

Miljøprojekt Nr. 760 2003

CO₂ som kølemiddel i varmepumper

2. hovedfase i udviklingsprojekt

Claus S. 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 SIDEN SIDST	13
3.2 OPBYGNING AF PROTOTYPE	14
3.2.1 <i>Den transkritiske kredsproces</i>	14
3.2.2 <i>Grundlæggende krav til varmepumpe med CO2 som kølemiddel</i>	16
3.2.3 <i>Opbygning af kølekredsløb</i>	16
3.2.4 <i>Opbygning af styring</i>	22
3.2.5 <i>Styringsstrategi</i>	23
3.2.6 <i>Teoretisk model af transkritisk brugsvandsvarmepumpe</i>	24
3.3 TEST AF PROTOTYPE	25
3.4 ENDELIGT KONCEPT	30
4 LITTERATURLISTE	33
5 ENGLISH SUMMARY	35

.....
Bilag A: Overordnede krav til brugsvands varmepumpe

Forord

Nærværende rapport beskriver anden hovedfase af projektet "CO₂ som kølemiddel i varmepumper".

Projektets overordnede mål er at bidrage til udbredelse af renere produkter til køleområdet (hvorunder hører varmepumpebranchen) ved anvendelse af køleanlæg med naturlige kølemidler, hvor der hidtil har været anvendt HFC- og HCFC-stoffer (med ozonlagsnedbrydnings- og drivhuseffekt).

Projektet indeholder to hovedfaser, hvoraf den første omhandler et indledende studie af CO₂ som kølemiddel i varmepumper. Første fase er beskrevet i rapporten "CO₂ som kølemiddel i varmepumper", der kan findes på Miljøstyrelsens hjemmeside.

Anden hovedfase, der omhandler opbygning og test af prototype er beskrevet i nærværende rapport.

Projektet er økonomisk støttet af Miljøstyrelsen, Kontoret for renere produkter.

Projektets organisation består af følgende:

Vesttherm (A/S Vestfrost group)
Høgevej 9
6705 Esbjerg Ø

Lodam Elektronik A/S
Grundtvigs Allé 163
6400 Sønderborg

Teknologisk Institut, Energi (projektleder)
Køle- og Varmepumpeteknik
Gregersensvej
2630 Tåstrup

Miljøstyrelsens Kemikaliekontor (følgegruppe)
Strandgade 29
1401 København K

Der skal fra projektlederens side rettes en tak til projektgruppen, samt naturligvis til Miljøstyrelsen. Herudover en tak til de øvrige firmaer, der har bidraget til projektets gennemførelse, herunder en speciel tak til Hydro Aluminium Precision Tubing Tønder A/S for deres store bidrag.

Claus S. Poulsen
Civilingeniør/Projektleder
Teknologisk Institut

Sammenfatning og konklusioner

Nærværende projektrapport beskriver design, opbygning og test af prototype varmepumpe med CO₂ som kølemiddel. Projektet er anden hovedfase i et projekt opstartet i 2000 med tilten "CO₂ som kølemiddel i varmepumper". I første hovedfase blev det vist at der i dag findes komponenter på markedet til transkritiske CO₂ processer. Udbuddet er dog ikke voldsomt – men som det ses af nærværende rapport er det trods alt muligt at designe, opbygge og teste et prototypesystem, som lever op til de forventninger, der kan stilles til CO₂ varmepumpeanlæg.

Varmepumpen, der er opbygget i projektet, er en brugsvandsvarmepumpe, der er beregnet for opvarmning af brugsvand til husholdningsbrug. Varmepumper af denne type indeholder typisk HFC-134a, som er en såkaldt drivhusgas. Grundet pres fra myndigheder og visse kundegrupper er fokus i branchen rettet mod at finde alternativer til HFC'erne. Det mest nærliggende alternativ er uden tvivl CO₂, der har fremragende egenskaber som kølemiddel i varmepumper og specielt i brugsvandsvarmepumper, hvor kravet til høje temperaturer er til stede.

Projektet har vist, at visse komponenter er relativt svære at skaffe til transkritiske CO₂ systemer, specielt små kompressorer til brugsvandsvarmepumper har vist sig praktisk talt umulige at skaffe. Derfor er der i projektet anvendt en semihermetisk stempelkompressor, som har en væsentlig højere ydelse end nødvendigt. Kompressoren (motoren) er derfor blevet forsynet med en frekvensomformer, der gør det muligt at reducere kompressorens ydelse. Men trods dette er kompressorens ydelse stadig en del højere end ønskeligt, og der er derfor foretaget visse korrektioner i analysen af måledata.

Af andre komponenter, som det har været svært at skaffe, kan nævnes ventilerne. I projektet er anvendt to ventiler, én ventil, der regulerer trykket i gaskøleren (højtryks ventil) og én der virker som drøveorgan. Begge de anvendte ventiler vurderes ikke på nuværende tidspunkt som værende kommercielt konkurrencedygtige.

Der er i projektet desuden udviklet en ny styring til brugsvandsvarmepumper med CO₂ som kølemiddel. Styringen indeholder bl.a. optimal styring af gaskølertryk (højtrykket), som er nødvendig, hvis der skal opnås en optimal regulering af kølemiddelsystemet og kunne opnås de virkningsgrader, der er forventet.

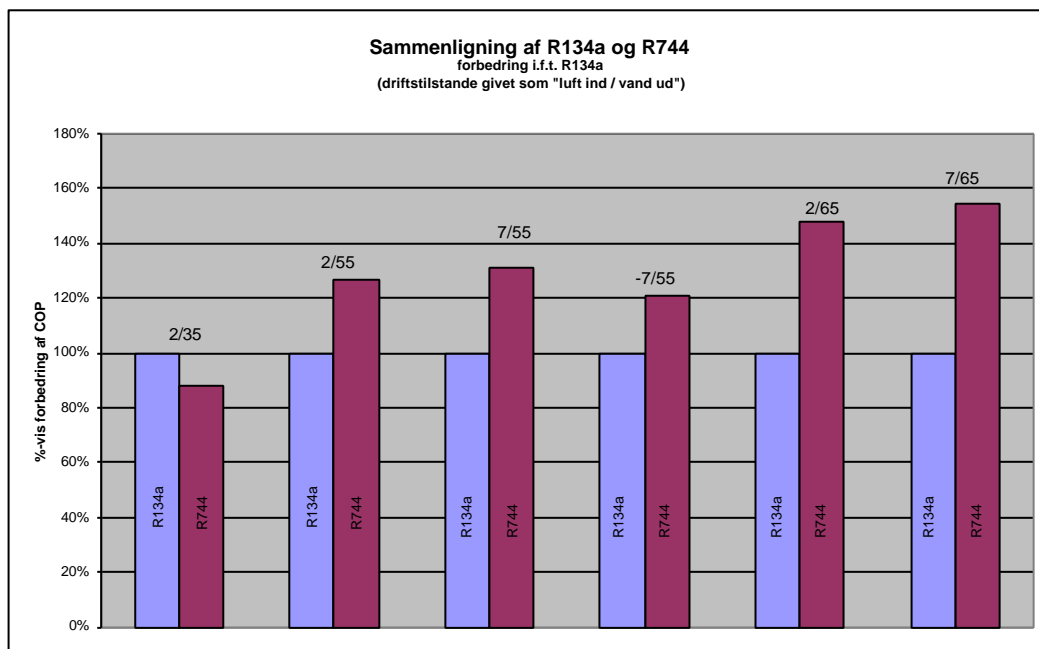
I projektet er der gennemført en række test af den opbyggede prototype. Af disse tests kan bl.a. nævnes tests vedr. kølemiddelfyldning, tests af ventiler etc. samt naturligvis de dele af EN255-3 testen, der er gennemført. EN255-3 er den prøvningsstandard, der anvendes, når brugsvandsvarmepumpers ydelse og effektivitet skal fastlægges.

Testene viser alle, at såfremt der kompenseres for forhold som bl.a. den alt for store kompressor, er CO₂ som forventet væsentligt bedre end R134a – det skal dog bemærkes at kun dele af EN255-3 testen er gennemført.

1 Indledning

I forbindelse med Miljøstyrelsens plan for udfasning af kraftige drivhusgasser, herunder HFC-kølemidlerne, søger køle- og varmepumpebranchen i øjeblikket alternativer til de kølemidler, man i dag anvender. Et af de kølemidler der i fremtiden forventes at kunne erstatte HFC'erne er CO₂ (R744). CO₂ har dog helt anderledes egenskaber, end de kølemidler man i dag anvender, bl.a. opererer anlæg med CO₂ ved et højere tryk, og typisk er processen transkritisk, hvilket betyder, at trykket på højtrykssiden er højere end det kritiske tryk for det pågældende kølemiddel. Desuden har CO₂ et betydeligt mindre specifikt volumen, hvilket medfører at de komponenter, der skal anvendes i anlæggene fylder væsentligt mindre.

