-beregninger på gaskøleren i varmtvandsbeholderen, og disse resultater viser vigtigheden af den rette udformning og placering af gaskøleren.

Den gennemførte laboratorieprøvning af apparatet viser, at varmepumpeanlæggets COP ved tapning af brugsvand, i henhold til hollandsk standard, ligger på 1,4-1,5, hvilket ikke umiddelbart er tilfredsstillende. Men taget i betragtning, at apparatet er en prototypevarmepumpe, hvor der efterfølgende bør gennemføres en produktmodning / optimering, må resultatet betragtes som værende relativt fornuftigt.

Forbedringsforslag:

- Varmetab fra kompressor bør reduceres – varmetabet er relativt stort og går principielt til spilde i processen.
- Forbedring af gaskøler, således at der opnås en lavere afgangstemperatur fra gaskøleren. Netop afgangstemperaturen er alfa og omega i bestræbelserne på at optimere processen.
- Optimeret fyldningsbestemmelse, som passer til den aktuelle afgangstemperatur fra gaskøleren. Den gennemførte fyldningsbestemmelse er foretaget ved afgangstemperatur for gaskøleren = 36 °C

- Trykrør burde løbe ind i toppen af beholderen og ikke i bunden, således at den varme trykgas afgiver sin varme (ved høj temperatur) netop i den zone af beholderen, hvor der er behov for høj temperatur.

Ved anvendelse af den resterende varme fra gaskøleren til opvarmningsformål vil den reelle afgangstemperatur fra gaskøleren kunne sænkes væsentligt (ned til omkring 30 °C), hvilket vil forbedre den samlede proces med op mod 70%.

En samlet opsummering på projektets resultater:

Det er i projektet lykket at konstruere en prototypevarmepumpe med CO<sub>2</sub> som kølemiddel, der, såfremt de kommercielle forudsætninger er til stede, med visse tekniske justeringer kan sættes i en egentlig serieproduktion.



# 1 Indledning

I forbindelse med udfasning af HFC'erne og indførelsen 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 "CO<sub>2</sub> som kølemiddel i varmepumper" (J.nr.: M126-0213) - et projekt, der indeholdt to hovedfaser, hvoraf den første omhandlede et indledende studie af CO<sub>2</sub> som kølemiddel i varmepumper, mens anden hovedfase omhandlede opbygning og test af prototype. Projektet viste yderst fine resultater og bevirkede, at andre lignende tiltag inden for andre grene af varmepumpebranchen kunne iværksættes. Bl.a. blev der i foråret 2003 igangsat et projekt med støtte fra Miljøstyrelsen, der bl.a. skulle vise, at CO<sub>2</sub> kan anvendes i forbindelse med tørreprocesser - i dette tilfælde i en varmepumpe i en tørretumbler (J.nr.: M126-0796). Dette projekt er koncentreret om anlæg med en noget større ydelse, end hvad der kræves i varmepumper til boligopvarmning.

Førstnævnte projekt "CO<sub>2</sub> som kølemiddel i varmepumper" viste, at opbygning af prototyper til laboratorietest kunne lade sig gøre, men grundet mangel på den rigtige størrelse kompressor var det nødvendigt at anvende en stor kompressor med for stor ydelse og så kapacitetsregulere denne ved hjælp af en frekvensomformer. Hermed blev der indført en række systemtab, som havde stor betydning for de opnåede resultater (der blev dog korrigeret for disse tab i forbindelse med analyse af testresultaterne). At det ikke var muligt at skaffe den "rigtige" kompressor, og at det samtidig var nødvendigt at foretage andre tilsvarende tilnærmelser (bl.a. omkring ekspansionsventil), havde dog stor betydning for resultaternes troværdighed i branchen, forstået således, at nok så det hele meget lovende ud, men hvorledes skulle branchen komme videre uden de helt rigtige komponenter?

Svaret på dette spørgsmål er nærliggende - de rigtige komponenter skal naturligvis være tilgængelige på markedet, og derefter kan resultaterne fra projektet anvendes i virksomhedernes udviklingsarbejde. Danfoss har netop introduceret den første hermetiske CO<sub>2</sub>-kompressor på markedet, og denne leveres i dag sammen med en højtryksventil. Der er dog stadig en del uafklarede spørgsmål, som ønskes besvaret ved gennemførelse af dette projekt, herunder spørgsmål vedr. drøvling (ekspansionsorgan), simpel styring af anlæggets kapacitet samt forenklet systemdesign, der kan anvendes bredt i flere applikationer.

CO<sub>2</sub> er et fremragende kølemiddel i varmepumper. Beregninger viser, at CO<sub>2</sub> i visse driftssituationer er op til 50% bedre end R134a. Dette er specielt i situationer, hvor der kræves en høj fremløbstemperatur fra varmepumpen, mens der ved lavere temperaturer ikke er en tilsvarende gevinst ved anvendelse af CO<sub>2</sub> frem for R134a.

Nærværende projekt omhandler et kombineret brugsvands- og rumvarmesystem, som skønnes at være en applikation, der bredt "rammer" branchens behov, da der i denne anlægstype er driftsprofiler, der er utrolig varierende, og dermed kan udviklingsarbejdet dække en bred del af køle- og varmepumpebranchens behov.



## 2 Projektindhold

Projektet er inddelt i 5 faser med følgende aktiviteter:

### Fase 1: Systemanalyse

Projektet er indledt med en systemanalyse af kombinerede brugsvands- og rumvarmepumper, 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. mulighederne for at anvende kapillarrør i denne anlægstype.

### Fase 3: Udvælgelse af komponenter

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

Fokus har bl.a. været lagt på designet af gaskøleren, hvis opbygning skal sikre maksimal lagdeling i brugsvandsbeholderen og dermed lavest mulig afgangstemperatur fra gaskøleren.

### Fase 4: Opbygning og test af prototype

Med de udvalgte komponenter er der opbygget en første prototype varmepumpe inkl. styring, som efterfølgende er testet i laboratorium efter en hollandsk standard.

