

ELFORSK PSO-F&U 2007

Grundvandsvarmepumper og –køling
med grundvandsmagasiner som
sæsonlager

BILAG 2

Varmepumper og ATES



Varmepumper i ATEs

Valg af varmepumpesystem

Indholdsfortegnelse

1	Varmepumpens virkemåde	3
2	Valg af kølemiddel	5
	COP for forskellige kølemidler	7
	Kondenseringstemperatur og fremløbstemperatur på varnebærer	8
3	Kompressortyper og kapacitetsregulering	8
4	CO₂ varmepumpeanlæg	10
	Effektivitet af CO ₂ varmepumpe	10
	Brugsvandopvarmning	12
5	Anlægsudformning og økonomi	13
6	Varmedrevne varmepumper	14
7	Sammenfatning	15

1 Varmepumpens virkemåde

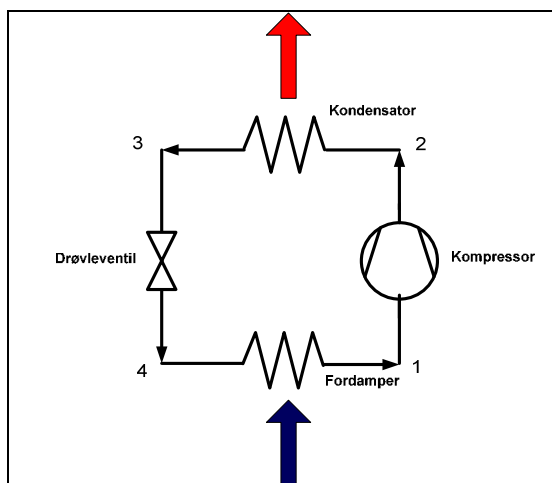
En varmepumpe anvendes til at pumpe/hente varme fra et lavere til et højere temperaturniveau. Varmepumpen kan drives af enten varme eller el. I Danmark vil det i de fleste tilfælde være et eldrevet varmepumpeanlæg, der anvendes i et ATES system.

Eldrevet varmepumpe

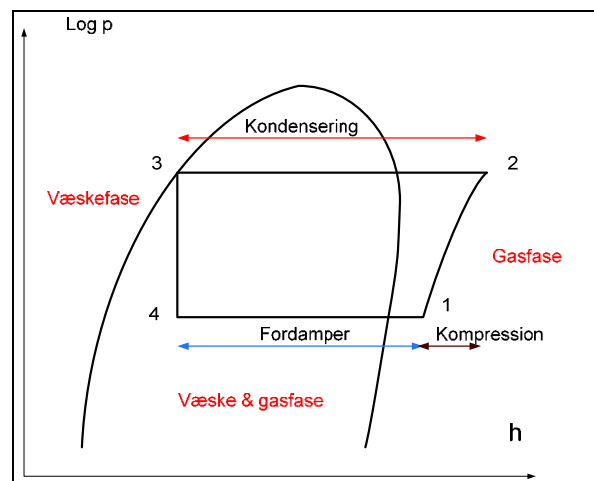
En eldrevet varmepumpe er opbygget på samme måde som et eldrevet køleanlæg og består i grundprincippet af 4 komponenter: kompressor, kondensator, ventil og fordampere.

Processen foregår ved 2 forskellige tryk, fordampetrykket og kondenseringstrykket. Ved det lave trykniveau (lav temperatur) optages varme, ved at kølemidlet fordampes og optager varme. Herefter komprimeres det fordampede kølemiddel til det høje trykniveau. Det komprimerede kølemiddel er nu en varm gas der føres til en kondensator, hvor det kondenseres ved bortførelse af varme ved en højere temperatur end da det fordampede. Det er varmen fra kondenseringen, der anvendes til opvarmning i en varmepumpe.

Efter at kølemidlet er kondenseret, drøbles det (ensbetydende med et tryk og et temperaturfald) gennem en ventil ned til fordampetrykket, hvor det fordampes på ny ved optagelse af varme.



Figur 1. Kredsproces for køleanlæg/varmepumpe.



Figur 2. Log(p)-h diagram for kredsløbet

Til at drive processen bruges energi til kompressoren. Hvor meget energi, der bruges, afhænger primært af de temperaturniveauer, der ønskes ved opvarmningen og kølingen. Ønskes en højere temperatur til opvarmning kræves et højere kondenseringstryk, at komprimere gassen yderligere koster mere energi til kompressoren.

Det anvendte kølemiddel og anlægsbestykningen har dog også betydning for effektiviteten af processen.

