



TEKNOLOGISK
INSTITUT

CO₂-SYSTEMER Designmanual

Januar 2007

Thomas Lund, Teknologisk Institut

Indholdsfortegnelse

1	Baggrund.....	3
2	CO ₂ 's egenskaber.....	4
2.1	Fysiske egenskaber	4
2.2	Miljømæssige aspekter	6
2.3	Sundheds- og sikkerhedsmæssige aspekter	7
3	Generelt systemdesign – grænser og muligheder	9
3.1	Tryk.....	9
3.2	Systemtyper	10
3.3	Afrimning	12
3.4	Kompressorstørrelse og -effektivitet	15
3.5	Tryktab og størrelse af rørledninger	15
3.6	Fordampere	17
3.7	Kaskadekølere.....	18
3.8	Bestemmelse af kaskadetemperaturen	18
3.9	Stilstandskøling.....	19
3.10	Strømodfald og nødstop.....	19
3.11	Pumper	20
3.12	Forurening med R717	21
3.13	Forurening med vand.....	22
3.14	Stigning i sugetryk ved nedkøling eller batchprocesser	22

1 Baggrund

CO₂ er ikke et nyt kølemiddel. Faktisk er CO₂ et af de oprindelige kølemidler, der blev brugt i stor udstrækning fra slutningen af det 19. århundrede. Omkring 2. verdenskrig fremkom de kendte CFC-kølemidler. Disse blev markedsført som ”sikkerhedskølemidler”, hvilket primært refererede til CO₂'s høje tryk og de andre kølemidlers sundhedsmæssige problemer.

Med fremkomsten af de syntetiske kølemidler omkring 2. verdenskrig blev CO₂ relativt hurtigt udfaset til fordel for disse og ammoniak, og der blev stort set ikke bygget nogen anlæg med CO₂ indtil 1990'erne. Det var primært trykket, der gjorde, at de andre kølemidler blev foretrukket, mens COP og miljøhensyn ikke var på dagsordenen på det tidspunkt.

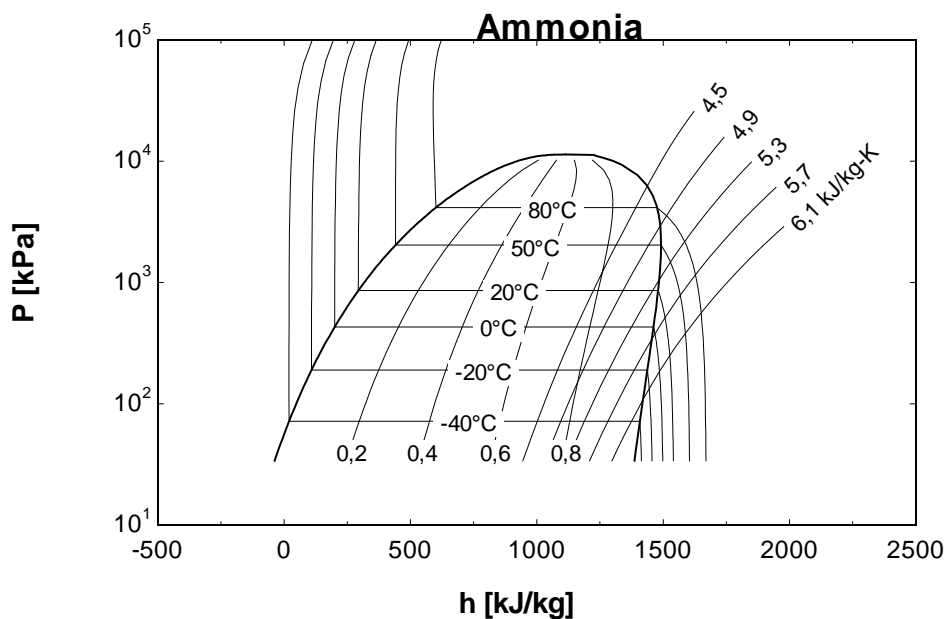
Da det blev klart, at de fluorholdige CFC-kølemidler havde en ødelæggende effekt på ozonlaget, og at de afløsende HCFC- og HFC-kølemidler bidrog til den globale opvarmning, var der igen interesse for CO₂ som kølemiddel. Samtidig indføres der stadig striksere regler for mængden af ammoniak i anlæggene, hvilket yderligere bidrager til at bringe CO₂ frem i forreste linie.

2 CO₂'s egenskaber

Sammenlignet med andre kølemidler skiller CO₂ sig ud på en række punkter, som betyder, at man skal bruge CO₂ lidt anderledes, end man er vant til. Det er nødvendigt på ny at overveje, hvordan man laver køleanlæg, men på trods af dette er gevinsterne ved CO₂ ikke til at komme udenom.

2.1 Fysiske egenskaber

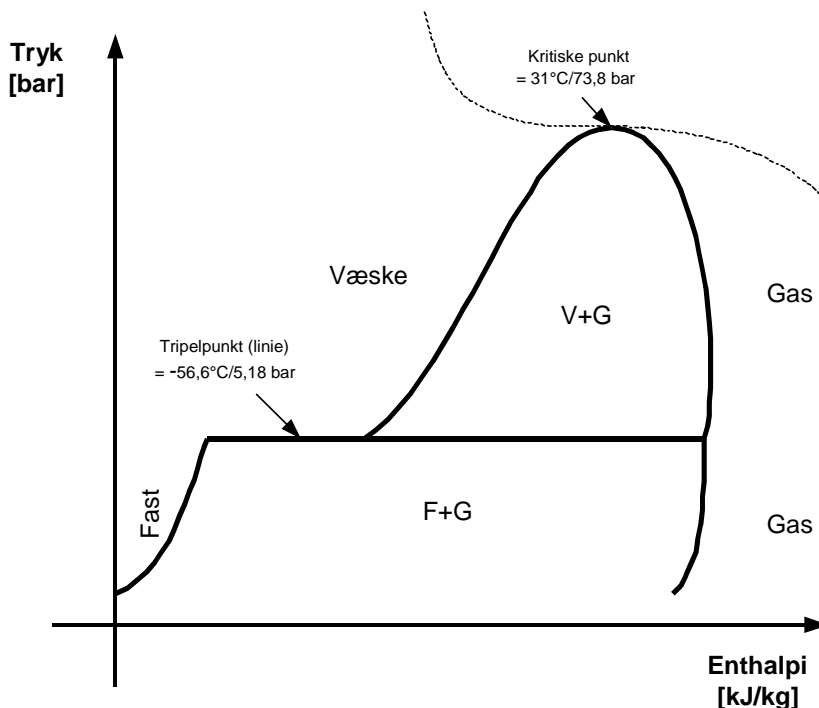
Som industriel køletekniker er man vant til at arbejde med et kølemiddels log(P)-H diagram som nedenfor. Inden for normale driftskonditioner vil man ikke ramme nogen grænser, der gør, at man skal ændre praksis. Toppen af "klokken" ligger langt over, hvad der normalt benyttes til kondensering, og i bunden af klokken bliver fordampningstemperaturen begrænset af undertryk i systemet - eller hvis man absolut vil længere ned - en meget dårlig virkningsgrad/effekt.



Det forholder sig imidlertid anderledes med CO₂. Det er ikke fordi CO₂ opfører sig principielt anderledes end andre stoffer, men de tryk/temperaturer, hvor grænserne nås for CO₂, er inden for de områder, der normalt opereres med i køleanlæg.