### Fase 5: Projektledelse og videnformidling

Projektets resultater er løbende blevet formidlet til kølebranchen, og afslutningsvis er projektet præsenteret i nærværende rapport.



# 3 Projektets gennemførelse

## 3.1 Systemanalyse og valg af komponenter

Der er i projektet opstillet følgende overordnede krav til en brugsvandsvarmepumpe, der indeholder CO<sub>2</sub>:

- Ingen væsentlig meromkostning ved anvendelse af CO<sub>2</sub> sammenlignet med HFC.
- Overordnede dimensioner på færdig unit skal være uændrede.
- Effektivitet (energi) skal mindst være på højde med den, der kan opnås ved anvendelse af HFC.
- Komfortniveau skal være uændret i forhold til eksisterende anlæg (samme ydelse, betjening etc.).

Der er desuden opstillet krav til den del af varmepumpen, der skal levere rumvarme:

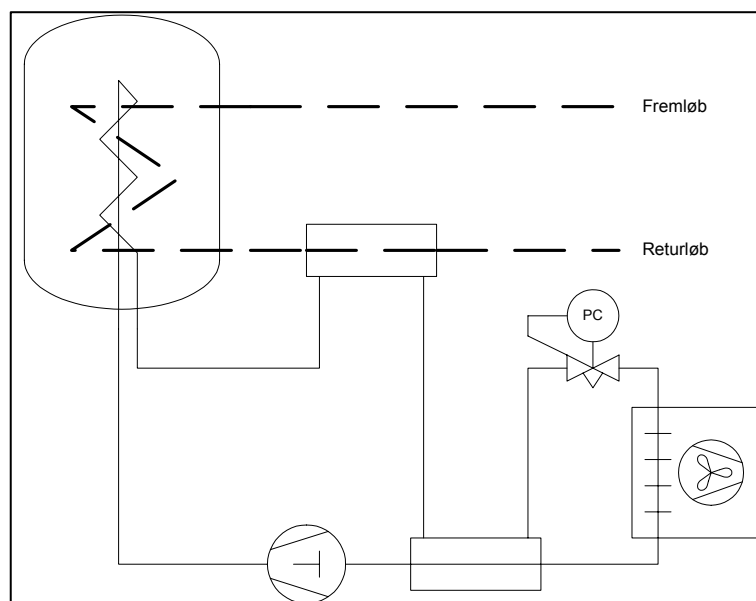
- Skal via ekstraflade - enten med vand eller kølemiddel - kunne levere en del af rumvarmen i ejendommen (specielt interessant i ejendomme med gulvvarme eller meget lavt varmeforbrug, hvor der ses en række reguleringsmæssige vanskeligheder).

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

### 3.1.1 Løsningsforslag 1: Kombivarmepumpe – uden luftvarmeplade

Den første løsningsmulighed er principielt en traditionel løsning, hvor al varmen leveres til brugsvandsbeholderen – indvendigt i beholderen er placeret en veksler (spiral) til gulvvarmekredsen. Varmen afgives til brugsvandet gennem intern spiralveksler (gaskøler) med indløb i toppen af beholderen og afgang i bund.

Umiddelbart efter beholderen veksler gaskøleren med returvandet fra gulvvarmesystemet for at sikre kølemidlet en så lav afgangstemperatur som muligt fra gaskøleren. Det vurderes, at det hermed er muligt at sikre afgangstemperatur fra gaskøleren på omkring 30 °C i store dele af fyringssæsonen. I sommermånederne, hvor der ikke er rumvarmebehov, vil afgangstemperaturen være bestemt af temperaturen i bunden af beholderen.



Figur 1: Løsningsforslag 1

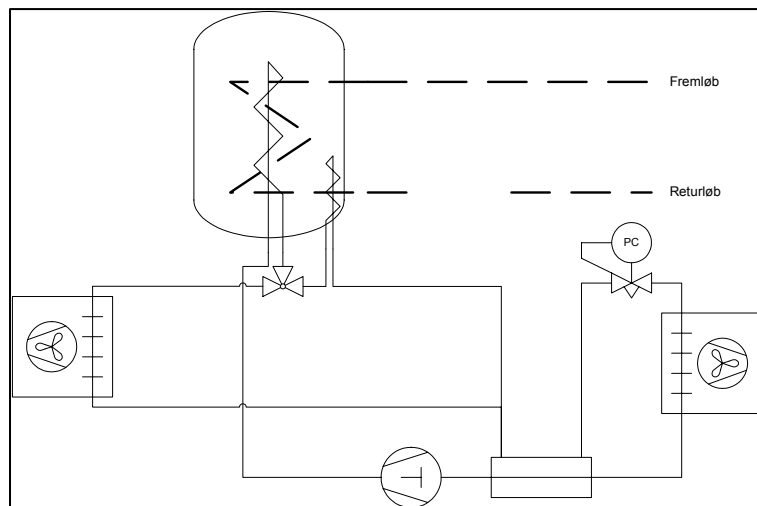
Den her beskrevne løsning er umiddelbart den mest simple og "ligner" på næsten alle måder en traditionel varmepumpeløsning. Gaskøleren skal gerne placeres over så stor en del af beholderen som muligt for at sikre lagdeling i beholderen, og spiralveksleren til gulvvarmesystemet skal placeres, således at der sikres en tilstrækkelig høj temperatur til fremløbet, men gerne således at opblanding ikke er nødvendig (altså uden shuntventil). Den nævnte veksling mellem gaskøler og returvand fra gulvvarmesystemet kan ske enten via en koaksialveksler eller mere simpelt ved at påsætte gaskøleren på gulvvarmesystemets indløbsrør (returrør).