Det blev i projektets første hovedfase vist, at det er muligt at skaffe komponenter til opbygning af transkritiske CO₂ kølesystemer. Et af de områder, hvor det blev vist at det er oplagt at anvende CO₂ som kølemiddel er i varmepumper og specielt i brugsvandsvarmepumper er det nemlig muligt at udnytte det temperaturglid, der kan opnås i gaskøleren. Herved kan der, afhængig af driftskonditionerne, opnås virkningsgrader for varmepumpen med CO₂, der er væsentlig bedre end for traditionelle varmepumper. I første fase af projektet blev det bl.a. vist, at der ved vandtemperaturer på 65°C kan opnås en virkningsgrad der er mere end 50% bedre end for et tilsvarende R134a system. På nedenstående figur er det vist, hvor meget bedre CO₂ er end R134a:



Figur 1.1: Teoretisk sammenligning af R134a og R744 (CO₂).

En stor del af arbejdet i første fase bestod i undersøgelsen af egnede komponenter. Bl.a. blev der undersøgt mulighederne for at skaffe en egnet kompressor til brugsvandsvarmepumper med CO₂. En række af de firmaer, der i første fase blev nævnt som mulige leverandører af kompressorer er her i anden fase blevet kontaktet med henblik på levering af kompressor til

prototypen. Nærmere beskrivelse af de valgte komponenter følger i afsnittet, der beskriver den opbyggede prototype.

2 Projektindhold

Projektet er opdelt i to hovedfaser, hvoraf første fase indeholdte følgende delelementer:

Hovedfase 1: Indledende studie af CO₂ som kølemiddel i varmepumper

- 1.1) Opstilling af kravspecifikationer
- 1.2) Undersøgelse af komponenter
- 1.3) Undersøgelse af styringsstrategi
- 1.4) Rapportering og videnformidling

Disse aktiviteter er alle beskrevet i /1/ (CO₂ som kølemiddel i varmepumper - <http://www.mst.dk/udgiv/publikationer/2001/87-7944-330-3/pdf/87-7944-387-7.pdf>).

Den efterfølgende hovedfase, som er beskrevet i nærværende rapport indeholdte følgende delfaser:

Hovedfase 2: Dimensionering, opbygning og test af prototype (brugsvandsvarmepumpe)

- 2.1) Projektledelse
- 2.2) Udvalgelse af komponenter
- 2.3) Styringsstrategi
- 2.4) Opbygning af styring
- 2.5) Opbygning af første prototype
- 2.6) Test af første prototype
- 2.7) Fastlæggelse af endeligt koncept

3 Projektets gennemførelse

3.1 Siden sidst

I projektets første hovedfase blev der gennemført en komponentundersøgelse, der havde til formål at klarlægge hvorvidt det var muligt at skaffe komponenter til en varmepumpe med CO₂ som kølemiddel. Undersøgelsen gav en overblik over aktuel status på daværende tidspunkt (efterår 2000) for komponenter til transkritiske CO₂ køleprocesser.

Siden denne komponentundersøgelse blev gennemført, er der naturligvis sket en masse indenfor dette område. Naturligvis spiller undersøgelsen af egnede kompressorer en central rolle, og det er også en af de komponenter, hvor der pt. foregår den største udvikling.

Bl.a. har den tyske kompressorproducent BOCK netop offentliggjort et projekt omkring udvikling af en transkritisk åben stempelkompressor designet for automobilindustrien (A/C i f.eks. busser). Kompressorens kuldeydelse ligger dog en del højere end, hvad der er nødvendigt i brugsvandsvarmepumper i husholdninger. Men tendensen er, at stadig flere producenter i dag arbejder med, eller ligefrem producerer kompressorer til transkritisk drift.

Det er dog stadig meget begrænset, hvad der i dag tilbydes af hermetiske kompressorer til CO₂. Og hvis kølemidlet skal blive en succes i små brugsvandsvarmepumper er det et krav, at der skal anvendes hermetiske kompressorer (grundt alt for stort varmetab fra semihermetiske og åbne kompressorer).

Undersøgelsen i første hovedfase viste, at det primært er i Japan, der virkelig foregår arbejde, som på relativ kort sigt vil kunne sikre, at der kommer hermetiske kompressorer til CO₂ på markedet. Desuden markedsfører Sanyo allerede nu en brugsvandsvarmepumpe med CO₂ på det japanske marked. Dette har medført en forventning om, at denne varmepumpe snart vil være kommercielt tilgængelig også på det europæiske marked. Det skal dog understreges at varmepumpen ikke umiddelbart forventes at kunne konkurrere med de eksisterende varmepumper rent prismæssigt – dette vil bl.a. kræve at udbuddet af komponenter til transkritiske CO₂ processer bliver væsentligt større.

Også omkring andre komponenter til transkritiske CO₂-systemer er der siden afslutningen af første fase set en del interessante udviklingstendenser. Bl.a. har EGELHOF nu en step-motor ventil, der bl.a. er anvendt i den prototype, der er opbygget i projektet. Ventilen anvendes i prototypen som termoventil (drøvleventil), og dette har vist sig som en ganske god løsning rent teknisk. Desværre er ventilen i øjeblikket ikke attraktiv, når der ses på prisen, men som for kompressorerne må det forventes at udbud og efterspørgsel i fremtiden vil ændre markedet betragteligt sammenlignet med det vi i dag ser.

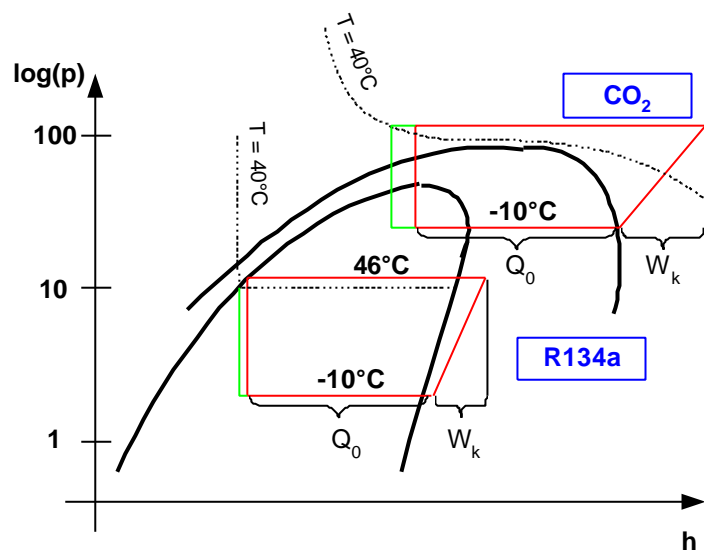
3.2 Opbygning af prototype

I første hovedfase blev de grundlæggende forhold omkring transkritiske CO_2 processer gennemgået. I det efterfølgende afsnit gennemgås de vigtigste forhold, som anses for absolut nødvendige at have kendskab til, hvis man ønsker at anvende CO_2 i varmepumper. Afsnittets indhold er hentet fra første hovedfases rapport (se /1/).

3.2.1 Den transkritiske kredsproces

Anvendes CO_2 som kølemiddel i køleanlæg eller varmepumper, vil processen være væsentlig forskellig afhængigt af temperaturen på kondensatorsiden. Ved lav temperatur af det medie, der skal køle kondensatoren, vil processen forløbe som for andre kølemidler (Carnot-proces). Imidlertid vil processen ved højere temperaturer forløbe lidt anderledes, da CO_2 ikke kan kondensere ved temperaturer over 31°C . Dette betyder ikke, at processen ikke kan levere køling eller varme, men blot at systemet skal designes efter den anderledes kredsproces (Lorentz-proces).

Kondensatoren anvendes nu ikke længere til at kondensere kølemidlet, men til at køle den transkritiske fluid – og benævnes derfor ofte som ”gaskøleren”.



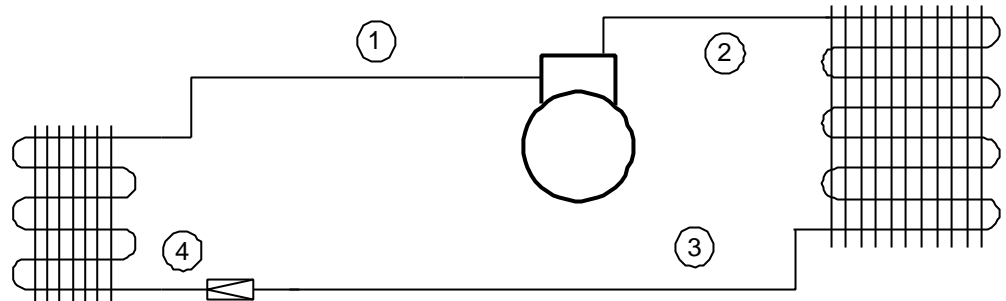
Figur 3.1: Kredsprocesser for R134a og CO_2

På figur 3.1 ses den transkritiske kredsproces sammenlignet med den konventionelle kredsproces med R134a indtegnet i et $\log(p)$, h -diagram (tryk-enthalpi diagram).

På figuren er indtegnet de to isothermer (40°C) for hhv. R134a og CO_2 . Begge processer arbejder ved en fordampertemperatur på -10°C og op mod en udetemperatur/ eller vandtemperatur på ca. 40°C .

Som det ses, arbejder kredsprocessen med CO_2 ved langt højere tryk end R134a.