Toppunktet af klokken kaldes det kritiske punkt. Ved tryk og temperatur højere end det kritiske tryk kan kondensering og fordampning ikke længere finde sted. Der findes simpelt hen ikke en hård overgang mellem gas og væske. Området kaldes det superkritiske (overkritiske) område. I stedet for et faseskift vil man se en glidende overgang fra et fluid med gasegenskaber (helt til højre i diagrammet) til et fluid med væskeegenskaber (helt til venstre). Det er med fuldt overlæg, at der ikke bruges benævnelsen gas og væske, idet der netop ikke er en veldefineret grænse. I stedet bruges udtrykket "superkritisk fluid" eller "superkritisk gas".

Tilsvarende findes der i den nedre del af klokken en grænse, der sjældent nås med traditionelle kølemidler. Denne grænse kaldes tripelpunktet, idet alle faser (gas/væske/fast) kan eksistere sammen i dette punkt (tryk/temperatur). I et log(P)-H diagram er punktet dog ikke et punkt, men en linie, der udtrykker smeltevarmen for den faste fase og fordampningsvarmen for den flydende fase. Under tripelpunkttrykket kan stoffet ikke optræde på væskeform, men kun som fast stof og gas. Faseovergang i dette område sker ved, at det faste stof omdannes direkte til gas – dette kaldes sublimation.



Som nævnt er disse fænomener gældende for alle de stoffer, vi sædvanligvis benytter som kølemidler, men nedenstående tabel viser, hvorfor det netop er relevant at tale om disse i forbindelse med CO₂-køleteknik.

	Ttrip / °C	Ptrip / bara	Tcrit / °C	Pcrit / bara
R22	-157,4	0,000006	96,2	49,9
R134a	-103,3	0,004	101,1	40,6
R717	-77,6	0,006	132,3	113,3
CO₂ (R744)	-56,6	5,2	31,1	73,8

Det ses tydeligt, at for de sædvanlige kølemidler ligger tripelpunktet umådeligt lavt i tryk og (mætnings) temperatur. Under normal drift vil man aldrig komme i nærheden af disse tryk. CO₂ derimod har et tripelpunkttryk, som det er muligt at komme ned på.

På samme måde kan man se, at for de sædvanlige kølemidler er det kritiske punkt - om end ikke uopnåeligt - så væsentlig uden for normal drift. Igen er CO₂ anderledes, idet 31,1°C er en ganske opnåelig kondenseringstemperatur.

CO₂ er et højtrykskølemiddel og dette, koblet sammen med ovenstående problemer mht. tripelpunkt og kritiskpunkt, giver anledning til visse specielle overvejelser, når man designer køleanlæg. Selvom det er nødvendigt med nogen ekstra omtanke og visse "krumspring", så er de gevinster, der er ved at benytte CO₂ som kølemiddel, tilstrækkelig store til at opveje disse besværligheder. Hvordan og hvorfor vil blive behandlet i kapitlet "Almindelige CO₂-systemtyper".

2.2 Miljømæssige aspekter

CO₂ omtales ofte som en drivhusgas, der bidrager til den globale opvarmning. Dette er i og for sig korrekt, men det er når, der snakkes om CO₂-produktion. CO₂ bliver ikke produceret til brug i køleanlæg, men i stedet er det et biprodukt fra mange processer. Den største bidragsyder er afbrænding af fossile brændstoffer, men også gæringsprocesser (specielt på bryggerier) og forskellige kemiske processer (bl.a. fremstilling af ammoniak) giver anledning til produktion af CO₂.

Noget af denne CO₂ opsamles og renses, før den bruges til en række formål, hvoraf CO₂-køleanlæg er ét. En stor del af den producerede CO₂ slippes ud i atmosfæren.

Generelt i forbindelse med kølemidler og miljø bruges ODP- og GWP-faktorerne. ODP (Ozone Depletion Potential) udtrykker den skadelige virkning på ozonlaget og GWP (Global Warming Potential) udtrykker kølemidlets effekt på den globale opvarmning. Nedenfor ses en tabel over ODP og GWP for forskellige kendte kølemidler. R11 er defineret som 1 ODP, og CO₂ er defineret som 1 GWP.

	ODP	GWP
R11	1	4000
R22	0,05	1700
R134a	0	1300
R404A	0	4540
R717	0	0
CO₂ (R744)	0	1

Det ses tydeligt, at der først var et skift væk fra kølemidler med høj ODP, og i disse år oplever vi et forøget pres på kølemidler med et højt GWP. Desuden er R717 under pres på grund af de sundhedsmæssige aspekter ved et stort udslip.

Nogle vil argumentere for, at CO₂'s GWP-værdi på 1 burde være 0, idet den CO₂, der ved et udslip bliver sluppet ud i atmosfæren, kommer fra en proces, hvor CO₂'en alligevel var blevet sluppet ud i atmosfæren, hvis den ikke var blevet udvundet. Man kan argumentere for og imod, men faktum er, at værdien er sat til 1.

Når nu ODP og GWP er nævnt, er det også på sin plads at nævne TEWI. TEWI står for Total Equivalent Warming Impact, altså det totale bidrag til den globale opvarmning. TEWI regnes ud fra en del forskellige faktorer, som ikke vil blive gennemgået her, men den korte version er, at den udtrykker både direkte bidrag (læk, bortskaffelse ved skrotning af anlæg etc.) og indirekte bidrag (kraftforbrug, etc.), hvorved ODP og GWP kombineres med effektivitet (COP), fyldning etc. Bemærk, at TEWI afhænger af det enkelte system, hvorfor det ikke muligt at opstille en tabel med TEWI-værdier, medmindre der er tale om et specifikt system.

Alt i alt er CO₂ et af de bedste kølemidler set fra et miljømæssigt synspunkt. Ammoniak, propan, ethan og ethylene – alle naturlige kølemidler – er i samme klasse som CO₂ mht. miljø, men disse har alle deres egne problemer. Ammoniak er giftigt, og de sidste tre er eksplosive, hvilket er svært – og dyrt – at håndtere i større skala som i et industrielt anlæg.

2.3 Sundheds- og sikkerhedsmæssige aspekter

Når der snakkes om sundhedsmæssige aspekter mht. kølemidler, er det vigtigt at gøre sig klart, at alle stoffer på denne jord kan slå ihjel, hvis de optræder i de forkerte mængder. Når de sikkerhedsmæssige aspekter af CO₂ gennemgås, skal det derfor ses i forhold til andre kølemidlers egenskaber. Selvom for meget CO₂ kan slå en person ihjel, så er CO₂ et af de mest sikre kølemidler overhovedet.

Det er velkendt, at CO₂ er en naturlig del af den luft, vi indånder, idet atmosfærisk luft normalt indeholder ca. 0,037% (370 ppm) CO₂. Kroppen bruger CO₂ til at regulere blodets pH-værdi gennem en balance mellem den luft, der er i lungerne – typisk med 4-5% CO₂ - og blodet. I den forbindelse bruges den relativt CO₂-fattige indåndingsluft til at regulere CO₂ indholdet i luften i lungerne. I større koncentrationer har CO₂ en effekt på kroppen og kan være dræbende, idet kroppen ikke længere kan regulere koncentrationen i lungerne gennem CO₂-fattig indåndingsluft. Der findes flere undersøgelser, der giver forskellige værdier for den koncentration, der er dødbringende. Ofte bruges 6% som en absolut øvre grænse for sikker ophold, selvom den er temmelig konservativ.