Varmepumpens virkningsgrad

Virkningsgraden for en varmepumpe har mange betegnelser i litteraturen, bl.a. effektfaktor og COP (Coefficient Of Performance). I den videre beskrivelse anvendes COP_{varme} når der menes varmepumpens effektivitet og COP anvendes når der refereres til en kølemaskines effektivitet.

COP_{varme} er defineret som forholdet mellem varmeeffekt afgivet i kondensatoren $Q_{\text{kondensator}}$ og den elektriske effekt optaget i kompressoren $W_{\text{kompressor}}$.

$$COP_{\text{varme}} = Q_{\text{kondensator}} / W_{\text{kompressor}}$$

COP for kølemaskinen er kuldeydelsen $Q_{\text{fordamper}}$ divideret med den elektriske effekt $W_{\text{kompressor}}$ optaget af kompressoren.

$$COP = Q_{\text{fordamper}} / W_{\text{kompressor}}$$

Sammenhængen mellem de COP_{varme} og COP kan antages til følgende:

$$COP_{\text{varme}} = COP + 1$$

Når det antages, at der ikke er tab i elmotor og transmission mellem elmotor og kompressor.

Ønskes tabet medtaget kan COP_{varme} antages at være følgende:

$$COP_{\text{varme}} = COP + 0,9$$

COP_{varme} giver et øjebliksbillede af varmepumpens effektivitet i en driftstilstand. For at få varmepumpens gennemsnitlige effektivitet over sæsonen anvendes SPF (Seasonal Performance Factor).

$$SPF = (\text{kWh varme leveret}) / (\text{kWh el til kompressor}).$$

2 Valg af kølemiddel

Kølemidler der anvendes i varmepumper kan opdeles i 2 grupper, de syntetiske og de naturlige.

De syntetiske:

- HFC: flourerede kølemidler, er skadelige for miljøet

De naturlige:

- HC: kulbrinter, er meget brændbare
- NH₃: ammoniak, er giftig
- CO₂: kuldioxid, proces ved højt tryk

Pr. 1. januar 2007 kom der nye krav til brugen af HFC kølemidler. Det er blandt andet ikke tilladt at sælge køle- og varmepumpesystemer med en fyldning over 10 kg. Dette kan/vil derfor udelukke brugen af HFC kølemidler i større varmepumpeanlæg.

I dag er mest anvendte HFC-kølemidler i varmepumper R407C, R134a og R410a. Kølemidlerne betegnes som mere eller mindre "grønne" i relation til deres tilbøjelighed til at påvirke miljøet, hvis de bevæger sig frit i atmosfæren.

Som erstatning for HFC kølemidler anvendes i Danmark primært de naturlige kølemidler som kulbrinter, CO₂ og ammoniak.

Valget af kølemiddel afgøres bl.a. af hvilke temperaturniveauer, der ønskes opnået. Har man behov for varme ved en høj temperatur (80-90 °C af vardebæreren) er det muligt at opnå en høj COP med en varmepumpe med CO₂ som kølemiddel. For ammoniak ligger grænsen på ca. 70 °C også med en "rimelig" høj COP. Skal der opnås så høje temperaturniveauer med kølemidlet R134a bliver COP dårligere end for CO₂ og ammoniak. I skema 1 ses oversigt over de mest anvendte kølemidler i varmepumper.