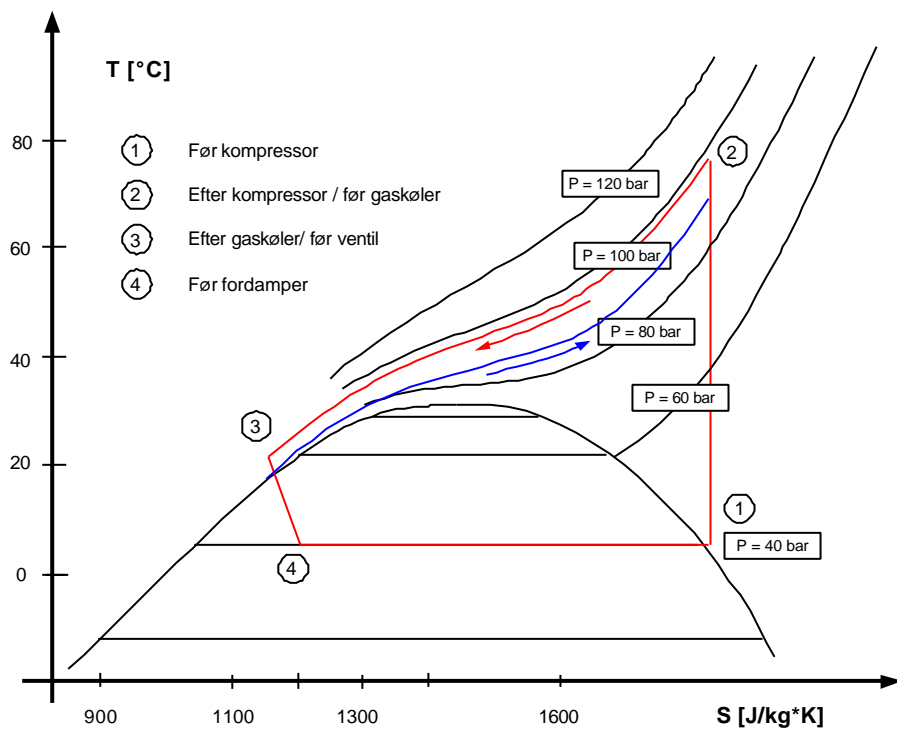
Dette betyder, at rørsystemer, beholdere og komponenter skal designes til dette. Endvidere ses, at ekspansionsventilen har transkritisk fluid på tilgangen mod normalt væske (R134a). Dette betyder, at væskedannelsen for den transkritiske proces sker i ventilen under ekspansionen gennem dysen, hvilket normalt ikke er noget problem. Skematisk ser rørdiagrammet for en varmepumpeproces (eller køleproces) med CO₂ ud som traditionelt.



Figur 3.2: Simpelt varmepumpesystem

Anlægget er opbygget med en kompressor, fordampner, kondensator (gaskøler) og en ventil. Anlægget indeholder således de samme komponenter som traditionelle systemer, hvor man dog er nødt til at modificere anlægget på visse punkter for at få det til at fungere i praksis.

For at analysere processen for varmepumpen bedre tegnes processen i et temperatur/ entropi-diagram (T,S-diagram).



Figur 3.3: Simpel CO₂-proces tegnes i T-S - diagram, hvor T_e=5°C

I diagrammet er kompressionen tegnet isentropisk (ideel) og drøvlingen gennem ekspansionsventilen er isenthalpisk. Endvidere er tryktab i rørstrækninger og varmevekslere ikke medregnet.

Processen tegnet i figur 3.3 viser, hvorledes varmepumpen forventes at køre. Fordampertemperaturen vil ligge omkring 5°C (-10 – 15°C), mens gastemperaturen (CO₂) ud af gaskøleren vil ligge omkring 20°C (15-30°C). Afhængigt af hvilket tryk, der vælges i gaskøleren, kan kompressorens afgangstemperatur varieres (50-120°C). Højtrykket styres vha. ekspansionsventilen, hvilket netop er muligt, da der ved transkritisk drift ikke længere er afhængighed mellem tryk og temperatur i gaskøleren.

Processen fra punkt 2 til 3 sker i gaskøleren, hvor brugsvandet opvarmes. Som det ses, svarer temperaturglidet på kølemiddelsiden til temperaturglidet på vandsiden, hvilket netop kan udnyttes i en modstrømsvarmeveksler i en varmepumpe. Det er således muligt f.eks. at opvarme vandet fra ca. 10°C til 65°C ved en meget høj COP relativt til et R134a-system, hvor man skulle holde en kondenseringstemperatur oppe omkring 70°C. En så høj kondenseringstemperatur ville for et R134a anlæg medføre et markant fald i COP'en og det ville i praksis heller ikke være muligt.

3.2.2 Grundlæggende krav til varmepumpe med CO₂ som kølemiddel

I projektet er der opbygget en prototype varmepumpe (brugsvand). Udgangspunktet for opbygningen er naturligvis de erfaringer, der er gjort i komponentundersøgelsen i første hovedfase. Den opbyggede prototype er efterfølgende testet i laboratorium på Teknologisk Institut. Opbygning og test skal sidenhen danne grundlag for udvælgelse af det endelige koncept.

Der er i projektets første hovedfase opstillet følgende overordnede krav til en brugsvandsvarmepumpe, der indeholder CO₂:

- Ingen væsentlig meromkostning ved anvendelse af CO₂ 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.).

Ved udvælgelse af komponenter til prototypen er der udarbejdet en egentlig kravspecifikation, som tager udgangspunkt i den brugsvandsvarmepumpe, som Vesttherm i dag producerer. Denne kan ses i bilag A.

3.2.3 Opbygning af kølekredsløb

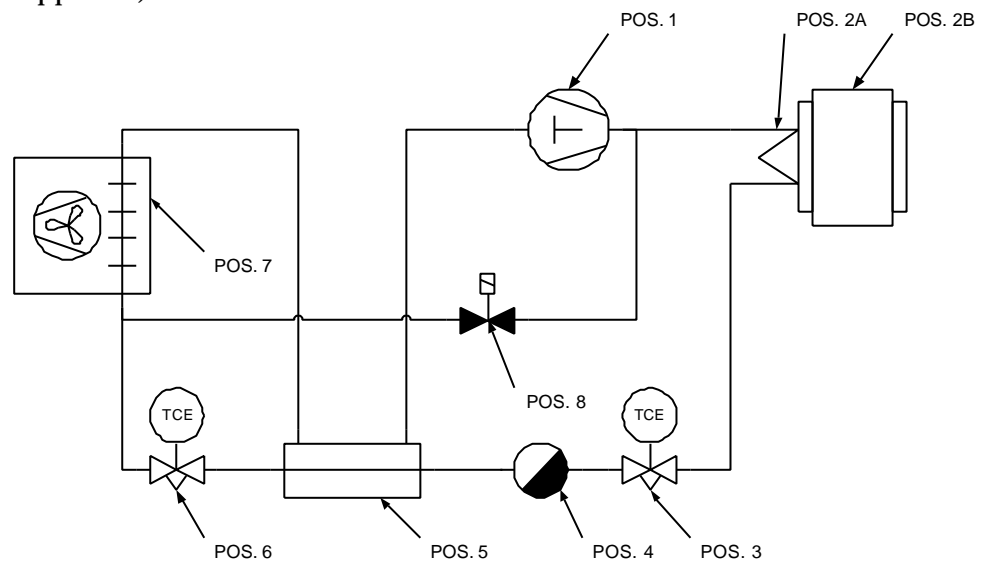
I det følgende afsnit vil der være en kort beskrivelse af den systemopbygningen samt af styringen. Desuden vil der være en beskrivelse af de forskellige centrale komponenter og deres virkemåde, samt et alternativt valg til senere prototyper/0-serie.

På figur 3.4 vises et billede af den prototype – inden denne blev udstyret med styring, måleudstyr samt isolering. Varmepumpen blev opbygget på en stålramme, således at alle komponenter var let tilgængelige og således at varmepumpen kunne transporteres let ud og ind af klimakammeret, hvor apparatet blev testet.



Figur 3.4: Billede af prototype før isolering af beholder og montering af måleudstyr

Det er muligt at vælge forskellige udformninger af kølekredsen. Det er valgt at bruge en 1 trins løsning med mellemtryksreceiver. Denne anlægsløsning er mere kompleks end f.eks. systemer med lavtryks receiver, men er mere driftsikker da der er sikkerhed for olieretur til kompressoren (Se fase 1 rapporten).



Figur 3.5: Kølekredsløb - prototype

Systemet skal kunne håndtere to driftstilstande. Tilstand 1 er underkritisk drift hvor temperaturen ud af gaskøleren pos. 2 er under 31 °C. Tilstand 2 er transkritisk drift hvor temperaturen er over 31 °C ud af gaskøleren.

Ved underkritisk drift fungerer systemet som et konventionelt system hvor kølemidler kondensere i kondensatoren og opbevares ved kondenseringstrykket i receiveren. Ved denne tilstand er der sammenhæng mellem tryk og temperatur.

Ved transkritisk (eller overkritisk) drift er det ikke muligt af kondensere CO_2 . I stedet for at have en blanding af gas og væske i kondensatoren er der en transkritisk fluid. Denne fluid opfører sig som en meget tung gas (densitet $800\text{-}900\text{ kg/m}^3$) med meget stort energiindhold. Desuden er fluiden kompressibel.