370 ppm	Normal koncentration i atmosfæren
5.000 ppm (0.5%)	Betragtes normalt som den øvre grænse for ophold uden bivirkninger
20.000 ppm (2%)	Kortere varighed giver ingen problemer
30.000 ppm (3%)	Ubehag, svært at trække vejret, forhøjet puls, hovedpine, svimmelhed, desorientering
100.000 ppm (10%)	Bevidstløshed og død

På gasform er CO₂ farveløst og uden smag eller lugt, hvilket gør den svær at opdage. Man kan dog føle en høj CO₂-koncentration som en prikken i slimhinderne i øjne, næse og mund, hvilket er noget man skal lære at genkende. Dette er det farligste aspekt ved CO₂, idet man kan blive udsat for høje koncentrationer uden at bemærke det.

Det kan ikke understreges nok, at CO₂-detektorer er vigtige og nødvendige for den personlige sikkerhed.

Densiteten af CO₂-gas ved 1 atmosfære og 20°C er ca. 1.6 kg/m³, og derfor er den meget højere end almindelig luft. CO₂ vil derfor koncentreres ved gulvet. Dette betyder, at hvis man falder om pga. for stor CO₂-koncentration i hovedhøjde, så lander man i en endnu højere koncentration ved gulvet, hvilket kan være dræbende.

I mange industrielle bygninger vil CO₂ krybe langs gulvet og eventuelt ud gennem porte og døre, hvilket kan holde koncentrationen nede under alarmniveau, men i de tilfælde, hvor bygningen har en kælder, der måske sjældent benyttes, kan det have alvorlige konsekvenser. CO₂'en vil krybe langs gulvet, ned ad trappen og langsomt fylde kælderen med CO₂, hvilket vil betyde døden for en person, der går i kælderen. Selv et ganske lille læk kan over tilstrækkelig lang tid fylde en kælder.

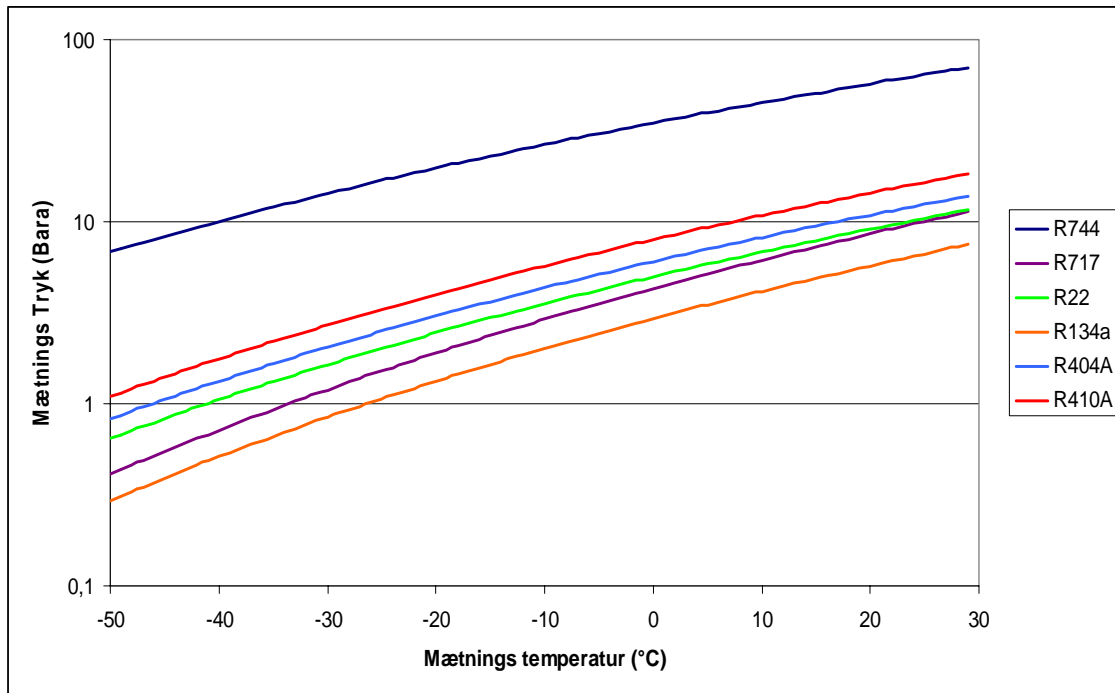
Der skal altid installeres CO₂-alarmer i kældre. CO₂-detektorer skal altid monteres lavt.

Den gode nyhed er, at personer, der har været udsat for store koncentrationer af CO₂, hurtigt kommer sig i frisk luft uden nogen bivirkninger.

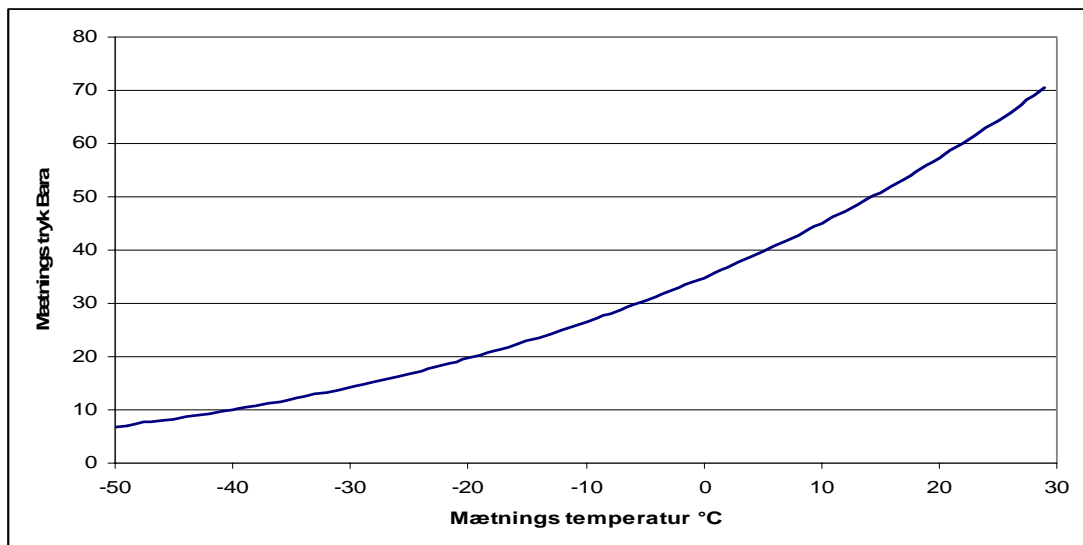
3 Generelt systemdesign – grænser og muligheder

3.1 Tryk

Mest almindelig kendt om CO₂ er at det er et højtryksskølemiddel, hvilket fremgår af nedenstående graf.



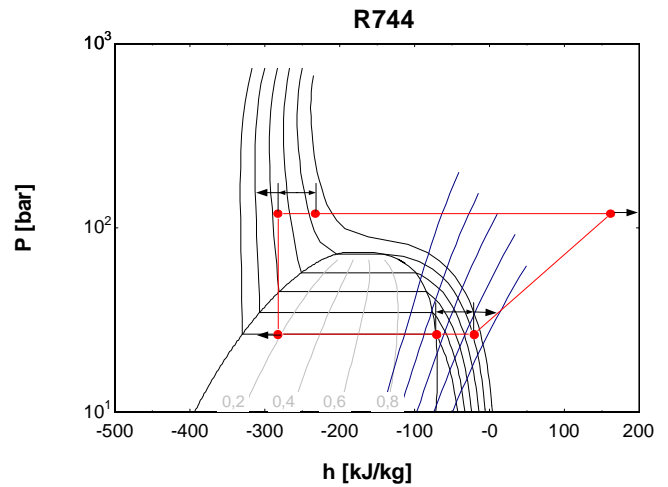
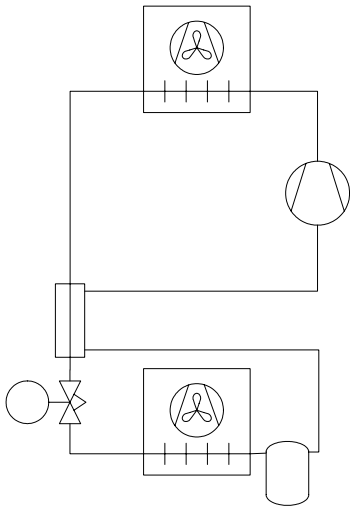
Selv R410A, der er kendt som et højtryksskølemiddel, nærmer sig ikke de tryk, der forefindes i et CO₂-system. Hvis man ser på nedenstående mætningskurve for CO₂, er det tydeligt, at der skal noget specielt til for at bruge CO₂. Kondensering mod udeluft eller søvand er ikke muligt (selv med danske forhold kun korte perioder hver år) inden for trykgrænserne for ”normale” køleanlæg – og det er i den forbindelse ligegyldigt, om man definerer 25 bar (abs) eller 40 bar (abs) som normalt.