### 3.1.2 Løsningsforslag 2: Kombivarmepumpe – med luftvarmeplade

Den anden løsningsmulighed ligner umiddelbart på mange punkter den første – her er gaskøleren dog delt i to zoner. Én varm, der befinder sig i beholderens øverste del, samt to "kolde" zoner, hvoraf den ene befinder sig i beholderens nederste del, mens den anden befinder sig uden for beholderen og er en luftvarmeplade. Kølemidlet ledes gennem den varme gaskøler i toppen af beholderen, og afgangen herfra kan så via trevejsventil ledes enten videre i beholderen eller alternativt ud i luftvarmepladen. Ideen er naturligvis udsprunget af et ønske om at sænke afgangstemperaturen fra gaskøleren så meget som muligt.

Hvis der er rumvarmebehov, og kølemidlet derfor ledes ud i luftvarmepladen, vil afgangstemperaturen være bestemt af rumluftens temperatur, mens det i perioder, uden rumvarmebehov, vil være vandtemperaturen i bunden af beholderen, der bestemmer gaskølerens afgangstemperatur. Løsningen er interessant bl.a. af reguleringshensyn. I varmesystemer, hvor varmen leveres via gulvvarme, er det næsten umuligt at regulere varmen i perioder med store temperatursvingninger (f.eks. i foråret, hvor nätterne kan være kolde og dagene lune). Dette skyldes gulvvarmens store træghed, og det er derfor ønskeligt at have mulighed for at tilføre ekstra varme i perioder, f.eks. ved hjælp af et luftvarmesystem. Hermed kan grundbelastningen på gulvvarmen reduceres, og det samlede energiforbrug reduceres hermed samtidig med at komfortniveauet hæves.

Der kan ligeledes som i løsning 1 monteres en spiralveksler til gulvvarmesystem. Placeringen af denne spiral er naturligvis kritisk, da det skal sikres, at den optimale temperaturfordeling i beholderen opretholdes, således at temperaturen ved gaskølerens afgang altid er lavest mulig. Løsningen med en veksling mellem gaskølerafgang og vandets returrør fra gulvvarmesystemet er naturligvis også relevant her.



Figur 2: Løsningsforslag 2

Luftvarmefladen kan enten være en kanalmonteret "lamel-på-rør-veksler" eller en separat monteret flade svarende til inderdelen af en splitunit.

### 3.1.3 Mulige systemløsninger – Kølesystem

I de to beskrevne løsninger er forskellige gaskølerudformninger beskrevet. I begge tilfælde er der beskrevet yderligere vedrørende kølesystemets udformning. I det følgende er det forsøgt at give forslag til, hvorledes kølesystemet kan designes på den mest optimale vis.

Fordamperen i systemet skal naturligvis designes til den nødvendige ydelse og tryk, men vil ellers være lig traditionelle fordampere. Kompressoren er, som tidligere nævnt, Danfoss' nyudviklede hermetiske CO<sub>2</sub>-kompressor til transkritisk drift.

Gaskøleren viklet inde i beholderen kan eksempelvis være mikrokanaler for at sikre optimal varmeoverføring. Den luftkølede gaskøler (luftvarmefladen) bør være en "lamel-på-rør-veksler", hvor rørene med fordel kan være mikrokanaler.

Drøvlingen kan foretages enten ved hjælp af Danfoss' nyudviklede konstanttryksventil, en TBR ventil (se senere beskrivelse) eller alternativt kan kapillarrør anvendes. Teknologisk Institut har gennem den seneste periode arbejdet med udvikling og opstilling af modeller for kapillarrør i transkritiske CO<sub>2</sub>-systemer, og det første transkritiske CO<sub>2</sub>-anlæg med kapillarrør er under indkøring. De her beskrevne anlægs løsninger vurderes som oplagte til at anvende kapillarrør, da fordampningstemperaturen samt gaskølerens afgangstemperatur er så godt som konstante. Netop dette forhold gør ligeledes, at det ikke vurderes nødvendigt at anvende receiver i systemet, da det vil være muligt at køre med afstemt fyldning.

### 3.1.4 Opbygning af kølekredsløb – den valgte løsning

I det følgende afsnit følger en kort beskrivelse af systemopbygningen samt en beskrivelse af hovedkomponenterne.

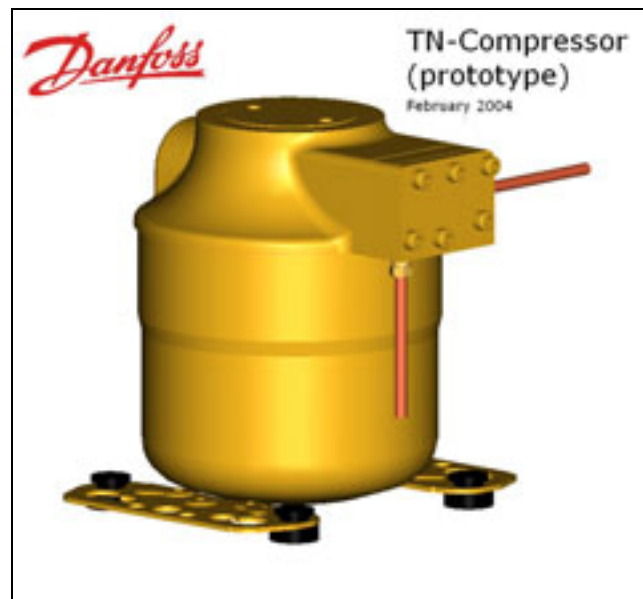
#### 3.1.4.1 Den valgte systemløsning

Det er i projektet valgt at arbejde med en løsning, der i princippet ligner den før beskrevne løsning 2, nemlig en løsning, hvor der anvendes en traditionel veksler i beholderen (gaskølerspiral) samt muligheden for at montere en ekstra veksler til rumopvarmning i forlængelse af gaskøleren i beholderen. Denne løsning gør systemet universelt, således at apparatet eventuelt kan leveres både med og uden den ekstra veksler.