For at kunne kontrollere processen er det nødvendigt at styre trykket, da der ikke er sammenhæng mellem tryk og temperatur. Det er valgt at styre trykket efter optimal COP. Der er lavet en reguleringsalgoritme der fortæller hvad trykket skal være som funktion af fordampningstemperaturen og temperaturen ud af gaskøleren.

3.2.3.1 Kompressor



Figur 3.6: Billede af Dorin semihermetisk CO_2 -kompressor til transkritisk drift

Det er valgt at anvende en Dorin CD4.0273 kompressor (pos 1 i kølekredsløbet på figur 3.5), da det var det eneste tilgængelige på markedet på daværende tidspunkt. Den valgte kompressor er ca. 5 gange for stor til denne anlægstype, hvilket bevirker at virkningsgraderne ikke er så gode som ellers. For at kompensere for dette, er kompressoren blevet forsynet med en frekvensomformer, hvorved det er muligt at regulere kompressorens omdrejningstal og dermed dennes ydelse. Når kompressoren frekvensreguleres er det tildels muligt at opretholde kompressorens virkningsgrad ved nedregulering – men i dette tilfælde køres kompressoren ned omkring 15-20 Hz, og her er faldet i virkningsgraderne så stort, at der i analysen af måleresultaterne er foretaget en korrektion af resultaterne.

Kompressorudviklingen er drevet af AC til bilindustrien, hvor der er store forventninger til CO_2 anlæg. Derfor vil der med stor sandsynlighed komme kompressorer i den rigtige størrelse på markedet inden for få år.

Der arbejdes også med kommercielle kompressorer til andre segmenter som kunne blive interessante.

3.2.3.2 Gaskøler og højtryksregulering



Figur 3.7: Billede af gaskøler viklet på beholder

Gaskøleren (pos. 2a) består af MPE rør, der er viklet omkring beholderen (pos. 2b). Der anvendes 5 parallelle løb, der er viklet omkring de nederste 30% af beholderen. Denne løsning er dog ikke optimal, da der er meget højt tryktab i denne del af kredsen (10 bar). For at nedbringe tryktabet kan der køres med flere parallelle løb eller med rør med en større lysning.

Beholderen er en standardbeholder fra Vesttherm (volumen 270 liter).



Figur 3.8: Billede af højtryksventil

Trykket i gaskøleren styres af ventilen pos. 3. Der anvendes en prototype ventil fra Danfoss. Ventilen er fuldt åben ved underkritisk drift. Ventilen er stadig på prototypestadiet - på senere prototyper kunne denne ventil erstattes af en mere prisbillig udgave.

På andre anlægstyper er det muligt at erstatte denne ventil med en blænde eller en konstanttryksventil, men på varmepumper kan der være meget store temperaturvariationer i tanken, hvilket giver store variationer i det optimale tryk i gaskøleren.

3.2.3.3 Receiver



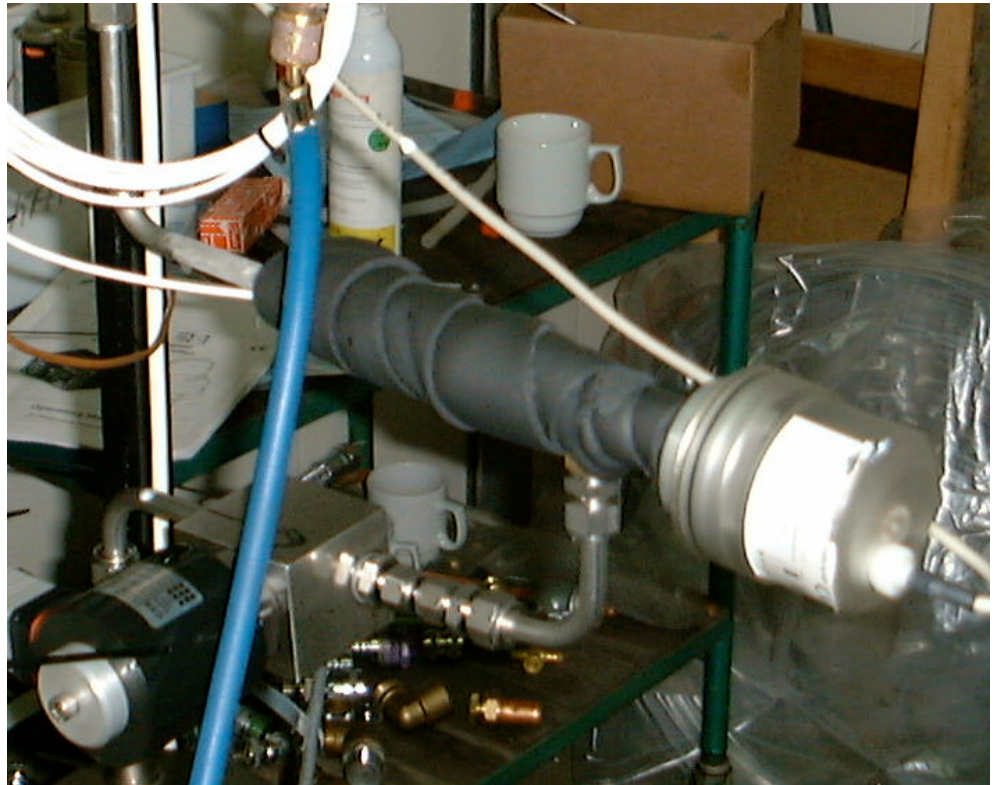
Figur 3.9: Bil lede af receiver og skueglas med fordampere synlig i baggrunden

Receiveren (pos. 4) optager de variationer i fyldningen, der opstår ved drift. Variationerne opstår ved at fordampningstemperaturen eller temperaturen ud af gaskøleren varierer. Der er specielt store variationer i det transkritiske område, hvor densiteten på CO_2 varierer meget. Mediet i receiveren vil altid befinde sig på mætningskurven. Derfor skal receiveren kunne modstå et tryk på minimum 73 bar.

Det er dog tilrådeligt at receiveren dimensioneres for et væsentlig højere tryk, da det kan forekomme i korte perioder ved f.eks. opstart eller ved indjustering. Receiveren er forsynet med sikkerhedsventil, der blæser af til sugesiden af kompressoren. For at lette arbejdet med fyldning af systemet er der lavet en sløje af skueglas, for at kunne bestemme fyldningsmængden i receiveren. Der er valgt at lave en receiver på ca. 2 l, hvilket er ca. 6 gange mere end beregnet nødvendig størrelse. Dette valg er truffet for at være sikker på at have rigelig kapacitet. Det gør også fyldningen af systemet mindre kritisk.

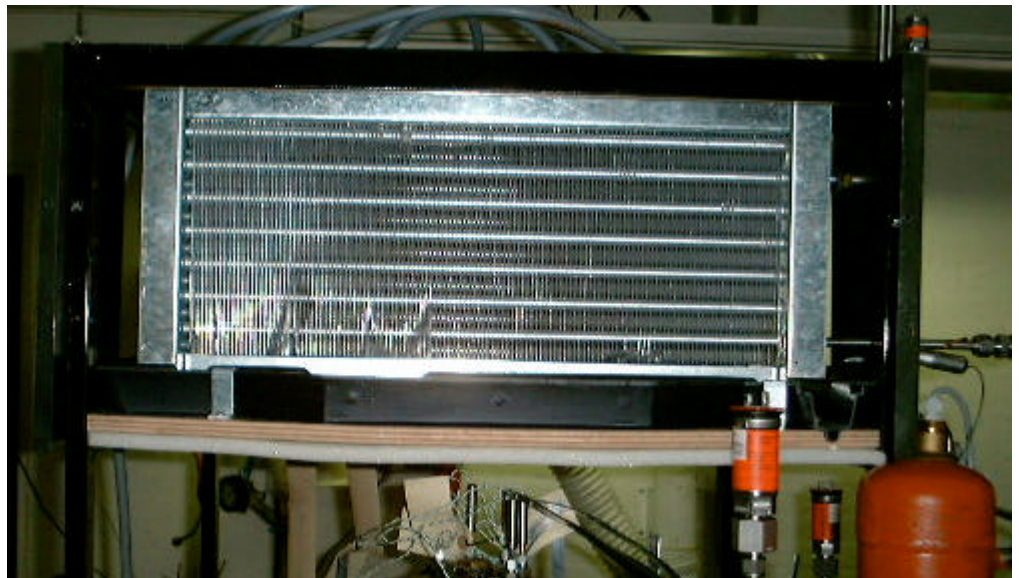
For at sikre mod væskeslag samt sikre underkøling frem til ekspansionsventilen benyttes der en intern varmeveksler pos. 5. Veksleren er fremstillet af et ekstruderet profil fra Hydro Aluminium Precision Tubing Tønder A/S.

3.2.3.4 Termoventil og fordamper



Figur 3.10: Billede af termoventil – stepmotor ventil

Fordamperen styres af termoventilen pos. 6. Der har været problemer med at få ventiler, der kan klare det høje tryk på tilgangen (>70 bar). Der har været forsøgt med forskellige typer, men der er anvendt ventil med step-motor fra Egelhof (RTC-C 1,3/1,2 med MPS 21 styring). Ventilen styrer efter en konstant overhedning ud af fordamperen. På dette punkt kunne der anvendes en mekanisk ventil, der er dimensioneret til 80 bar på indgangen. Denne ventil er ikke kommercielt tilgængeligt pt.