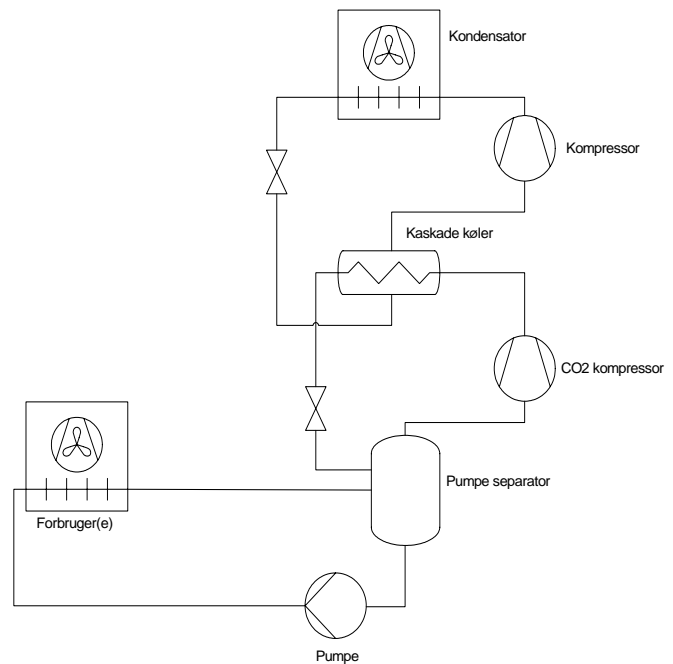
3.2 Systemtyper

Der er umiddelbart tre forskellige løsninger på dette problem.

1. **Transkritisk system.** Det transkritiske system kører typisk med 90-100 bar(abs) på højtrykssiden, hvor CO₂ ikke kondenserer, men i stedet bliver kølet som et transkritisk fluid, inden den flashes ned til fordampetryk. Det transkritiske princip er meget almindeligt i meget små anlæg såsom airconditionanlæg i biler, huse samt i køleskabe. Desuden er det ved at vinde indpas i kommercielle systemer som f.eks. supermarkeder. Dette er muligt, da de (relativt) små kapaciteter giver små komponentstørrelser (rør), der er egnet til meget høje tryk. Til industrielle formål er transkritiske anlæg ikke umiddelbart tiltrækkende. Udover at komponenter i industrielle størrelser mangler, eller måske skal findes hos leverandører af udstyr til den kemiske industri (= meget højere pris), så er et meget stort volumen under disse tryk ensbetydende med et meget højt krav fra myndighederne, hvilket også øger prisen. Transkritiske systemer til industriel brug er i dag under udvikling, men det må siges, at teknologien endnu ikke er almindelig tilgængelig, så denne manual vil ikke komme nærmere ind på transkritiske systemer.

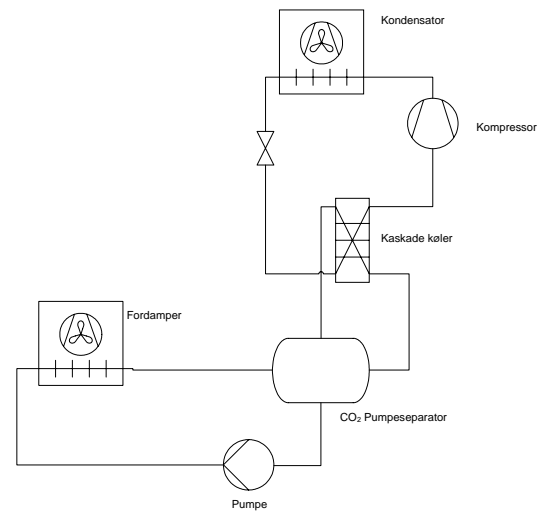


2. **Kaskadesystem.** I et kaskadeanlæg kondenseres CO_2 ved en forholdsvis lav temperatur, og kondensatoren køles af en anden kølekreds. Man har derfor to kølekredse, hvor den ene afleverer effekt til den næste – i kaskade. På denne måde kan trykket i CO_2 -kredsen holdes nede på et niveau, hvor almindeligt tilgængelige komponenter kan bruges. Bagsiden er naturligvis, at man får et mere komplekst system. Denne kompleksitet kommer dog ikke til udtryk i prisen, idet de mindre komponenter kompenserer for dette, specielt for større anlæg. Generelt kan det siges, at jo større et system er, jo mere attraktivt er CO_2 -kaskadeløsningen, og omvendt vil der så være en nedre grænse for, hvornår et kaskadeanlæg bliver økonomisk rentabelt.



3. **Indirekte system.** I det indirekte system pumpes CO₂-væske ud til forbrugerne, hvor det fordampes. I stedet for at komprimere gassen inden kondensation, så kondenseres der ved samme tryk, som der fordampes. Umiddelbart er dette en let måde at benytte CO₂ på, men ud fra et effektivitetssynspunkt er det ikke meget bedre end et almindeligt brinesystem. Dette system var meget brugt, da der var yderst begrænset udbud af CO₂-komponenter, specielt kompressorer - men i dag er andre løsninger at foretrække.

Effektivitetsmæssigt er dette system en smule bedre end et brinesystem. Kompressoren skal fordampe et stykke under den fordampningstemperatur, man har i fordamperne, og dette giver et tab i effektivitet. Imidlertid har CO₂ ved fordampning nogle overgangstal, der ligger over en-fasede brineovergangstal, så derfor kan man ligge højere i fordampningstemperatur end forventet, og dette opvejer en del af førnævnte tab.



Ofte bruges de to sidste i en kombination, hvor kondensat fra kaskadekøleren pumpes ud til forbrugere ved kaskadetrykket. Det fordampede kølemiddel returneres og genkondenseres i kaskadekøleren. Derved kan man have to forskellige temperaturniveauer – typisk frys og køl – i samme anlæg.

3.3 Afrimning

Endnu et problem, der er koblet til CO₂'s høje tryk, er afrimning. Ved 0 °C er CO₂'s mætningstryk 34,8 bar (abs), og for at få afrimet må man op på minimum 5-10 °C, hvilket svarer til 39-45 bar(abs). Mange vælger ikke at bruge CO₂ til afrimning, men i stedet at bruge el-afriming, glykolafrimning eller naturlig afrimning. Førnævnte er naturligvis også velfungerende løsninger, men fra et energi effektivitetssynspunkt er de ikke særlig optimale. Hotgasafrimning med CO₂ er uden tvivl det mest effektive, både med hensyn til energiforbrug men også med hensyn til selve afrimningsprocessen. Hotgasafrimning leverer varmen, hvor isen sidder – på kølefladen – og skal ikke ledes gennem luft etc. som ved elektrisk- eller glykolafrimning. Desuden vil hotgasafrimning fjerne is fra kølefladen og udefter, og man kan slippe for at smelte en del is, hvis det kan falde af tidligere.