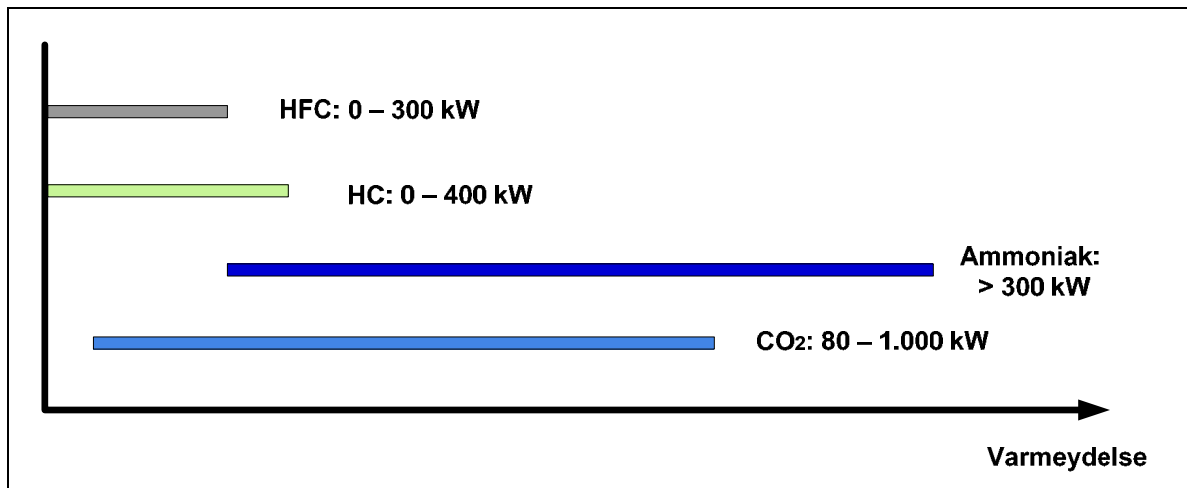
Kølemiddel	Kategori	Øvre temperaturgrænse for vardebærer [°C]	Giftig/brandfarlig	Drivhuseffekt GWP-faktor ¹ relativt til CO ₂	Bemærkning
R134a	HFC	75-80	nej/nej	1.300	Max 10 kg fyldning
R407C	HFC	50	nej/nej	1.530	Max 10 kg fyldning
R410A	HFC	<50	nej/nej	1.730	Max 10 kg fyldning
R404A	HFC	<50	nej/nej	3.260	Max 10 kg fyldning
Ammoniak	Naturlig	70	ja/ja (delvis)	0	Teknologi udviklet
CO ₂	Naturlig	80-90	nej/nej	1	Højt trykniveau
R290 Propan	Naturlig	60	nej/ja	3	Ekspløsningsfare

Skema 1. Fordele og ulemper for forskellige kølemidler.

¹ GWP: Global Warming Potential

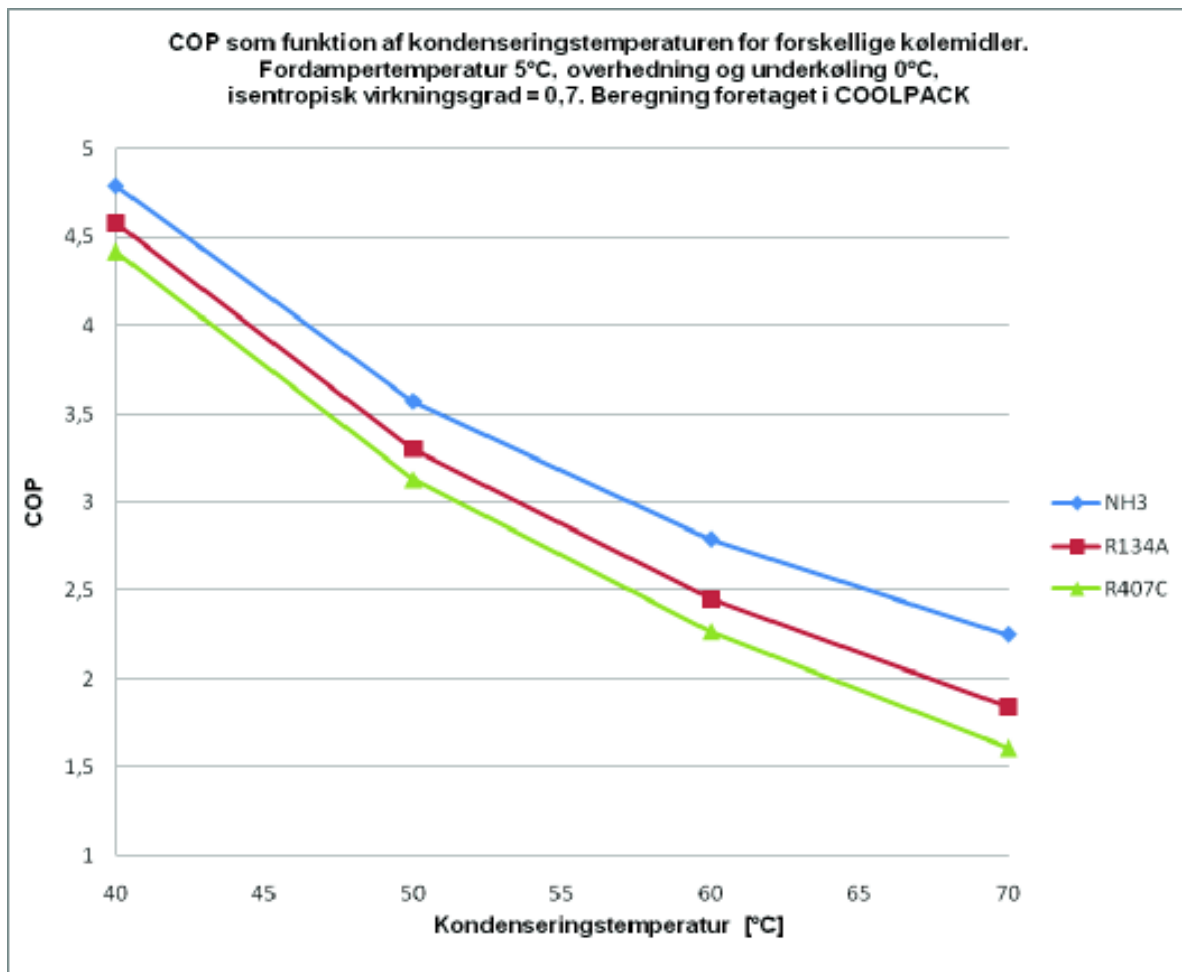
Det bliver formentlig ammoniak og CO₂, der kommer i brug som kølemiddel på meget store varmepumpeanlæg i fremtiden. På mindre anlæg vil det formentlig stadig være HFC kølemidlerne der anvendes.