Kølesystemet opbygges på traditionel vis med en kompressor, en fordamper, en gaskøler (spiral i beholder) samt en såkaldt TBR-ventil (se efterfølgende beskrivelse af de enkelte komponenter).

#### 3.1.4.2 Kompressor

Kompressoren som vist på følgende figur er en Danfoss TN1416 prototype CO<sub>2</sub>-kompressor til transkritisk anvendelse. Det er en én-cylindret stempelkompressor med et driftsområde, som angivet i følgende tabel.



Figur 3: 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 (Maximal COP ved denne betingelse).



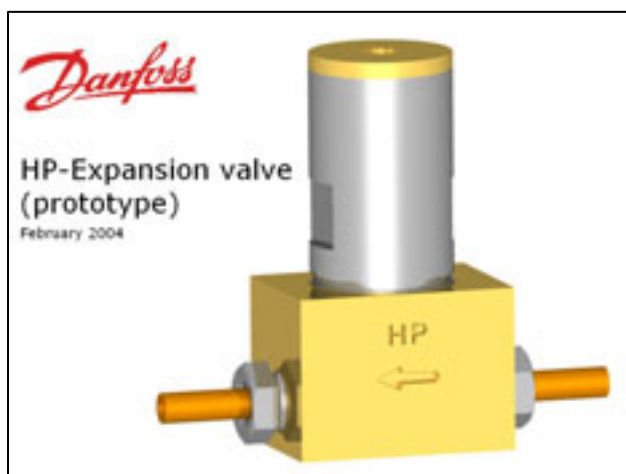
|                          |     |
|--------------------------|-----|
|                          | Max |
| Afgangstryk [bar]        | 120 |
| Sugetryk [bar]           | 70  |
| Sugetemperatur [Celcius] | 40  |

### 3.1.4.3 Ventil

Den anvendte ventil er en Danfoss prototype højtryksekspansionsventil, ligeledes udviklet til brug i en transkritisk CO<sub>2</sub>-proces.

Ventilen består af en fjederbelastet membran, der åbner for en dyse, når indløbstrykket overstiger fjederkraften. Trykket på tilløbssiden kan således justeres ved at ændre fjederkraften via en justering af forspændingen på fjederen.

Ventilen er designet til at levere tryk op til 120 bar.

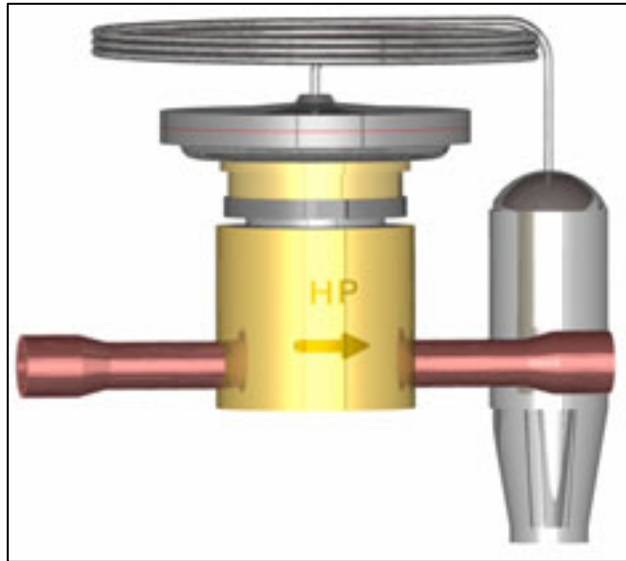


Figur 4: Højtryksekspansionsventil til CO<sub>2</sub>

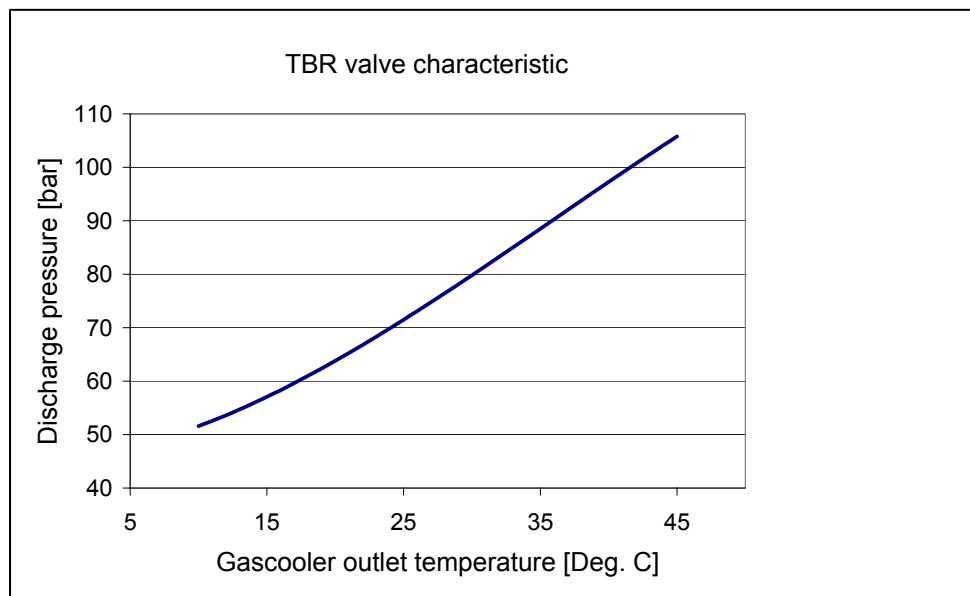
Vil man undgå manuel regulering af ventilen, kan en Danfoss prototype TBR (Thermal Backpressure Regulator) ventil anvendes.

Her er membranen belastet af et termostatelement med føler. Temperaturen i føleren sætter åbningstrykket for ventilen. Føleren placeres ved gaskølerudgangen og giver en trykarakteristik, som vist efterfølgende.