Med et velovervejede hotgassystem kan omfanget af systemet holdes nede på et meget lavt niveau. På den måde er det kun et fåtal af komponenter, der skal kunne holde til afrimningstrykket, og prisen kan holdes på et fornuftigt niveau, der kan retfærdiggøres, når det sammenholdes med besparelsen.

Der er grundlæggende to forskellige måder at levere hotgas på:

- En afrimningskompressor kan monteres, så den suger fra kølekompressorens højtryksside, sædvanligvis ved 25-30 bar, og derefter komprimerer gassen op til ca. 45 bar, hvorefter den sendes til kondensation i fordampere, der skal afrimes.

En vigtig pointe er, at afrimningskompressoren kun kan levere hotgas, hvis kølekompressorerne leverer gas, så derfor skal der være belastning på systemet, når der skal leveres hotgas. Et system med en enkelt fordampere vil således ikke kunne afrime med hotgas, idet der ingen belastning er, når fordampere skal afrimes. Som en tommelfingerregel kan man afrime 1 ud af 3-4 fordampere, der er ens.

Idet den gas, som afrimningskompressoren suger fra, ikke længere skal kondenseres i kaskadekøleren, vil man opleve nogle interessante fænomener. Først og fremmest vil belastningen på kaskadekøleren falde, og i de tilfælde, hvor afrimningskompressorens kapacitet er stor i forhold til kaskadekøleren, kan dette ske temmelig voldsomt og den sekundære kølekreds, der køler kaskadekøleren, kan have svært ved at regulere ned i kapacitet hurtigt nok. Dette kan imødegås med en intelligent styring, og i værste fald kan man montere en hotgasbypass på den sekundære kølekreds.

Overraskende nok så indebærer hotgasafrimning med CO₂ en forbedring af anlæggets COP. Som nævnt vil en del af den gas, der skulle have været kondenseret i kaskadekøleren, blive komprimeret af afrimningskompressoren. En afrimningskompressor, der kører -10 °C/+10 °C, har typisk en COP, der er dobbelt så høj som en ammoniakkompressor, der kører -15 °C/+30 °C, så idet man flytter lasten over på afrimningskompressoren, vil man opnå et mindre kraftforbrug set over et og dermed en bedre anlægs-COP. Det totale bidrag afhænger naturligvis af, hvor meget og hvor tit man afrimer, og hvor effektivt man kan reducere lasten på den sekundære kreds.

- Man kan fordampe CO₂ ved et tilstrækkeligt højt tryk for derefter at lade den kondensere i fordampere, der skal afrimes. Hvis man benytter varme fra den sekundære kølekreds, så kan man opnå en god energieffektivitet. Dog er denne løsning underlagt de samme begrænsninger som løsningen med en afrimningskompressor. Hvis ikke der er belastning på kølekredsen, så er der hverken belastning på kaskadekøleren eller den sekundære kreds, og dermed er der ingen varme. Alternativt kan man bruge en ekstern varmekilde, men i de tilfælde, at det er varme, der koster (f.eks. ikke spildvarme), så er der ikke nogen energimæssig grund til at bruge denne løsning.

For at kunne fordampe ved højt tryk er man nødt til at pumpe væske fra kaskadekøleren op til afrimningstrykket. Idet kaskadekøleren allerede har kondenseret trykgassen fra kølekompressorerne, så er COP-gevinsten, der er forbundet med hotgasafrimning af kompressoren, ikke til stede ved denne metode.

Generelt er der flere forskellige måder, afrimningssystemet kan udføres på. Et af de mest almindelige stridspunkter er, om man skal afrime fra toppen eller bunden af fordamperen – dvs. om man tilfører afrimningsgassen til sugestudsen eller til vækestudsen. Tilhængere af afrimning fra bunden mener, at man opvarmer den væske, der befinder sig i fordamperen, ved tilførsel af hotgas indtil den er over frysepunktet, og fordamperen er afrimet. Denne fremgangsmåde er mulig, men der er visse farer ved at benytte den. Idet væskens tryk hæves, er den underkølet, og når man så sprøjter overhødet gas ind, vil gassen falde sammen. I mange tilfælde vil dette ske uden større dramatik, men det kan hændes, at gasboblerne falder sammen med meget voldsomme trykpulsationer til følge. Disse trykpulsationer kan sammenlignes med kavitation, der som bekendt kan ødelægge pumper etc. Pulsationerne kan let give tryk, der er mange gange højere end selv hotgastrykket. Trykket kan derfor overstige designtrykket for anlæggets komponenter og give katastrofale svigt. Fleksible slanger på pladefrysere og ventiler ser ud til at være de mest modtagelige for disse pulsationer. Lignende problemer kan opnås ved en voldsom regulering af en modulerende ventil.

I stedet anbefales det at afrime fra toppen – altså tilføre hotgas til sugestudsen. Ved denne metode kan man tømme fordamperen for væske via hotgastrykket og kondensere på hele den indre overflade af fordamperen. Når hotgassen er kondenseret i fordamperen, har den afleveret sin latente varme og bør drænes ud, for at opnå det optimale resultat. Ved denne metode er der ingen risiko for voldsomme boblekollapser.

I afrimningsdræning er det almindeligt at anbringe en ventil, der regulerer afrimningstrykket. Er trykket for lavt lukker ventilen, og dermed holdes afrimningstrykket oppe. Denne fremgangsmåde har imidlertid nogle uheldige konsekvenser, idet den hindrer en fuldstændig dræning af fordamperen. I realiteten vil ventilen sørge for, at den tilgængelige overflade kan kondensere den hotgas, som afrimningskompressoren kan levere ved afrimningstrykket. Når fordamperen er meget kold, kan den kondensere meget med en ganske lille overflade pga. den store temperaturredifferens, og det betyder, at ventilen vil holde fordamperen næsten fyldt med væske.

I stedet kan man vende problematikken om og sige, at det ikke er nødvendigt, at afrimningen altid sker på et konstant tryk. Hvis man dræner fordamperen fuldstændig, vil man kunne levere en meget større effekt, blot ved en temperatur der – i starten – er lavere end nul. Med et lavere afrimningstryk kan afrimningskompressoren levere en meget højere kapacitet, og derfor kan man lave en meget hurtigere afrimning. At afrimningen starter ved f.eks. -15°C er ikke et problem, idet man med maksimal varmeinput hurtigt får temperaturen højere op.

En fuldstændig dræning af alt væske i fordamperen kræver en flyderventil eller en ventil med lignende egenskaber. I tilfældet CO_2 er der på grund af det høje tryk ikke almindelige flyderventiler med tilstrækkelig kapacitet til rådighed inden for køleindustrien, men de findes inden for den kemiske industri. Disse er blot flere gange dyrere end dem fra køleindustrien. I stedet kan man bruge en termodynamisk væskeudlader eller bruge en lille flyderventil (der kan klare afrimningstrykket) som pilot for en større ventil.