I figur 3 ses en vurdering af valget af kølemiddel efter anlægsstørrelsen.



Figur 3. Forventet anvendt kølemiddel efter anlægsstørrelse

COP for forskellige kølemidler



Figur 4. COP som funktion af kondenseringstemperaturen for forskellige kølemidler.

I Figur 4 ses den teoretiske COP som funktion af kondenseringstemperaturen for forskellige kølemidler. Figuren skal illustrere, hvad der kan opnås ved at vælge et kølemiddel frem for et andet. Det ses, at Ammoniak (NH₃) er det bedste kølemiddel energimæssigt.

Eksempelvis vil et anlæg med ammoniak have en COP på 2,8 ved en kondenseringstemperatur på 60 °C. For R407C vil COP være ca. 1,8 ved samme kondenseringstemperatur.

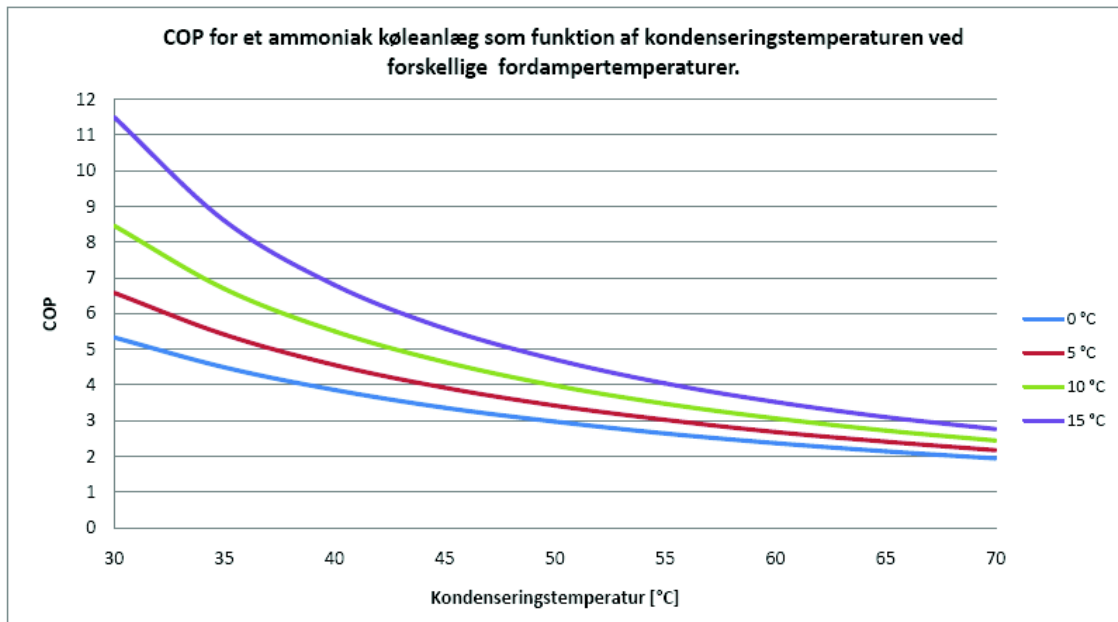
Den teoretiske elbesparelse ved at vælge anlægget med ammoniak som varmepumpe beregnes som:

$$(\Delta\text{COP} / \text{COP}_{\text{varme (ny)}}) \cdot 100 \% = ((1,8 - 2,8) / (2,8 + 1)) \cdot 100 \% = \underline{26 \%}$$

Ammoniak vil have yderligere fordele i forhold til HFC kølemidlerne på grund af dens gode termofysiske egenskaber. Der kan derfor forventes en besparelse på mellem 30-40 % ved at anvende en varmepumpe baseret på kølemidlet ammoniak i stedet for HFC. Det skal dog tilføjes, at et anlæg med ammoniak normalt er noget dyrere i anskaffelse og i service.