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



Figur 5: TBR ventil til CO2 - fra Danfoss



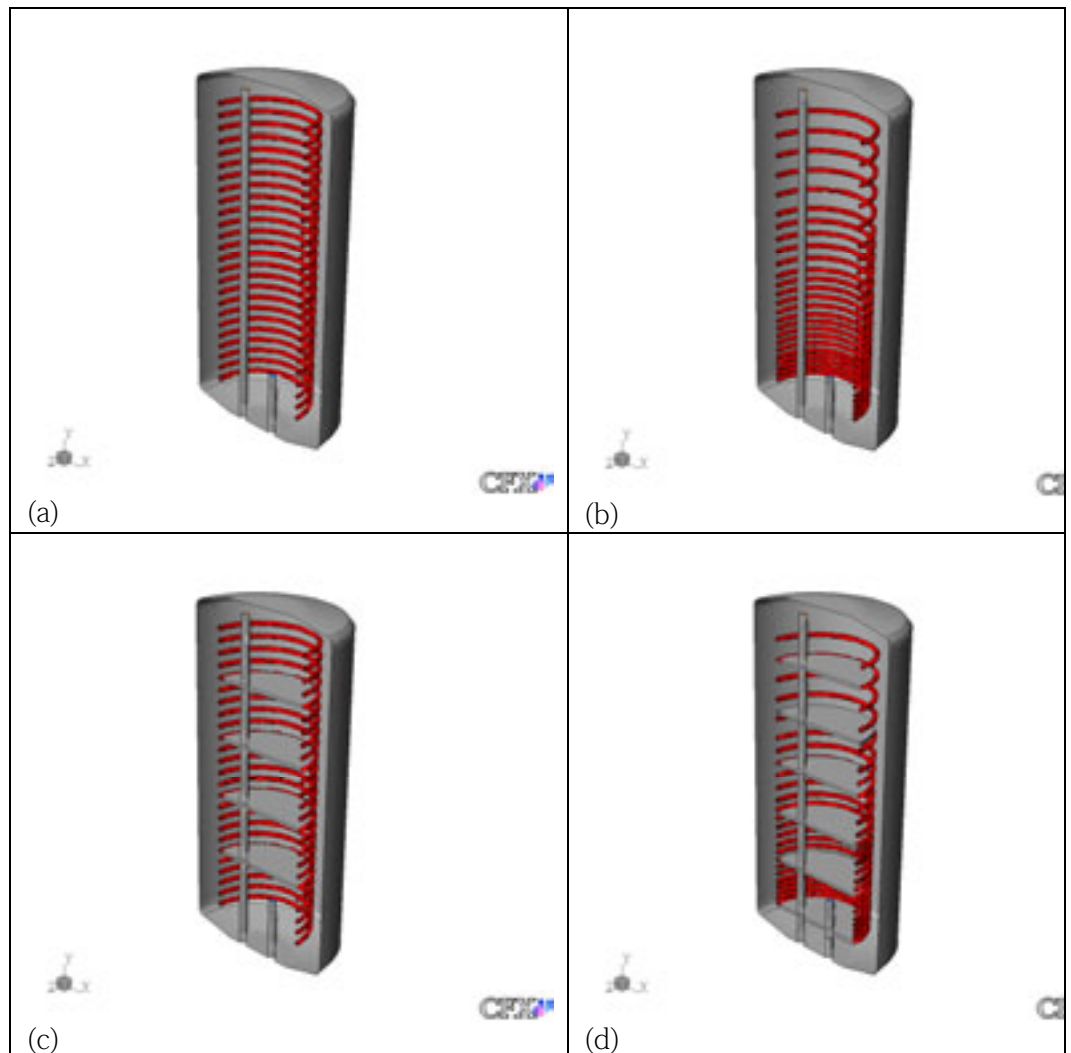
Figur 6: TBR ventilens karakteristik

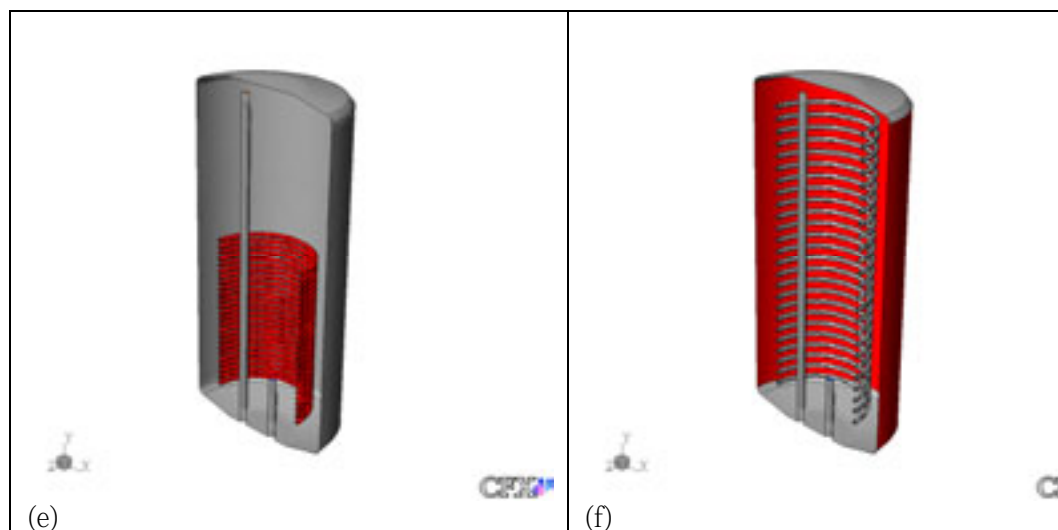
### 3.1.4.4 Design af gaskøler

Der er blevet gennemført transiente beregninger på opvarmningsforløbet af varmtvandsbeholdere med forskellig udformning af varmeveksleren. Der er taget udgangspunkt i de medsendte tegninger med deres dimensioner, og det er primært valg at variere med følgende:

- (a) Jævnt fordelt coil
- (b) Coil med flest vindinger i bunden af beholderen
- (c) Jævnt fordelt coil med horisontale bafler
- (d) Fordelt coil med horisontale bafler
- (e) Koncentreret coil i bund
- (f) Effektafsættelse på beholdervæg.