I almindelige anlæg (R717, R22 etc.) er det normalt at afrime ved kondenseringstemperaturen, idet afrimningskapaciteten (kondenseringskapaciteten) af den fordamper, der skal afrimes, er lille i forhold til den samlede kondenseringskapacitet, og derfor er det kondensatorerne, der styrer trykket. Med CO₂ er afrimningstrykket afkoblet fra kondenseringstrykket (kaskadetrykket), og derfor er det naturligt at undersøge, om det er nødvendigt at kondensere ved +30°C eller højere for at få en god afrimning. Erfaringen har vist, at 5-8°C er nok, hvilket er bekvemt, fordi trykket så kan holdes inden for 50 bar, som kan opnås med visse industrielle kompressorer. Desuden betyder den lavere afrimningstemperatur en lavere tilførsel af varme til fordamperen og dermed mindre tilførsel af varme til f.eks. kølerum.

3.4 Kompressorstørrelse og -effektivitet

Det høje tryk kan vendes til noget positivt, idet mætningstrykket forbliver højt ved lave temperaturer. R22 og R717 går i vakuum ved hhv. -41°C og -33,6°C, mens CO₂ har et tryk på 6,8 bar(abs) ved -50 °C og 5,2 bar(abs) / -56,6 som den (absolut) laveste grænse.

Det høje tryk betyder, at gasdensiteten er høj, hvilket giver en kompressorkapacitet, der er mange gange højere end med de traditionelle kølemidler. En CO₂-kompressor yder ca. 10 gange så meget som den samme kompressor med R717 eller R22. Desuden er trykforholdet forholdsvis lavt (da sugetrykket er højt), så effektiviteten (COP) er høj for en CO₂-kompressor.

Nu er en sammenligning ikke altid helt så simpel, idet CO₂-kompressoren ikke kan stå alene, men skal benyttes i en kaskade. Men hvis man udregner det totale installerede slagvolumen for et -40°C/+25°C CO₂/R717 kaskadeanlæg, er det ca. 40% af, hvad der skal bruges til et R717 eller R22 anlæg med samme kapacitet. Ved -50°C/+25°C er det ca. 33%. Desuden er COP'en væsentlig bedre, idet den ved -40°C er ca. 10% højere, og ved -50°C er den ca. 20% højere. Den økonomiske gevinst ved at kunne installere mindre kompressorkapacitet mindskes, da systemet er noget mere kompleks, men ikke så meget at den er væk.

3.5 Tryktab og størrelse af rørledninger

Den høje gasdensitet betyder ligeledes, at sugerør (våd og tør) kan laves mindre end for de traditionelle kølemidler.

CO₂'s mætningskurve har tillige en meget favorabel form, hvilket giver betydelige fordele for sugeledninger og fordampere. Nedenstående tabel viser, hvor mange pascals tryktab, der skal til, for at give 1 kelvins fald i mætningstemperatur.

	+20°C	0°C	-20°C	-40°C	-50°C
R717	27.425	16.072	8.444	3.838	2.415
R22	25.444	16.212	9.458	4.894	3.321
R404A	29.757	19.156	11.382	6.026	4.140
CO2 (R744)	134.468	92.265	60.721	36.992	27.724

Det er velkendt, at et tryktab i f.eks. en sugeledning betyder en højere mætningstemperatur i fordamperen med deraf følgende dårligere funktion – nedsat kapacitet og dårligere COP. Derfor er design af sugeledningen altid et kompromis mellem en stor diameter af hensyn til tryktabet og en lille diameter af hensyn til installationsomkostninger (rør, svejsninger, isolering etc.). Det er tydeligt, at CO₂ kan klare betydeligt større trykfald, før det går alvorligt ud over mætningstemperaturen, hvilket igen bidrager til at holde rørdimensioner nede.

Hvis man for sammenligningens skyld beregner en sugeledning med forskellige kølemidler, således at de har det samme tryktab i kelvin, ser forholdet mellem diametre således ud:

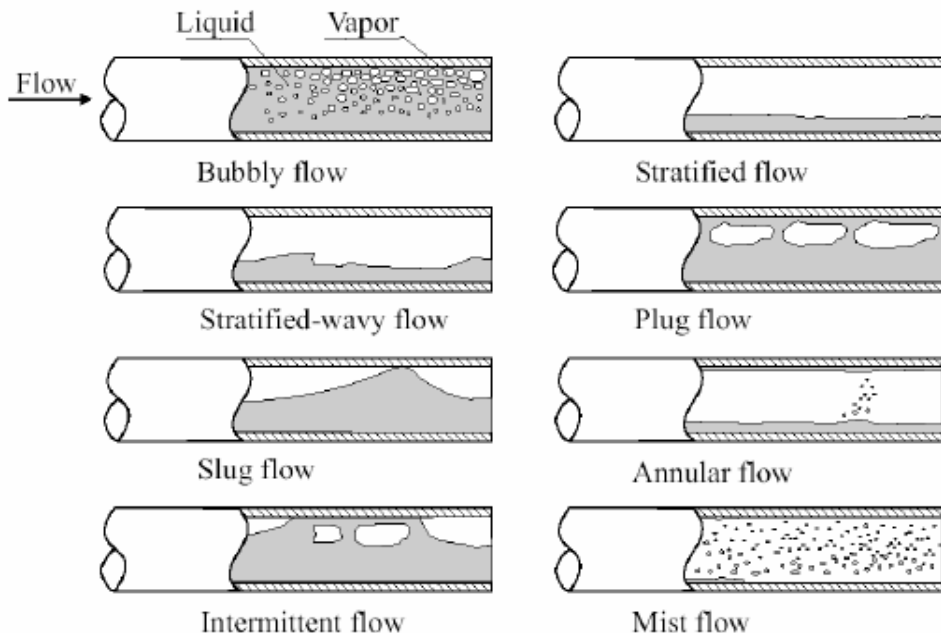
	-50°C	-40°C	-30°C	-20°C
R717	206%	191%	179%	169%
R22	263%	251%	241%	232%
R404A	275%	261%	249%	238%
CO2 (R744)	100%	100%	100%	100%

Tydeligvis har CO₂ en kæmpe fordel med hensyn til indkøb og installation inkl. isolering osv. Desuden er det værd at reflektere over, hvor meget et tryktab betyder i effektivitetstab for kompressorer - specielt ved de lave temperaturer. Et tryktab på 1K vil betyde temmelig meget for R717, R22 og R404A men en del mindre for CO₂.

3.6 Fordampere

Fra et varmetransmissionssynspunkt er der ikke store problemer med at designe de fleste varmevekslere til CO₂, men dimensionering af fordampere med fordampning inden i kanaler/rør fortjener en speciel behandling. Som tidligere nævnt er densiteten af CO₂ høj i forhold til de traditionelle kølemidler. Dette betyder, at for den samme kapacitet er volumenstrømmen meget mindre, og hvis den samme fordamper bruges, vil hastigheden også være meget mindre. Ved -40°C, cirkulationstal 3 er R717 hastigheden 9 gange større end hastigheden med CO₂. Dette betyder, at strømmingen i kølemiddelkanalen/-røret bliver markant anderledes.

Når man klassificerer strømninger i rør, deles de op efter såkaldte "flow patterns". En oversigt over disse for horisontale rør ses nedenfor.



De forskellige flow patterns udtrykker forskellige hastigheder og gas-/væskesammensætninger. I forbindelse med dimensionering af fordampere er det vigtigt, at hele overfladen er våd, så der kan opnås et godt overgangstal på kølemiddelsiden. Det ses tydeligt, at visse flow patterns er bedre end andre. Normalt er en fordamper i annularområdet, hvor en film af væske trækkes langs røroverfladen af gashastigheden. Bemærk, at der på tegningen er en, om end tynd, film på den øverste del af røret. Netop hastigheden er essentiel for, at annular flow kan opstå, og idet CO₂ har en væsentlig lavere hastighed end de traditionelle kølemidler, så vil brugen af CO₂ i en "gammeldags" fordamper resultere i et andet flow pattern. Typisk vil flowet være "stratified" eller "stratified-wavy", hvor kølemiddelvæsken flyder som en doven flod i bunden af røret. Dette betyder, at kun en lille del af overfladen bliver våd, og dermed opnås en stærkt forringet varmeovergang.