Figur 3.11: Billede af fordamperen set forfra

Fordamperen (pos. 7) er en standard fordamper der er trykprøvet for at sikre at den kunne modstå det højere tryk (73 bar).

De valgte fordamper er volumenmæssigt i overkanten og det ville være mere optimalt med en fordamper med mindre rør, da fyldningen derved kunne nedbringes og fordamperen dermed ville være væsentligt lettere at styre.

Til afrimning anvendes en ventil (pos. 8) der leder varmgassen fra kompressoren gennem fordamperen. Ventilen er ikke blevet anvendt selvom den er bygget på systemet. Denne ventil kan evt. udelades og der kunne benyttes naturlig afrimning (lade ventilator køre videre med stoppet kompressor – kun ved anvendelse af indeluft som varmekilde).

3.2.3.5 Samlet oversigt over hovedkomponenter

Komponentliste

Komponent betegnelse	Pos. Nr.	Anvendt komponent	Alternativ komponent
Kompressor	1	Dorin CD4.0273	Danfoss mfl.
Gaskøler	2a	Hydro MPE rør 5x1 mm ²	
Beholder	2b	Standard beholder	
HT ventil	3	Danfoss	
Receiver	4	Hjemmelavet 130 bar	
Intern varmeveksler	5	Koaksialrør hjemmelavet	
Ekspansionsventil	6	Egelhof RTC-C	
Fordamper	7	Vesttherm standard	
Afrimningsventil	8	GSR	

Udover disse komponenter er der anvendt måleudstyr til at bestemme tilstande i systemet samt ydelse på kompressor og gaskøler.

3.2.4 Opbygning af styring

Der er i projektet opbygget en prototype styring. Denne tager udgangspunkt i "normale" styringer til brugsvandsvarmepumper med de modifikationer, som nu er nødvendige a.h.t. kølemidlet.

Styringen er baseret på microcontroller. Den indeholder følgende:

- ? Udgang til drøvleventil som regulere korrekt kondenseringstryk afhængig af underkøling af kølemedie
- ? Relæ udgange for: kompressor, bypass ventil, el-patron, kedel drift og blæser med 2 trin.
- ? Indgange til måling af følgende temperaturer: højtryk, underkøling (afgang af gaskøler), overflade fordamper, vand top og vand bund.
- ? Indgang til måling af følgende tryk: kondensatortryk og fordampertryk
- ? Digitale indgange til højtrykspresostat, lavtrykspresostat og anodekontrol.
- ? Bruger panel med visning af målte værdier, samt indstilling af parametre

Styringen er forsynet med 230VAC. Det er muligt at opdatere software via PC.

Printet måler 210 *150 mm. Styringen er monteret på den eksisterende styringsplade.

Brugerpanelet måler 110*50mm. Brugerpanelet er med indikator for driftsform (varmepumpe og el-patron/kedel). Displayet er på 8*2 karakter. Brugerbetjeningen sker ved hjælp af en betjeningsknap med integreret tryk for ændring og accept af setpunkter og parameterindstillinger. Ændringer bliver gemt ved strømsvigt.

3.2.5 Styringsstrategi

Kompressor indsatsgrænser er sikret via af høj og lavtrykstransducer, der er styret via softwaren. Kompressoren har en minimum off tid på 5 minutter. Setpunkt for udkobling af højtrykket ligger 5 bar under den mekaniske sikkerhedspressostat.

Ventilen til styring af det optimale gaskølertryk i afhængighed af underkøling for at opnå optimal COP vil stå helt åben ved underkritisk drift.

Fordamperblæseren kan styres i 3 trin (off, halv og fuld hastighed). Brugen vælger et niveau for drift og et for stilstand. Afrimningen styres via registrering af overladetemperatur på fordamper og et tidsinterval. Når nedre grænse nås, stater afrimningen og fortsætter til øvre grænse er opnået, dog max 20 minutter. De næste 2 timer er afrimningsfunktionen blokeret, selvom nedre temperatur grænse er passeret.

Der kan vælges mellem luft afrimning og bypassafrimning. Der er en minimum temperaturgrænse på fordamperen. Kommer temperaturen under denne temperaturgrænse stopper varmepumpen.

Energikilder for varmtvandsproduktion kan frit vælges af bruger. Alle varmekilder kan vælges alene. Varmepumpen kan vælges sammen med enten El-patron eller kedel.

Behov for varmtvandsproduktion bestemmes ud fra de 2 temperaturer i beholderen. Hvis temperaturen i toppen er for lav starter varmepumpen. Hvis setpunktet for topføler ikke er opnået, undersøges temperaturforskellen mellem top og bund. Bliver differensen større end setpunktet starter varmepumpen. Dette sikrer en god underkøling af kølemidlet, hvilket er nødvendigt, hvis høje COP'er skal nås. Varmepumpen kører indtil temperaturdifferensen mellem top og bund er lille og vandtemperaturen er opnået.

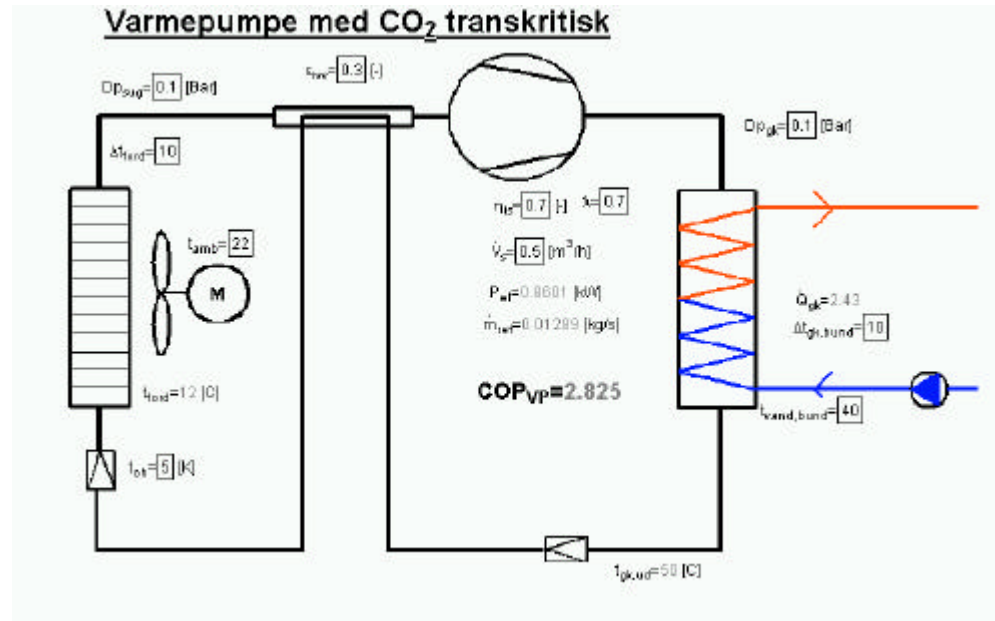
Eventuel suppleringsvarme (elpatron/kedel) bliver styret ud fra et minimumsetpunkt med en hysteres $\pm 4^{\circ}\text{C}$. Er el-patron/ kedel valgt alene styres med setpunkt. hysteres $\pm 4^{\circ}\text{C}$.

Legionellabekæmpelse aktiveres af bruger og gentages en gang hver uge. Vandtemperaturen hæves til 65°C og holdes der en time, hvorefter normal drift genoptages.

3.2.6 Teoretisk model af transkritisk brugsvandsvarmepumpe

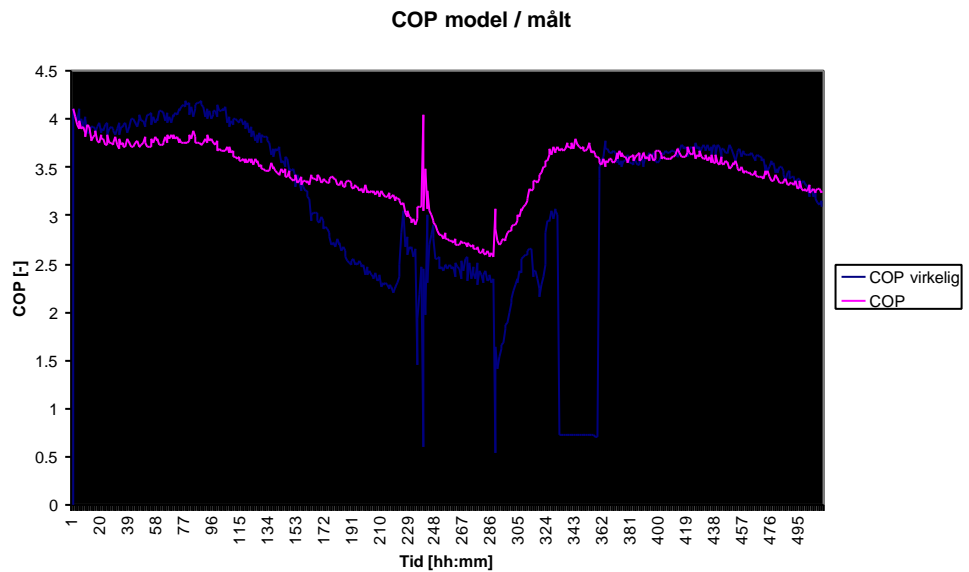
Der er i forbindelse med projektet lavet en statisk simuleringmodel af varmepumpen. Modellen kan beregne en teoretisk COP for systemet ved en given temperatur i bunden af beholderen.