Disse er skitserede på følgende figur:

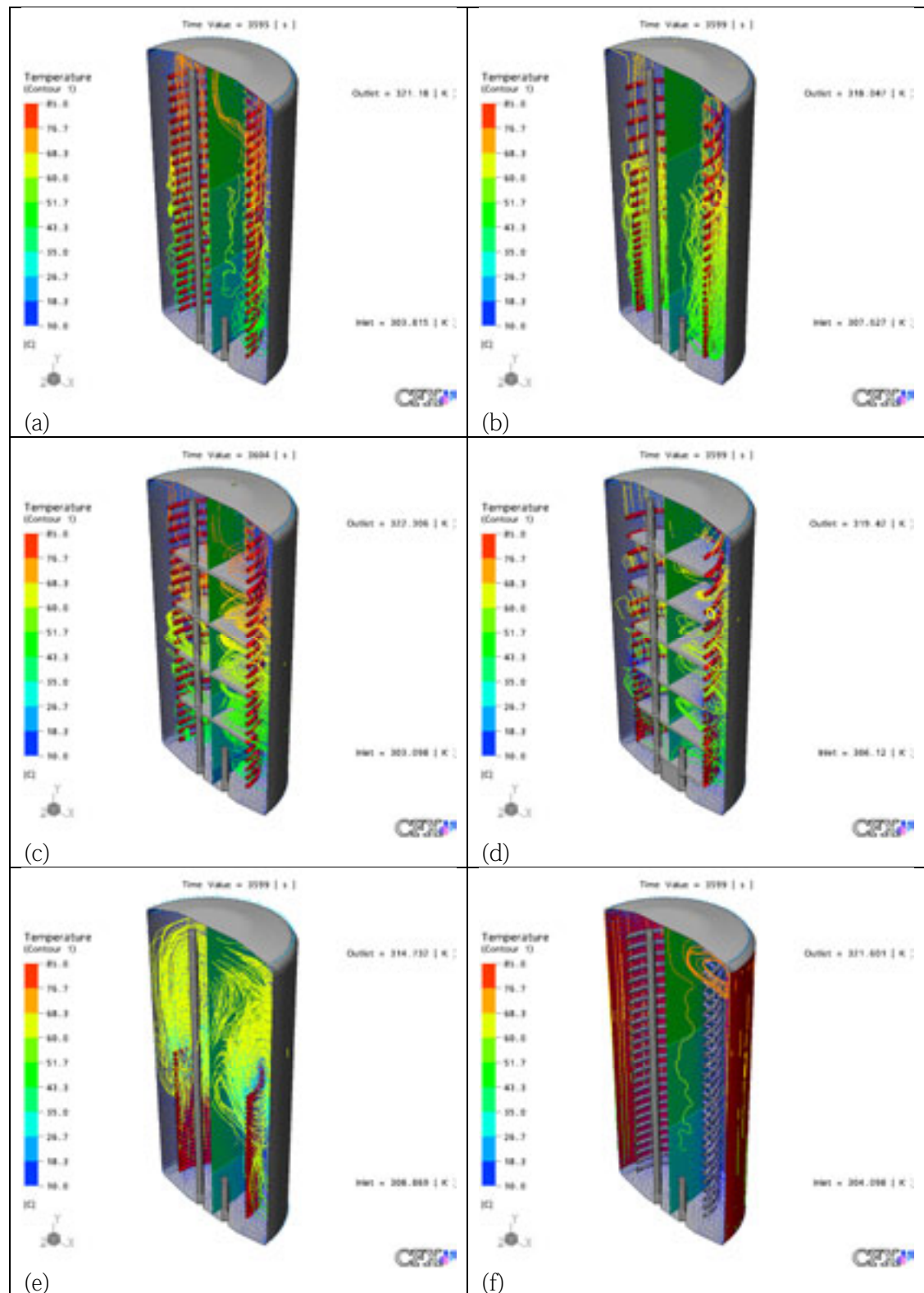




Figur 7 Model lerede geometrier

De enkelte geometrier er blevet modelleret numerisk i CFX5.7 med omkring 300.000 elementer for hver model i et ustruktureret net med en enkel symmetriplan. Der er løst transient for opvarmningen af beholderen, hvor siderne er holdt adiabatisk, og der er ikke flow ind og ud af beholderen. Der varmes med 2 kW i coilen, og som initialbetingelse er tanken antaget at have linier temperaturfordeling mellem top og bund mellem 10 °C og 65 °C. For for-simpling af beregningen er det antaget, at opvarmningen foregår ved en konstant heatflux, der er jævnt fordelt fra coilen. Dermed undgås at beregne CO<sub>2</sub>-delen af systemet. Det må samtidig bemærkes, at dette vil være en idealtilstand, da hele coilen udnyttes optimalt. Opvarmningsforløbet er løst indtil en time real time. Dette svarer i parentes bemærket til 18-20 timers beregningstid for hver model.

Ved adiabatisk opvarmning af beholderen, vil det generelle temperaturniveau efter en vis tid stige liniert, mens temperaturgradienterne vil være fastholdt. Strømningen vil stabiliseres, således at opdriftskræfterne i systemet svarer til strømningsmodstanden over rør og beholder. Denne tilstand indfinder sig først sent for en beholder af denne type, hvilket vil sige, at det ikke er sikkert at en times tid real time er nok til at identificere dette billede præcist. Beregningerne viser, at det er relativt nemt at opnå den ønskede lagdeling i beholderen (f.eks. vha. vandretliggende bafler eller opvarmning fra beholdervæggen) samt at en simpel gaskølergeometri jævnt fordelt i beholderen er at foretrække. Se Figur 8.