Løsningen på dette er en fordamper med kanaler med mindre kanal-/rørtværsnit, så hastigheden igen kan komme op, og flow patterns igen kan blive annular. Ligeledes kan færre men længere løb give en større hastighed i kanalerne/rørene. Som tidligere nævnt er CO₂'s egen-skaber mht. tryktab gunstige, så tryktabet (i kelvin), som er forårsaget af mindre, længere og kraftigere belastede kanaler, kan sagtens holdes inden for, hvad man er vant til med andre kølemidler.

I begyndelsen af CO₂'s "nye" karriere så man ofte luftkølerproducenter, der tilbød R717 eller freonluftkølere til brug med CO₂, hvilket ikke var tilfredsstillende. I dag er de fleste producenter klar over forskellen, men det tilrådes at sammenligne den tilbudte CO₂-fordamper med producentens R717/freonprodukter samt at spørge ind til sagen.

Det er kun i fordampere med fordampning inden i kanaler/rør, at dette er et problem. Typiske produkter i denne kategori er luftkølere, pladefrysere og chillere med direkte ekspansion.

3.7 Kaskadekølere

CO₂ kondenseres i kaskadekøleren, og et sekundært kølemiddel fordampes. De fleste leverandører er i dag i stand til at levere kaskadekølere, og alle almindelige typer kan bruges – shell-and-tube, shell-and-plate og pladevarmevekslere.

Temperaturdifferensen er som regel et emne, der skal diskuteres ved design af en kaskadekøler. I forhold til en lille differens vil en stor temperaturdifferens betyde, at den sekundære kølekreds skal fordampe ved en lavere temperatur, eller at CO₂-kredsen skal kondensere ved en højere temperatur eller en kombination af begge. Dette betyder, at effektiviteten af en eller begge kompressorer bliver mindre – altså, at den samlede system-COP bliver mindre. På den anden side vil en mindre temperaturdifferens betyde en stor kaskadekøler, som er dyr i indkøb. Den endelige løsning af dette problem afhænger naturligvis af kundens præferencer – installationspris eller driftsøkonomi.

3.8 Bestemmelse af kaskadetemperaturen

Kaskadetemperaturen, sædvanligvis angivet ved CO₂-kondenseringstemperaturen, har betydning for systemets overordnede COP. Kaskadetemperaturen er generelt set et udtryk for den balance, der opnås når CO₂-kompressorerne leverer en kondenseringskapacitet, som modsvarende kølekapaciteten af den sekundære kreds.

Der har været lavet flere undersøgelser om, ved hvilken kaskadetemperatur, den bedste COP findes. Hidtil har disse undersøgelser peget på en temperatur på ca. -10°C, men det skal siges, at COP-variationen omkring dette punkt er meget lille.

I praksis er det ofte et spørgsmål om, hvilken balance man kan opnå med de til rådighed værende kompressorer. Såfremt man kan opstille flere løsninger til en given kølekapacitet, tilrådes det at undersøge disse mht. total COP, f.eks. CO₂-kompressorernes kølekapacitet divideret med summen af kompressorernes effektforbrug.

3.9 Stilstandskøling

Under stilstand vil kølemidlets temperatur udligne sig med omgivelserne. Dette betyder, at trykket i systemet vil stige. I de traditionelle kølemidler er dette ikke noget problem, men for CO₂ vil det betyde uacceptable høje tryk. Den mest almindelige løsning er at tilføje en stilstandskølsunit, der via en coil i pumpeseparatoren køler/kondenserer CO₂ og dermed holder kølemidlets tryk nede.

En sådan stilstandsunit vil typisk være en simpel præfabrikeret kondenseringsunit med R404A eller R134A. Kapaciteten afhænger naturligvis af anlæggets størrelse og isoleringsgrad, men ganske få kW er en almindelig størrelse.

Husk at tilføje en coil i pumpeseparatoren. Coilen kan være monteret øverst i gasfasen, hvor den kondenserer gas, eller den kan være neddyppet i væsken, hvor den nedkøler væsken, så gassen kondenserer på overfladen.

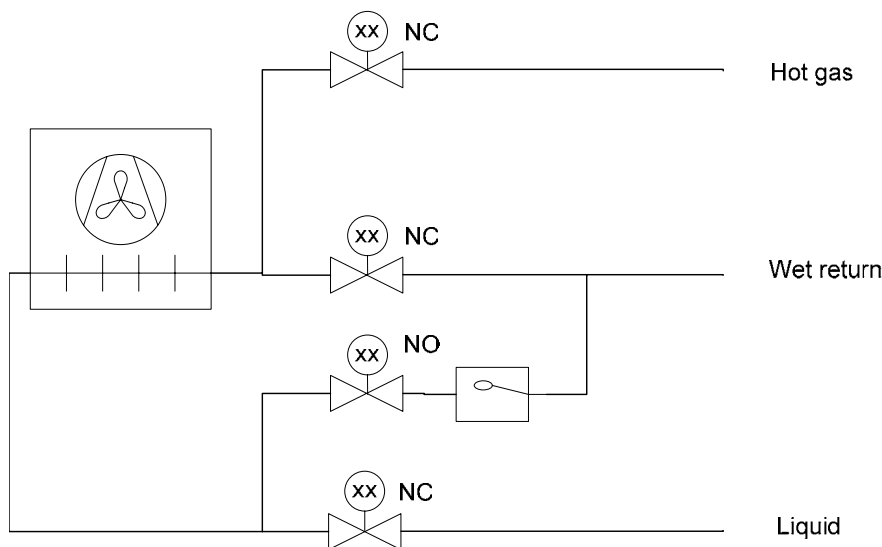
Husk desuden at al (!) væske returnerer til pumpeseparatoren under stilstand, fordi det uvægerligt vil være det koldeste sted – på grund af stilstandskølingen.

3.10 Strømodfald og nødstop

I tilfælde af et strømodfald vil stilstandsuniten naturligvis ikke være i stand til at holde trykket nede i systemet. Systemet vil naturligvis altid være forsynet med sikkerhedsventilen, men da disse ikke lukker, før der er blæst ned til et tryk, der er betydeligt under åbningstrykket (sædvanligvis 15% under), og ofte ikke lukker ordentligt igen, så kan tabet af CO₂ være betydeligt. Det kan derfor anbefales at montere en ventil, der – via en batteridrevet styring og aktivering – kan blæse CO₂ af under mere kontrollerede forhold. Setpunktet for denne ventil skal naturligvis være lavere end for sikkerhedsventilerne.

I tilfælde af strømodfald og nødstop vil man have endnu en faktor at holde øje med. Så længe der er væske i fordamperne, vil de have en kapacitet og dermed levere gas tilbage til pumpeseparatoren. Dermed kan denne residualkapacitet få trykket til at stige, uden at stilstandsuniten kan holde det nede - hvis den overhovedet har strøm. At dimensionere stilstandsuniten til dette scenario vil give en urealistisk stor stilstandsunit. I traditionelle systemer er det normalt ikke noget problem. Når trykket stiger, vil fordampningstemperaturen også stige, og dermed reduceres fordampernes kapacitet med tiden til nul. For CO₂-systemer med fryseudstyr kan dette imidlertid betyde tryk, der er langt over, hvad lavtrykssiden er dimensioneret til.