Modellen bygger på en transkritisk kredsproces med intern varmeveksler. Det er dog også muligt at køre underkritisk med modellen (kold beholder). Det er muligt at ændre på kritiske parametre som f.eks. tryktab, virkningsgrader på kompressor og varmevekslere samt beholdertemperatur.



Figur 3.12: CO₂-modellen

På følgende figur vises resultaterne af beregningerne med den udviklede teoretiske model vist som en sammenligning mellem beregnede og målte værdier. Det ses, at der gennemgående er fin overensstemmelse mellem den målte COP og den beregnede.



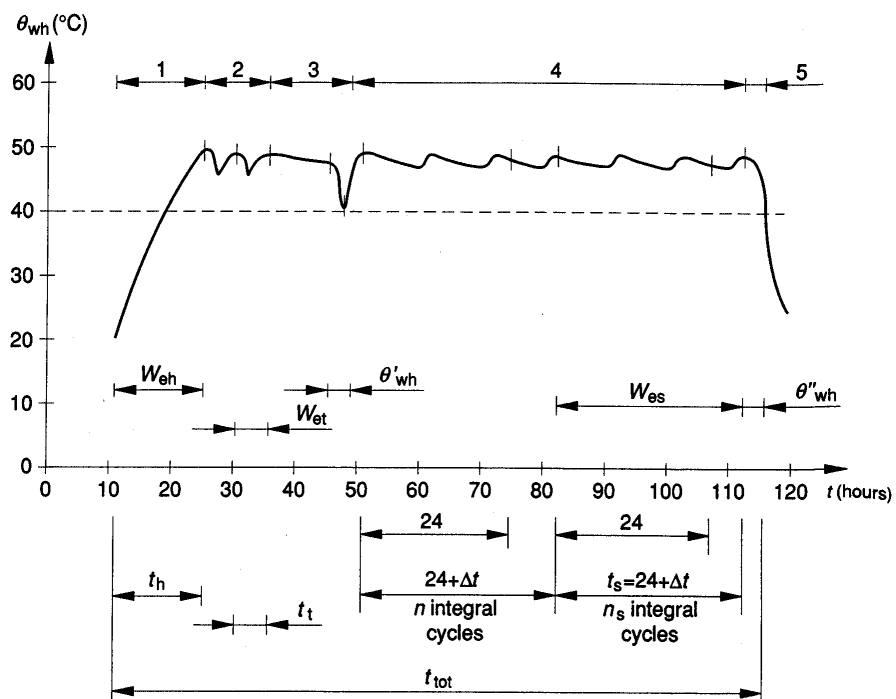
Figur 3.13: Sammenligning af de målte og de beregnede COP værdier.

Der gøres opmærksom på at den målte COP værdi er beregnet på forudsætninger beskrevet i efterfølgende afsnit.

3.3 Test af prototype

Der er gennemført dele af EN 255 test af systemet på systemet. EN 255 testen består af et opvarmningsforløb, en styrttapning samt en tomgangsmåling hvor varmepumpen køre on/off. Det er valgt kun at gennemføre opvarmningstesten, da det i første omgang er meste interessant at se hvordan den yder i de forskellige driftspunkter, og denne giver et godt billede af, hvilken ydelsen der vil kunne forventes.

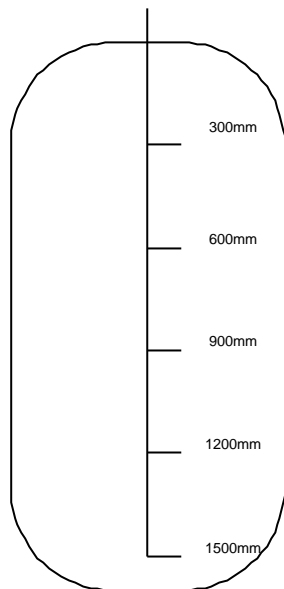
Forløbet af EN 255 testen kan ses på figur 3.14.



- 1 Heating up period
- 2 Determination of the coefficient of performance for tapping sanitary hot water
- 3 First part of the determination of the reference water temperature
- 4 Determination of standby power input
- 5 Second part of the determination of the reference water temperature and determination of the maximum quantity of usable hot water

Figur 3.14: Grundlag for EN255-test

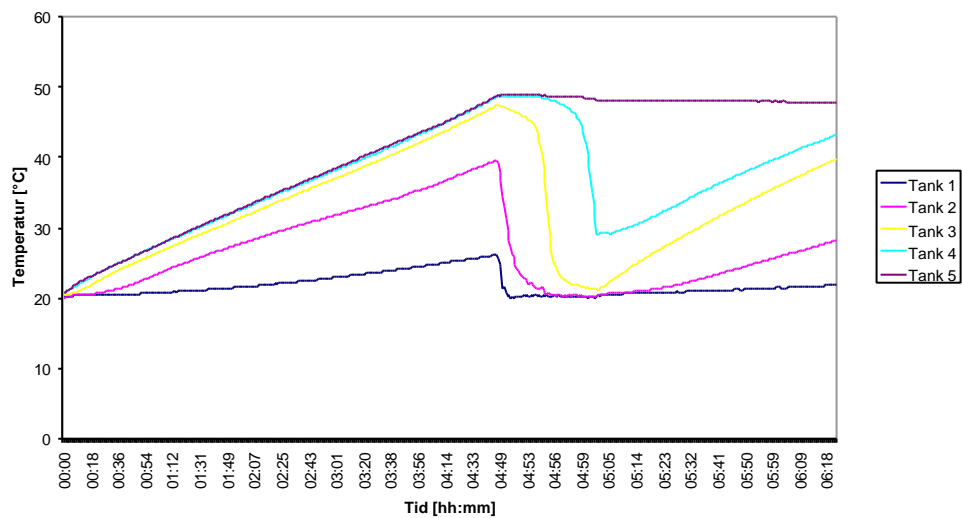
Der er valgt forskellige målepunkter på anlægget for at kunne bestemme tilstande og ydelser på systemet. Der er placeret coriolismåler for at kunne måle kølemiddelmassestrømmen i systemet. Der måles desuden tryk og temperaturer samt effektoptag på kompressoren. For at kunne se lagdelingen i beholderen, er der placeret 5 temperatur transmittere i beholderen med 300 mm afstand (se figur 3.15).



Figur 3.15 Placering af målepunkter i beholder

Testen startes med at alle komponenter inkl. beholderen er 20°C. Opvarmningsforløbet (periode 1 på figur 3.14) slutter igen når termostaten slukker varmepumpen.

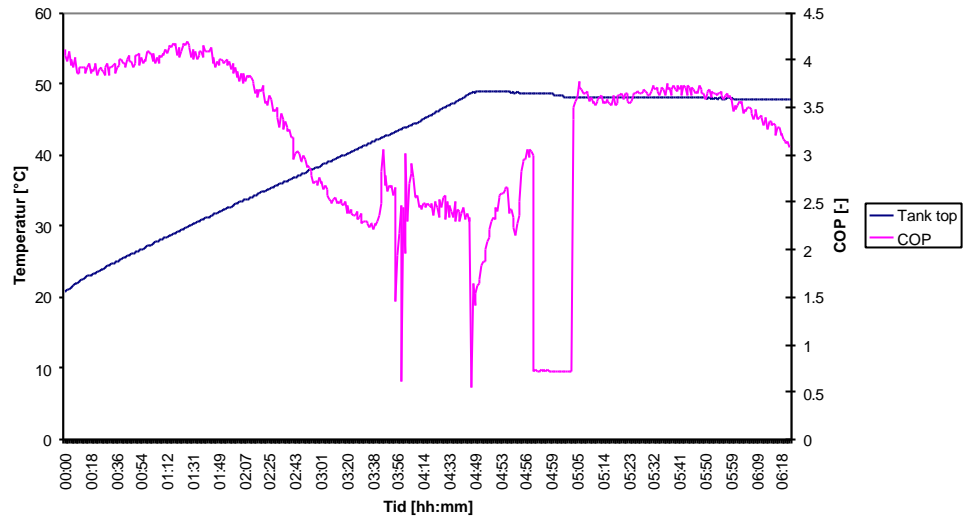
Tanktemperatur som funktion af tiden



Figur 3.16: Testresultater - tanktemperaturer

Efter ca. 4 timer og 50 minutter udføres styrttappet på systemet (samtidig med at termostaten slukker varmepumpen). Opvarmningstiden er kortere end for konventionelle varmepumper, hvilket skyldes at kompressoren er meget større end normalt. Dette bevirker også at effektoptaget er væsentlig større.