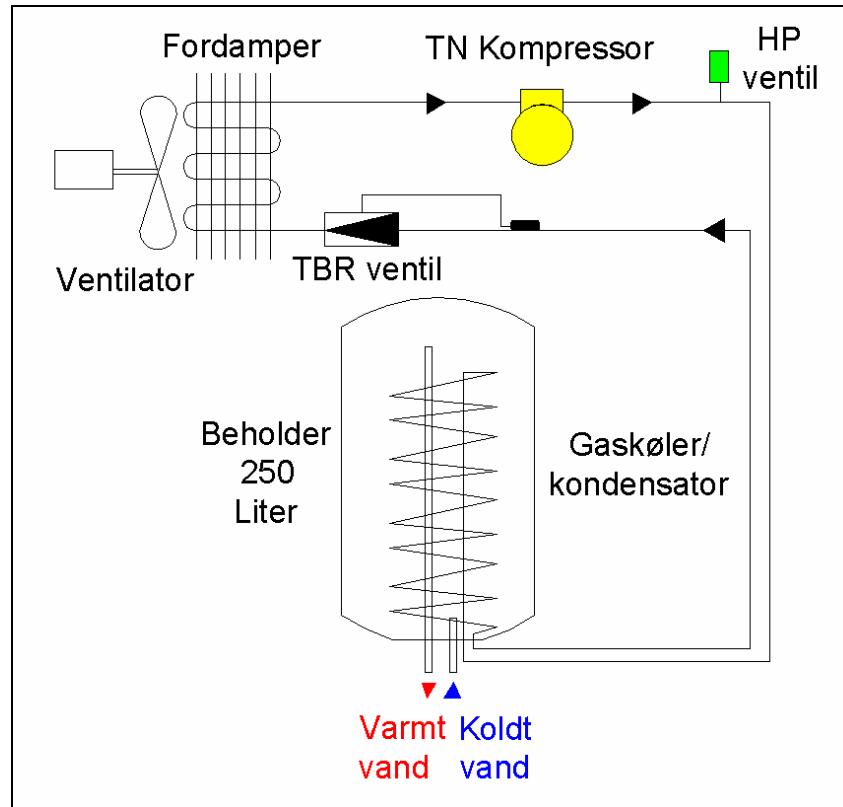


Figur 8: Temperatur og strømningssbillede efter 1 times opvarmning

En tilstræbt tilstand vil være en høj grad af lagdeling samtidig med hastigheder af en vis størrelse omkring coilen. Dette er specielt vigtigt omkring coilens udgang, da dette sikrer god køling af gassen. Imidlertid viser beregningerne, at kombinationen af rimelige hastigheder i beholderens kolde del er meget vanskelige at frembringe.

### 3.1.5 Det samlede system

Her følger en principbeskrivelse af prototypeanlægget. Ud over de skitserede komponenter er der monteret adskillige udtag til trykmålinger under testmålingerne. Se også punktet "Billeder af prototypen" for indsigt i systemopbygningen.



Figur 9: Systemskitse

Da der arbejdes med væsentlig højere systemtryk end traditionelt, skal der benyttes komponenter, designet specielt til dette driftsforhold. Hvor ikke andet er beskrevet, er der benyttet standard 6 mm CU rør til opbygningen af kølekredsen. Rørsystemet er isoleret for at minimere varmetabet i anlægget. Anlæggets fyldemængde er ca. 600 gram.

**Styring:**

Anlægget er opbygget med den elektroniske styring CTS 600 produceret af Nilan A/S. Dette giver bl.a. mulighed for en god temperaturstyring, samt regulering af EC-ventilatoren.

**Fordamper:**

Konstrueret til maksimalt 440 bar. Rør type 7,2 mm CU rør med godstykkelsen 0,7 mm. Dimension (HxBxT): 300x400x65mm

**Gaskøler/kondensator:**

Indvendig spiral direkte i brugsvandet. Spiralen er konstrueret således, at indløbet føres direkte til toppen af beholderen. Den lodret stående spiral består af 62 viklinger ca.  $\varnothing$ 150mm, konstrueret jævnt fordelt over beholderens højde.

**Beholder:**

Beholderen er isoleret kraftigt for at minimere varmetabet, dette har stor betydning, da der opnås

højere vandtemperatur end ved traditionelle anlæg. Koldtvandsindløb i bunden af beholderen med en fordelingsanordning, der sikrer optimal lagdeling i beholderen. Udløb af varmt vand foretages i toppen af beholderenheden. Beholderstørrelse 250 liter.

**Kompressor:** Der er benyttet en TN kompressor fra Danfoss.

**Regulering:** Der er benyttet en TBR ventil (Thermal Backpressure Regulator) fra Danfoss. Ventilen er reguleret ind til driftsforholdene.

**Pressostat:** Af sikkerhedsmæssige årsager er der af hensyn til testmålingerne monteret en 135 bars Saginomiya patronpressostat. Dette vil ikke være nødvendigt under serieproduktion, da TBR-ventilen åbner totalt ved 120 bar.

### **3.1.6 Billeder af system og varmepumpe**

På de efterfølgende billeder ses varmepumpe og kølesystemets opbygning.



Figur 10: Billede af varmepumpe efter endt prøvning





Figur 11: Kølesystem, med fordamper, kompressor og ventil

### 3.1.7 Vurdering/analyse af rumvarmeproduktion med CO<sub>2</sub>-varmepumpe

Som tidligere nævnt er den opbyggede prototype konstrueret uden rumvarmedel. Der er i stedet gennemført en række analyser af det kombinerede system. Forudsætninger for analyserne er følgende:

- Rumvarmen leveres af gaskøler (kondensator) monteret efter gaskøleren i beholderen
- Rumvarmeproduktionen influerer ikke på forholdene i beholderen (hverken de termiske forhold eller de styringsmæssige)
- Forventet rumtemperatur ca. 20 °C og gaskølerafgang på ca. 30 °C
- Gaskølertrykket følger optimalkurven
- Fordampningstemperaturen ligger på +10°C

Umiddelbart vil tilslutning af ekstra varmeplade i serie med den eksisterende gaskøler kunne fordoble kapacitet og effektivitet på anlægget. Dette forudsætter dog, at varmen kan afsættes i fladen, og at det øvrige kølesystem forbliver uændret.