I pumpeystemer kan det anbefales, at man vælger sine ventiler på fordamperne fornuftigt. Hvis fordamperen tømmes for væske, vil kapaciteten falde til nul, og belastningen og trykstigningen minimeres. Dette gøres i praksis ved at lade den gas, der udvikles, trykke væsken ud af fordamperen. Stopventiler i sugeledningen, væskeledning og hotgasledning skal være "normally closed" (NC) og i afrymningsreturledningen skal den være "normally open" (NO).



3.11 Pumper

De fleste leverandører kan levere pumper til CO₂, og der er i det store hele ikke mange problemer med dem.

Kavitation er et mindre problem med CO₂ end med andre kølemidler, da energien, der bliver udløst, er meget mindre. Dette skal dog ikke forstås som om, at kavitation er acceptabel, da pumpen ikke leverer det forventede flow.

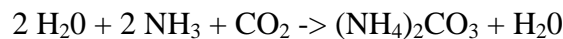
Forholdet mellem tryk og temperatur – der på mange måder hjælper – kan for pumpen betyde problemer. En pumpe NPSH angiver det overtryk, der er nødvendigt for ikke at få kavitation i pumpen – udtrykt i meter væskesøjle. Det nødvendige overtryk sørger for, at lokale tryk i pumpen ikke kommer under mætningstrykket. Med CO₂ er der den lille forskel, at en given trykændring giver en lille ændring i mætningstemperaturen i forhold til andre kølemidler. Det betyder, at underkølingen i bunden af en væskesøjle er mindre for CO₂ end for andre kølemidler. Nu er det ikke underkølingen i sig selv, der sørger for, at pumpen ikke kaviterer, men med en lille underkøling skal der ikke meget varmeindfald til, for at væsken igen er på mætningstemperaturen, og pumpen er i fare for at kavitere. Derfor er det tilrådeligt at isolere faldrør og tilløbsrør til pumpen, og hvis det er praktisk muligt til selve pumpen.

Desuden er der for pumpen den forskel, at den under stilstand altid står med meget kold væske. Anlæg med R22 eller R717 vil udligne temperaturen til omgivelserne, hvorved en smule væske fordamper. Anlæg med CO₂ vil have en temperatur på f.eks. -30°C, idet stilstands-unitten holder temperaturen nede. Derfor er der et kontinuerligt varmeindfald og en kontinuerlig fordampning af væske.

Hvis der er vand i CO₂'en, vil denne blive opkoncentreret i pumpen, indtil den overstiger det maksimale indhold i CO₂'en. Derefter vil det overskydende vand blive skilt ud og danne is, der kan forhindre pumpen i at køre rundt. Dette problem er mest fremtrædende ved anlæg, der står stille i længere tid, og anlæg der har store koncentrationer af vand opløst i CO₂'en. Se i øvrigt afsnittet "Forurening med vand".

3.12 Forurening med R717

Det er almindeligt at bruge R717 som det sekundære kølemiddel, og en blanding af CO₂ og R717 er mulig ved en læk i kaskadekøleren og eventuelt i andre varmevekslere, der veksler mellem CO₂ og R717. Idet trykket på CO₂-siden af kaskadekøleren er meget højere end på R717-siden, vil forureningen ske på R717-siden. Blanding af CO₂ og R717 giver følgende reaktion:



(NH₄)₂CO₂ er ammonium-karbamid, hjortetetaksalt, som er et ekstremt korrosivt hvidt pulver. Dette stof kan give store problemer i R717-anlægget. Til højre ses en kaskadekøler, der har været udsat for en læk. Den hvide substans i tilslutningerne er ammonium-karbamid, der i dette tilfælde havde stoppet varmeveksleren så grundigt, at der stadig var kølemiddeltryk inden i, da den blev skilt ad.



En del forskellige forholdsregler er blevet diskuteret mht. dette problem. En shell-and-tube kaskadekøler kan laves med dobbelte rørplader, hvorved en evt. læk trænger ind i rummet mellem de to rørplader, hvor en læk kan detekteres, før den udvikler sig til en læk fra CO₂-siden til R717 siden. Imidlertid har man, efter at have konstateret at en del kemiske anlæg har brugt kaskadekølere uden dobbelte rørplader i mange år, skønnet, at den ekstra omkostning ikke stod i forhold til gevinsten, og dermed bruges dobbelte rørplader ikke i stor omfang.

En anden sikkerhedsforanstaltning kunne være at benytte to kaskadekølere med hver sin separate R717-kreds. På trods af en læk i den ene køler ville den anden kunne køre videre takket være de separate kredse.

Ofte bruges der ikke nogen af de ovennævnte forholdsregler, og problemerne har været meget små.

3.13 Forurening med vand

Vand i CO₂-køleanlæg er et problem, ligesom det er det i almindelige køleanlæg. I CO₂-systemer kan vandet reagere både med CO₂ og med olie, og i begge tilfælde dannes der syrer, som kan lede til korrosion. Der er dog endnu ikke konstateret korrosionsproblemer i anlæg udover procesanlæg med massive mængder vand.

Et andet problem er ophobning af vand i lavtryksdelen. Idet opløseligheden af vand i CO₂'s dampfase er meget lav i forhold til opløseligheden i væskefasen, vil al vand sædvanligvis samles på lavtrykssiden. Dette kan over tid betyde, at koncentrationen af vand stiger til niveauer, hvor uheldige effekter begynder at betyde noget. Det skal i den forbindelse understreges, at en fugtindikator i højtryksvæsken udmærket kan vise et meget tørt system, uden at det er tilfældet.

3.14 Stigning i sugetryk ved nedkøling eller batchprocesser

Ved batchfrysning er fordampernes kapacitet sædvanligvis meget højere i begyndelsen af fryseprocessen end i slutningen. Kapaciteten i begyndelsen kan være flere gange højere end gennemsnitsbelastningen og mange gange højere end belastningen i slutningen af frysningsen. Anlæg med mange sideløbende batchprocesser vil normalt sekvensere disse således, at frysningerne ikke starter på én gang. At den enkelte fryser belaster med f.eks. 3 gange gennemsnitsbelastningen i en kort tid, betyder således mindre i procentuel stigning set over hele systemet. Desuden vil flere af fryserne være i den sidste del af fryseperioden, og dermed levere en lavere belastning end gennemsnittet. Dermed er den totale belastning nogenlunde konstant.

Er der derimod få batchfrysere tilkoblet, kan belastningsvariationen – i procent – være væsentlig, og der vil derfor forekomme variationer i sugetrykket. Sædvanligvis er kompressorer dimensioneret ud fra en gennemsnitskapacitet, og derfor vil sugetrykket stige til over designpunktet ved starten af en batchproces.

Samme situation vil gøre sig gældende ved den indledende nedkøling af f.eks. et frostlager eller et produktionsanlæg.

Det stigende sugetryk vil betyde en væsentlig højere kapacitet af anlægget, men der er visse forskelle i forhold til traditionelle anlæg. Traditionelle anlæg – for fryseanlæg sædvanligvis to-trins R717 eller freonanlæg – vil reagere med at levere den ønskede kapacitet, så længe kompressormotorerne kan levere den nødvendige ydelse. Normalt når man ikke nogen grænser for kompressorernes drift.

I et CO₂-kaskadeanlæg er det imidlertid ikke altid så simpelt. Ofte er der begrænsninger på komponenternes maksimale driftstryk. I et -50°C system vil man – ud fra et COP-synspunkt – lægge CO₂ kondenseringstemperaturen på -10°C. Dette betyder et kondenseringstryk på ca. 25 bara, og ud fra dette ville man kunne antage, at et designtryk for kaskadekøleren på 40 bar ville være tilstrækkeligt.