Kondenseringstemperatur og fremløbstemperatur på varmbærer

Temperaturen af varmbæreren vil typisk ligge 2-5°C under kondenseringstemperaturen når denne forlader kondensatoren. Man bør være opmærksom på at ønsket om en høj fremløbstemperatur på varmbæreren også kræver en høj kondenseringstemperatur.



Figur 5. COP som funktion af kondenseringstemperaturen for 1 trins ammoniak anlæg. Underkøling 0 °C og overhedning 2 °C. $\eta = 0,7$.

I Figur 5 ses COP for et 1 trins ammoniak anlæg. Figuren er medtaget for at illustrere effektiviteten af varmepumpen i ATEs systemer med lavtemperaturopvarmning. Tænkes varmeanlægget dimensioneret så fremløbstemperaturen er 40 °C i stedet for 50 °C bliver besparelsen til opvarmning med varmepumpen ca. 20 % ved en fordampertemperatur på 5 °C.

3 Kompressortyper og kapacitetsregulering

I mellemstore varmepumpesystemer anvendes typisk scroll- og stempelkompressorer. I store varmepumpeanlæg er det typisk stempel- og skruekompressorer. Der er stor forskel på, hvor energieffektivt de forskellige typer af kompressorer kapacitetsregulerer.

I varmepumpesystemer der står alene med opvarmningen vil der være varierende belastninger og krav til fremløbstemperaturen af varmen, så fremløbstemperaturen på varmbæreren eksempelvis tilpasses efter hvor koldt det er ude.

Det er normalt optimalt at regulerer kapaciteten ved at ændre på omdrejningstallet af kompressoren, da en rolig og stabil kørsel giver en energieffektiv drift. En masse start og stop af kompressoren vil resultere i en højere kondenseringstemperatur og en lavere fordampertemperatur, med et forøget energiforbrug til følge. Derudover vil de mange start og stop slide på kompressoren.

I et ATES system bør varmepumpesystemet designes efter høj energieffektivitet ved delast og varierende kondenseringstemperatur. Det optimale varmepumpesystem vil typisk være et system med flere kompressorer, hvoraf minimum en af kompressorerne er med VSD (Variable Speed Drive).

For specielt stempelkompressorer med VSD vil effektiviteten begynde at stige med faldende last, så den bedste COP ligger i området ved 50 % kapacitet. Dette bør udnyttes, eventuelt ved at vælge 2 frekvensregulerede kompressorer, der kører samtidig med samme belastning.