COP og Temperatur som funktion tiden



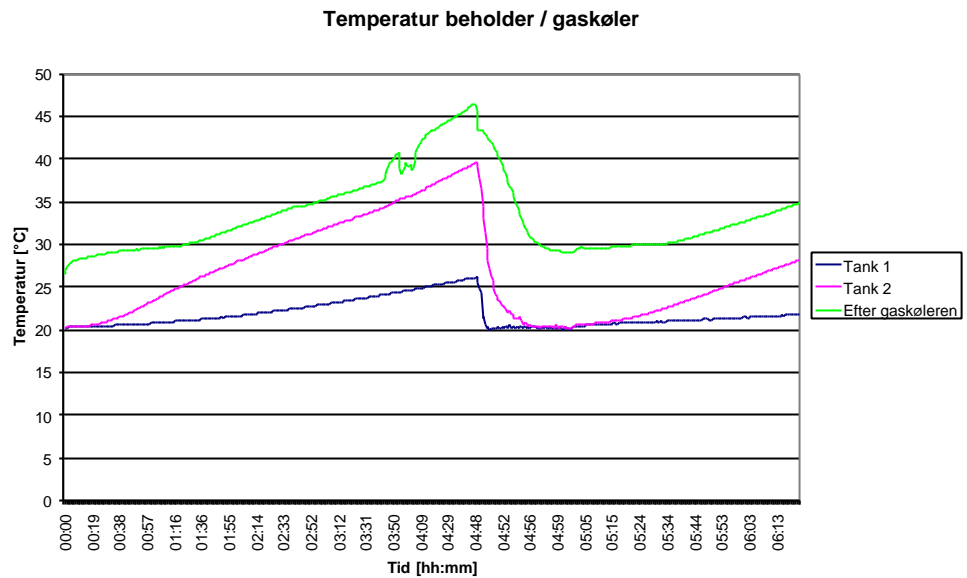
Figur 3.17: Testresultater – COP og temperaturer i tankens top

For at give et mere rigtigt billede af COP værdien, er det teoretiske energiforbrug beregnet ud fra målingerne af tilstanden ved sugesporten og afgangsporten på kompressoren samt den målte massestrøm (figur 3.17). Det vurderes at denne metode giver det mest korrekte billede af systemets effektivitet. Til sammenligning med R134a brugsvandsvarmepumper, kan følgende resultat fra EN255-måling af Vesttherms brugsvandsvarmepumpe betragtes:

Referencetemperatur, brugsvand	55,1°C
Virkningsgrad for brugsvandstap	2,75 (-)
Maksimal mængde af brugsvand i ét tap	427 liter
Opvarmningstid	11:14 (timer:min)
Tilført energi til opvarmning	5,58 kWh
Effektoptagelse ved tomgang	51,2 W

Figur 3.18: Resultatskema EN255-prøvning af Vesttherm VT105

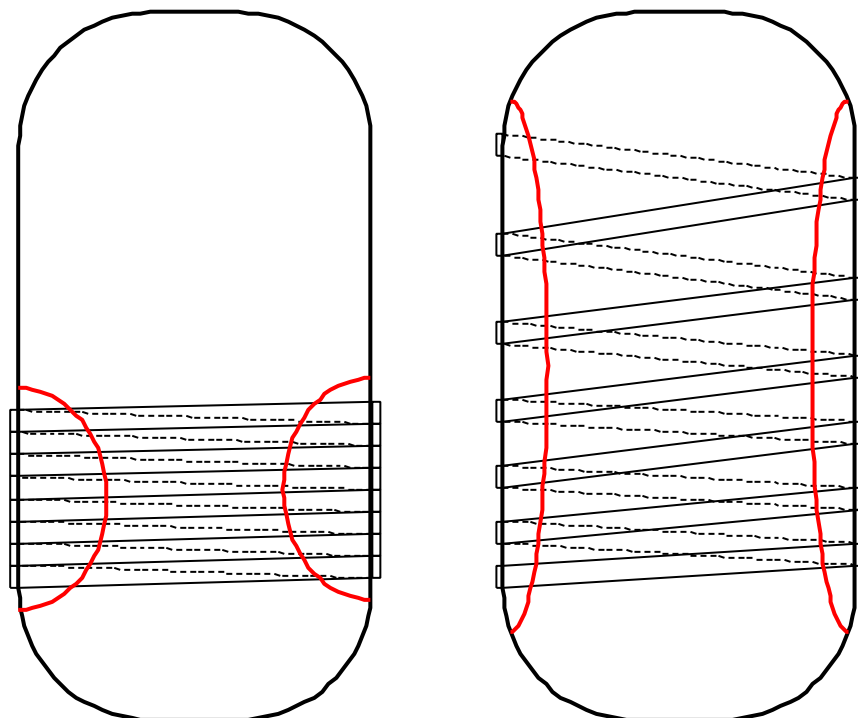
Af ovenstående ses, at opvarmningstiden er mere end halveret, og at effektiviteten gennemgående er væsentlig højere med CO₂ varmepumpen. Det skal dog understreges, at driftsbetingelserne i de to tilfælde ikke er ens, hvilket gør sammenligningen problematisk. Men der er ingen tvivl om tendensen !



Figur 3.19: Testresultater –temperaturer ud af gaskøler og i tankens top

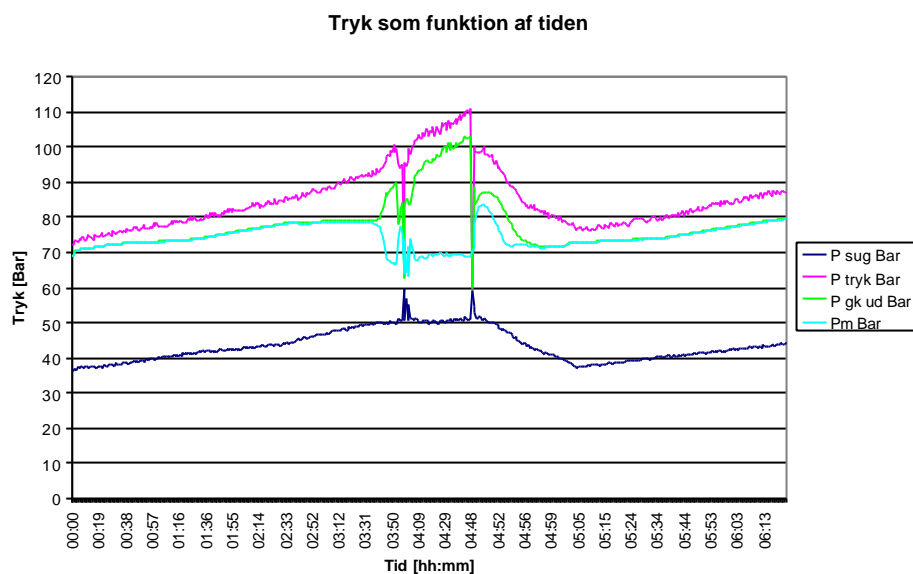
Af figur 3.19 ses det at der er sammenhæng mellem temperaturen ud af gaskøleren og temperaturen 1200mm fra toppen af beholderen (tank 2). Temperaturdifferensen mellem tank 2 og gaskølerafgangen er ca. 4-8 K.

Hvis denne temperaturdifferens kan nedbringes, vil det give en væsentlig bedre COP for systemet. Denne forbedring kan opnås ved at vikke beholderen anderledes end på prototypen. På prototypen er hele viklingen lagt på den nederste 1/3 del af beholderen, hvilket giver mulighed for at sikre lagdelingen, men det giver desværre også en høj varmeflux gennem beholdervæggen.



Figur 3.20: Placering af gaskøler på beholder – venstre del viser hvorledes gaskøleren aktuelt er placeret, mens højre del viser, hvorledes den burde være placeret.

Den høje flux gennem beholdervæggen giver anledning til at der dannes et grænselag, som virker som en isolerende ”pude” for gaskøleren. For at nedsætte tykkelsen på grænselaget, kan beholderen vikles således at der er konstant flux gennem hele beholdervæggen. Som en ekstra gevinst vil det også være muligt at udnytte den varme trykgas til at lave ekstra varmt vand i toppen af beholderen.



Figur 3.21: Tryk i kølemiddel system

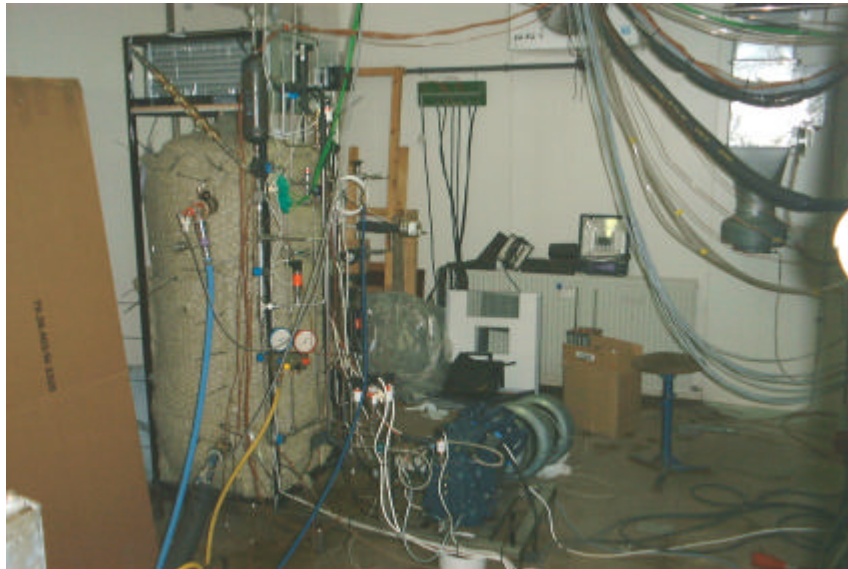
Figur 3.21 viser trykkene på 4 udvalgte steder i systemet. Efter ca. 3 timer og 40 minutter begynder trykreguleringen af højtrykket at træde i kraft. Grunden til at det ikke træder i kraft ved 73 bar som det teoretisk skulle gøre er at den anvendte algoritme for styring af højtrykket ikke er gyldig og anvendelig i dette område.