Systemer med rumvarmeproduktion kan ligeledes udformes som et vandbærent system, hvor varmen hentes fra en ekstra spiral placeret i nederste halvdel af beholderen. Dette systems egenskaber vil være meget lig egenskaberne for det beskrevne system.

Der er gennemført en række beregninger på systemet med ekstra varmeplade (gaskøler i serie med den i beholderen monterede) og med førnævnte forudsætninger fås følgende:

Trykforhold:  $105 \text{ bar} / 45 \text{ bar} = 2,3 \text{ (bar/bar)}$

Isentropisk virkningsgrad  $\sim 0,58 \text{ (-)}$

Volumetrisk virkningsgrad  $\sim 0,85 \text{ (-)}$

T afgang gaskøler efter beholder =  $45^\circ\text{C}$

T afgang gaskøler efter flade 2 =  $30^\circ\text{C}$

Teoretisk COP for varmepumpe uden ekstra varmeplade = 2,7

Teoretisk COP for varmepumpe med ekstra varmeplade = 4,6

Altså en forøgelse af varmepumpens COP på ca. 70%.



## 4 Resultat af forsøg

Der er gennemført en prøvning af varmepumpeprototype i laboratorium efter den hollandske prøvningsnorm "TNO – Test Directive for Hot Water Heat Pumps – R2003/141"

### 4.1 Resultater

|                  |   |
|------------------|---|
| Opstart:         | Indstilling af varmepumpe.<br>Drift af ventilator når varmepumpen kører, setpunktstemperatur i beholderbund 47 °C. Elpatron aktiveres ikke. Rumtemperatur 20 °C, og ind sugningstemperatur 20 °C. |
| Opvarmningstid:  | 6 timer og 3 minutter   |
| Forbrugt energi: | 13810,8 kJ  |

Krav til Flush 10 °C +/- 2 K. Dette krav er overholdt.  
Krav til relativ fugtighed (57 %) er ikke overholdt.

|                          |          |
|--------------------------|----------|
| Middeltemp. Indblæsning: | 21,6 °C  |
| Middeltemp. Omgivelser:  | 19,12 °C |

#### 4.1.1 Standby tab

|                                |                    |
|--------------------------------|--------------------|
| Standby tab inkl. ventilator:  | 34,29 W            |
| Standby tab ekskl. ventilator: | 30,59 W            |
| Periode:                       | 55 timer og 4 min. |
| Forbrugt energi:               | 6762,36 kJ         |

#### 4.1.2 Tappeprøvning:

|   |           |
|---|-----------|
| Aftappet energi:                        | 38293 kJ  |
| Aftappet volumen:                       | 209,4 l   |
| Tilført energi i fase 3:                | 27809 kJ  |
| Tilført energi til ventilator i fase 3: | 1584 kJ   |
| Opvarmningsperiode efter 24 h:          | 7552 sek. |
| Standby tab første 24 h:                | 2947 kJ   |
| COP inkl. fan:                          | 1,39 (-)  |
| COP ekskl fan:                          | 1,47 (-)  |

## 5 Litteraturliste

/1/ CO2 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/ CO2 som kølemiddel i varmepumper, anden fase i udviklingsprojekt

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



## 6 English Summary

This project report describes the implementation of the Danish project called "Combined heat pump for sanitary hot water and space heating with CO<sub>2</sub> as refrigerant". In the course of the project, a combined heat pump has been developed for heating sanitary hot water and producing domestic space heating.

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

During the project, a number of system solutions have been analysed and at the end of the project a prototype was built. It was tested in the laboratory according to a current Dutch standard for heat pumps for sanitary hot water. The prototype was constructed without the space heat part which solely has been analysed according to calculations. The reason is that there currently are no applicable European standards for the testing of combined systems and as the total efficiency of the system mainly depends on the temperature out of the gas cooler it was decided not to spend resources on the construction of the combined system in the prototype version of the unit. Instead, a number of proposals have been submitted to how the system with a space heat section could be constructed.

The main components used in the prototype (compressor, exchangers, valve, control and tank) are all partly commercially available and therefore focus has been on the system construction. During the project, a number of CFD calculations have been carried out on the gas cooler in the hot water tank and the results show how important it is that the gas cooler is designed and placed correctly.

The laboratory tests carried out on the unit show that the COP of the heat pump plant in connection with sanitary hot water tapping (according to Dutch standard) is 1.4 – 1.5 which is not immediately satisfactory. But when it is considered that the unit is a prototype heat pump where product ripening/optimisation subsequently should take place the result is considered relatively reasonable.

Proposals for improvements:

- Heat loss from the compressor should be reduced – the heat loss is relatively large and will principally be lost in the process.
- Improvement of gas cooler so a lower discharge temperature is obtained from the gas cooler. Precisely the discharge temperature is Alpha and Omega in the effort to optimise the process.

- Optimised determination of refrigeration charge that suits the current discharge temperature from the gas cooler. The realised determination of charge has been carried out at discharge temperature of the gas cooler = 36 °C
- The pressure pipe should run at the top of the tank and not at the bottom so the hot pressure gas emits heat (at high temperature) exactly in that part of the tank where a high temperature is needed.

By using the residual heat from the gas cooler for heating purposes the actual discharge temperature from the gas cooler can be lowered substantially (down to app. 30 °C) which would improve the total process by up to 70%.

Summed up the results of the project are:

In the project, the construction of a prototype heat pump with CO<sub>2</sub> as refrigerant has been a success. If the commercial conditions are available it will – with certain technical adjustments - be possible to start an actual batch production.