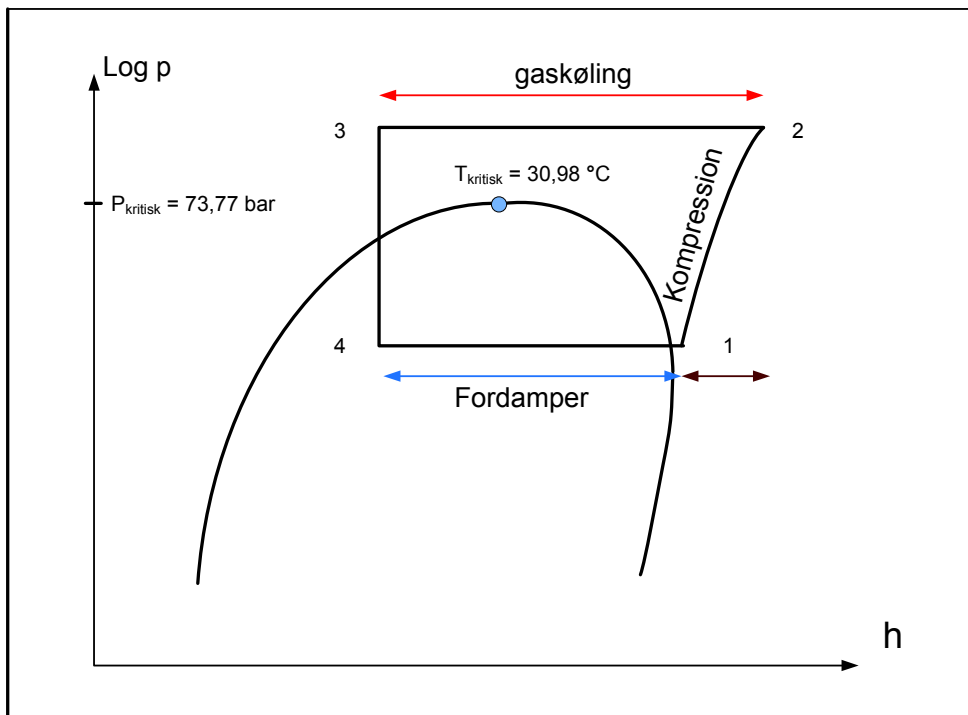
I stedet for en kompressor med VSD anvendes der tit en skruekompressor med gliderregulering. En skruekompressor med gliderregulering vil normalt være meget effektiv ved en høj belastning. Ved en belastning under 60-70 % af ydelsen begynder effektiviteten at falde markant og man bør overveje en anden løsning, hvis skruekompressoren kører i dette belastningsområde en stor del af tiden. En af skruekompressorens forer er dens evne til at ramme det ønskede temperatursetpunkt, som kan være meget kritisk ved specielt køleprocesser.

Det er i dag muligt, at få kompressorer monteret med VSD fra fabrikanten inden for ammoniak- og HFC-anlæg. For CO₂-anlæg er udvalget endnu ikke så stort.

Man skal formentlig eftermontere en frekvensomformer, hvis der ønskes omdrejningsregulering i et CO₂ anlæg.

4 CO₂ varmepumpeanlæg

Et CO₂ varmepumpeanlæg adskiller sig fra den tidligere omtalte varmepumpekreds ved ikke at kondensere når varmen afgives i kondensatoren. Kondensatoren kaldes derfor en gaskøler i et CO₂ varmepumpeanlæg. Grunden til at CO₂ ikke kondenserer skyldes, at der ved varmepumpedrift opereres med temperaturer over CO₂'s kritiske punkt (31°C/74 bar).