Det ses også at tryktabet i gaskøleren er op til 10 bar hvilket burde kunne reduceres betragteligt hvilket ville medføre højere COP. Generelt er der tale om, at systemet skal optimeres til den valgte kompressor ved at lave flere parallelle løb eller bruge en kompressor med mindre ydelse (hvilket også ønskes af andre grunde).

Udover EN 255 testen er der udført en del testarbejde for at på prototypen til at fungere optimalt. Der har specielt været lavet meget arbejde omkring fyldningsbestemmelse af systemet. Der har vist sig at være meget vanskeligt at fylde denne type systemer, da systemet i første omgang ikke har været forsynet med skueglas i receiveren.

Fyldningsbestemmelsen har desuden været besværliggjort af en defekt termoventil undervejs.

På figur 3.22 ses prototypen opstillet i klimakammer på Teknologisk Institut i Århus.



Figur 3.22: Prototype med måleudstyr monteret.

3.4 Endeligt koncept

Det i denne rapport beskrevne projekt har haft det mål at udvikle en varmepumpe, der efter projektafslutningen kunne videreudvikles og produktmodnes. Det resterende arbejde er naturligvis betinget af, at de erfaringer, der er gjort i projektet, udnyttes.

Det er derfor i det følgende forsøgt at give en kort oversigt over de forhold, som for næste generation af denne varmepumpe, bør tages til nærmere overvejelse.

Kompressor:

Der bør vælges en hermetisk kompressor med den korrekte ydelse.

Gaskøler:

Der skal klart stiles efter et mindre tryktab. Dette kan opnås ved at vælge rør med større hul igennem, eller alternativt flere løb.

Styring/HT ventil:

Reguleringen af højtrykket bør foretages ud fra en anden algoritme end den anvendte – og der bør eventuelt foretages en justering efter testresultaterne.

Receiver:

Der bør klart vælges en mindre receiver både af hensyn til fyldningen, men også af hensyn til prisen for anlægget – en beholder til 80 bar er relativt dyr. Den rigtige størrelse kan eventuelt bestemmes ved test.

Ekspansionsventil:

Omkring ekspansionsventilen bør der vælges en mekanisk type, der er væsentligt mere prisbillig end den valgte.

Fordamper:

Som fordamper i denne type anlæg, bør vælges en model med væsentligt mindre rørdimensioner, primært af fyldningshensyn.

4 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 4th 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/).

5 English Summary

The present report describes design, construction and test of a prototype heat pump with CO₂ as refrigerant. The project is phase 2 of a project commenced in 2000 with the title "CO₂ som kølemiddel i varmepumper" ("CO₂ as refrigerant in heat pumps"). In phase 1, it was demonstrated that components for transcritical CO₂ processes are commercially available today. There is however not a wide range of components, but as it appears from the present report, it is after all possible to design, construct and test a prototype system which lives up to the expectations of a CO₂ heat pump system.

The constructed heat pump of the project is a sanitary water heat pump designed for heating of water for sanitary use. Heat pumps of this type typically contain HFC-134a, which is a so-called greenhouse gas. Due to pressure from authorities and certain customer groups, the industry has focused on finding alternatives to the HFCs. The most obvious alternative is without doubt CO₂, which has excellent properties as refrigerant in heat pumps and sanitary water heat pumps in particular, where the requirement for high temperatures is available.

The project has demonstrated that certain components are difficult to obtain for transcritical CO₂ systems, especially small compressors for sanitary water heat pumps have turned out to be practically impossible to obtain. For that reason, a semihermetic piston compressor has been used in the project, which has a considerably higher performance than required. The compressor (i.e. the motor) has thus been equipped with a frequency converter, which makes it possible to reduce the performance of the compressor. But in spite of this, the compressor performance is still somewhat higher than desirable and certain corrections have been made in the analysis of measurement data.

Other components, which have been difficult to obtain, are the valves. Two valves have been used in the project, i.e. one valve for regulating the pressure in the gas cooler (high-pressure valve) and one for throttling. Both of the used valves are not at the present time considered as being commercially competitive.

In addition, a new control has been developed in the project for sanitary heat pumps with CO₂ as refrigerant. The control contains i.a. optimum control of the gas cooler pressure (the high pressure) which is necessary if an optimum regulation of the refrigerant system has to be achieved and if the expected efficiency has to be achieved.

In the project, a number of tests have been carried out of the constructed prototype, i.e. tests concerning refrigerant charge, valves, etc. and naturally part of the EN255-3 test. EN255-3 is the test standard used when the performance and efficiency of the sanitary heat pumps have to be determined.

All the tests demonstrate that if conditions (like e.g. the too large compressor) are compensated for, CO₂ is as expected better than R134a – it should however be noticed that only part of the EN255-3 test has been carried out.

Overordnede krav til brugsvands varmepumpe

CO₂ varmepumpen udnytter energien i luften ved temperaturer i området – 20 til +35°C til opvarmning af brugsvand. Den skal kunne dække det årlige forbrug af varmt vand til en familie på fire personer og kan eventuelt kombineres med rumventilation. Varmepumpen skal kunne anvendes hvor der er behov for brugsvand, og hvor der mulighed for tilslutning via vandledning (max. Arbejdstryk 10 bar).

Primære & sekundære krav:

Varmepumpen skal kunne opfylde det normale brugsvandsbehov for en familie på fire personer med en temperatur af brugsvandet på 55°C. Som forsyningsikkerhed anvendes en suppleringskilde samt en afrimningsfunktion. Desuden skal varmepumpen opfylde gældende standarder.

For at undgå legionella bakterier skal brugsvandet i beholderen opvarmes til minimum 65 °C, mindst én gang om ugen.

Varmepumpens primære opgave er brugsvandsopvarmning. Evt. overskudsvarme skal kunne anvendes til rumopvarmning.

Varmepumpen skal kunne installeres i private hjem, og dimensionen bør derfor ikke overstige 1725 · 600 · 665 mm (H · B · D). Derudover skal varmepumpen være forsynet med justerbare fødder, stikfærdig eltilslutning samt simpel og monteringsvenlig VVS og luft tilslutning.

Varmepumpen skal have et minimum af vedligehold/service, dvs. rengøring af kondens afløb, fordamper, og luftkanaler (én gang om året). Beholderen korrosionsbeskyttes af en magnesiumsanode, som skal udskiftes når signal herom gives på varmepumpens betjeningspanel.

Varmepumpen's kabinet skal være modstandsdygtig overfor korrosion, og kunne leveres i forskellige farver, med ridsefaste og rengøringsvenlige overflader.

Varmepumpen skal for brugeren være enkel at betjene, dvs. få knapper og kun oplyse brugeren om nødvendig driftinformation (tænd/sluk, temp. brugsvand, fejl mm.).

Emballeringen skal kunne beskytte varmepumpen i langtidstransporter med omlæsninger (eks. fra Danmark til Spanien med lastbil). Derudover skal emballeringen være fremstillet i genbrugsvenligt materiale (recycling) og være forholdsvis nemt at anvende.

Salgs & markedsforhold:

Varmepumpen skal kunne leveres med forskelligt design og kunne tilpasses kundeønsker mht. logo, farver mm. Prisen skal ligge på samme niveau som tilsvarende varmepumpe med R134a.

Varmepumpen er hovedsagelig en eksportartikel, som især sælges til Tyskland, Holland, Østrig Schweiz og Sverige. Da Danmark ikke har tradition for anvendelsen af varmepumper, som kun opstilles i område uden kollektiv varmeforsyning, vil hjemmemarkedet kun udgøre en mindre del.

Der skal kun udvikles én varmepumpe grundmodel, med en varmeydelse på ca. 2 kW. Dog kan det på længere sigt være muligt at der udvides med en model med større effekt.

Der er ingen elektriske varianter, da varmepumpen kun udføres som 230 V/ 50 Hz.

Varmepumpen skal kunne leveres med ekstra varmeveksler, til sammenkobling med solvarmeanlæg.

Levetiden må forventes at ligge på 12-15 år, for at retfærdiggøre investeringen for brugeren.

Varmepumpen skal kunne forsynes med CE-mærkning, samt typeskilt og nødvendige advarselsskilte.

Test & typegodkendelser. Der skal forelægges en systemgodkendelse for varmepumpen samt en CCA godkendelse, således at godkendelsen for anvendelse i resten af Europa, evt. med tillægsgodkendelser.