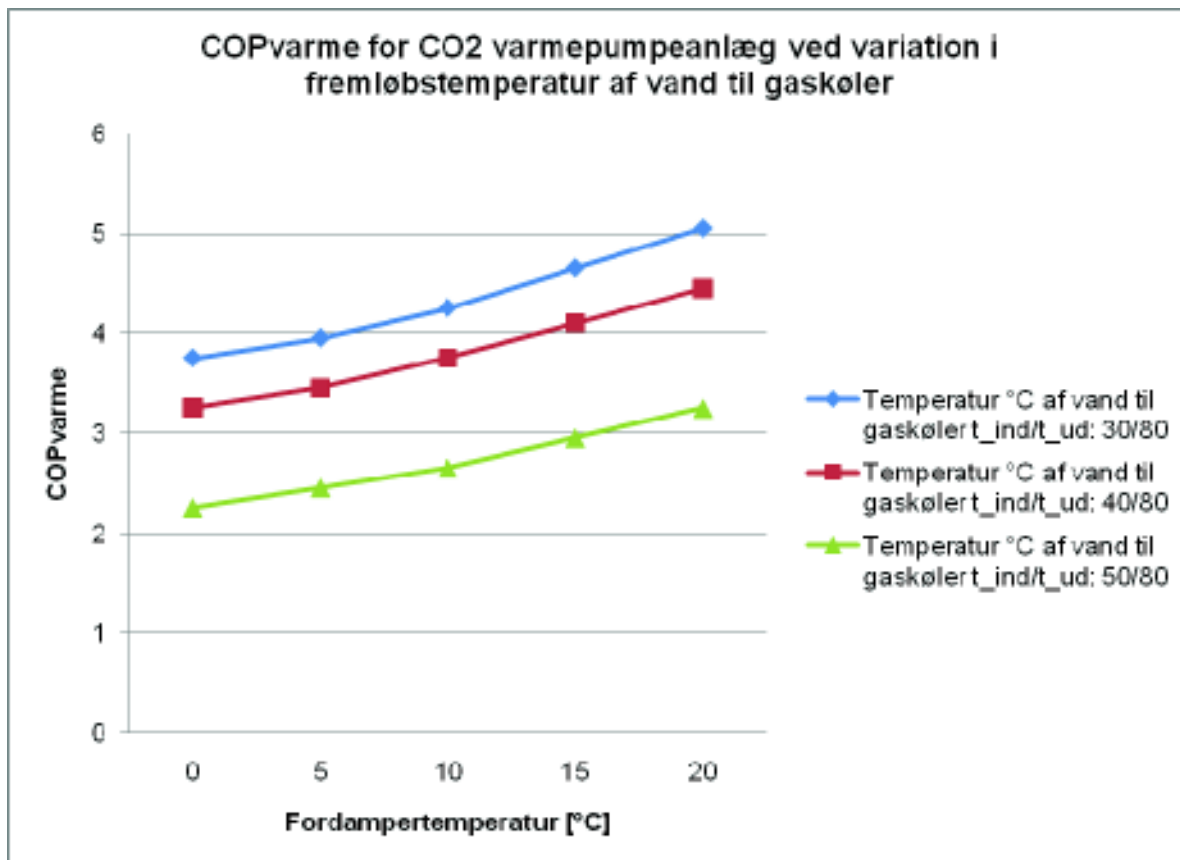


Figur 6. Log(p) – h diagram for CO₂ varmepumpe.

Effektivitet af CO₂ varmepumpe

CO₂ varmepumpens effektivitet afhænger primært af afgangstemperaturen fra gaskøleren (punkt 3 i Figur 6), jo lavere temperatur jo bedre effektivitet. Afgangstemperaturen på CO₂ fra gaskøleren vil i et vandbåren varmesystem afhænge af returtemperaturen.

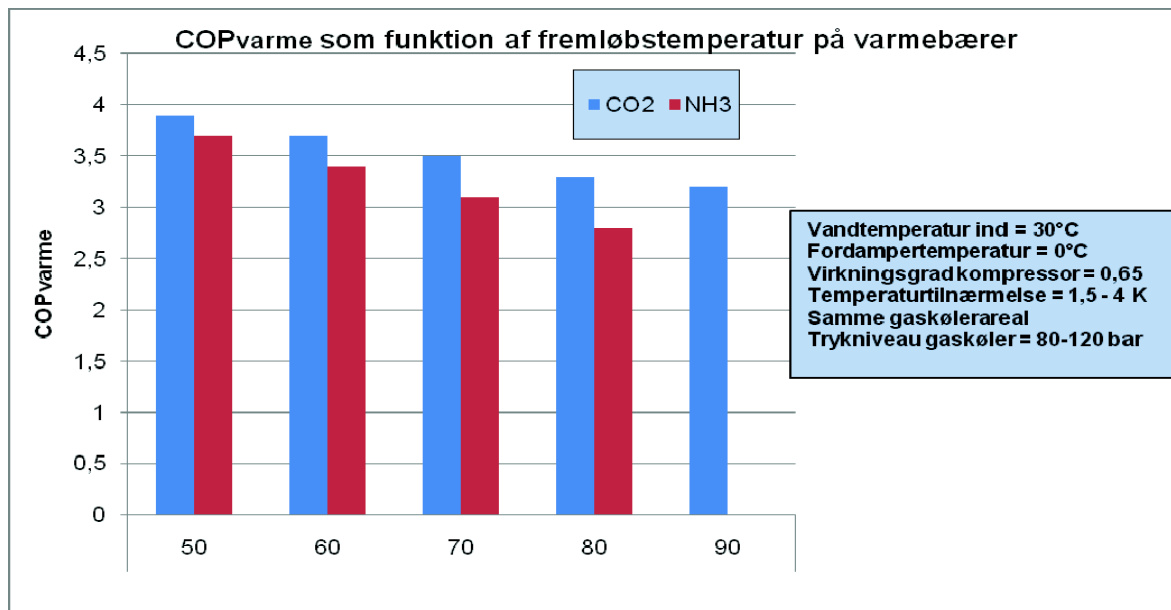
Er det muligt at få returtemperaturen fra varmesystemet ned på 30-35°C er det meget aktuelt at overveje en CO₂ varmepumpe.



Figur 7. COP_{varme} for CO_2 varmepumpeanlæg. Tal er beregnet med COOLPACK. Der er antaget en temperaturredifferens på 2 °C mellem afgang fra gaskøler og tilgang af vand. Virkningsgrad kompressor = 0,7.

I figur 7 ses COP_{varme} ved forskellige temperaturer af vand til gaskøleren. Ved at gå fra en returtemperatur af vandet på 30 °C til 40 °C ses et procentvist fald i effektiviteten på ca. 15 % ved en fordampertemperatur på 0 °C.

Ved at gå fra en returtemperatur af vandet på 40 °C til 50 °C ses et procentvis fald i effektiviteten på ca. 30 % ved en fordampertemperatur på 0 °C.



Figur 8. COP_{varme} for en ammoniak og CO_2 varmepumpe. Kilde: ADVANSOR energisystemer.

I Figur 8 ses COP_{varme} for varmepumper baseret på kølemidlet CO_2 og ammoniak (NH_3). Det ses at effektiviteten af CO_2 varmepumpen forholdsvis er bedre end NH_3 varmepumpen jo højere fremløbstemperatur, der ønskes. Det er derfor en fordel at vælge en CO_2 varmepumpe i det givne scenarie, hvis der ønskes høje fremløbstemperaturer på varmen.

Brugsvandopvarmning

En CO_2 varmepumpe kan med fordel anvendes til opvarmning af brugsvand. I nogle lande anvendes små CO_2 varmepumper allerede til brugsvandsopvarmning i private husholdninger. COP_{varme} til opvarmning af brugsvand (i et ATES system) ligger formentligt over 4. Det er tidligere omtalt at CO_2 vil være til applikationer større end husholdninger, men netop som brugsvandsvarmepumpe kunne CO_2 varmepumpen i meget små applikationer også blive aktuel i Danmark.

I ATES systemer kunne en CO_2 varmepumpe anvendes i kombination med en anden varmepumpe, der anvender et kølemiddel, der er optimalt ved de mest forekommende temperaturniveauer (hvis disse ikke passer til en CO_2 varmepumpe). Det bliver derved muligt at opvarme brugsvandet billigt, og det kan undgås at installere en anden energikilde eksempelvis en gaskedel til brugsvandopvarmning.

5 Anlægsudformning og økonomi

De fleste anlæg med kølemidlet ammoniak er med oversvømmede fordampere hvor hele fordamperearealet udnyttes effektivt. Disse anlæg har ofte en fordampertemperatur, der ligger tæt på den ønskede fremløbstemperatur af kølevandet, hvilket bl.a. skyldes ammoniakens gode varmeovergangstal. Dette betyder at den fordampede gas skal komprimeres fra et højere tryk, hvilket giver en bedre COP. Med CO₂ varmepumpeanlæg er det også muligt at opnå de tilsvarende egenskaber.

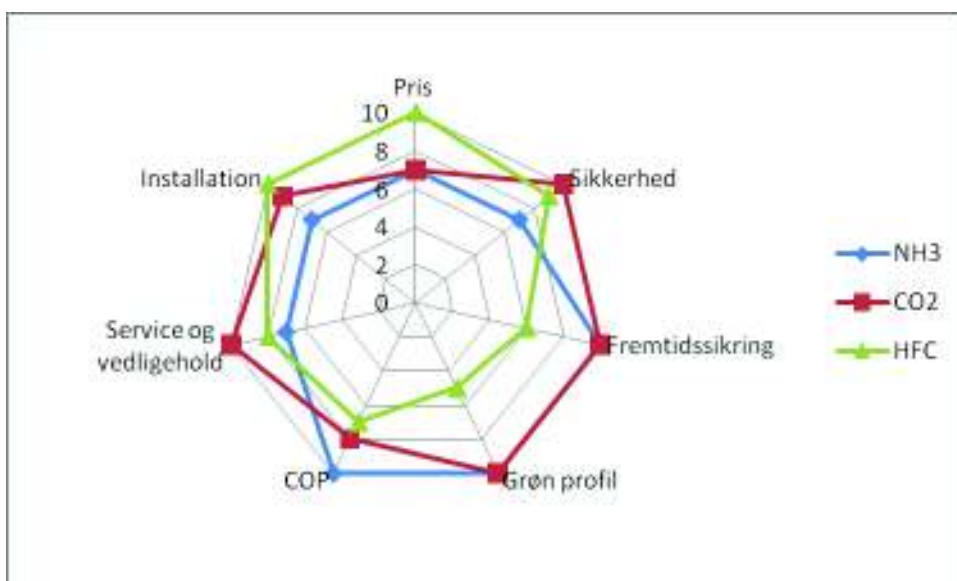
Pladsforhold kan, udover en ønsket temperatur på den varme side, også være afgørende for valget af kølemiddel i anlægget. Her kommer HFC anlæg til at fylde mest pga. af den maksimale fyldning på 10 kg. CO₂ anlæg er normalt de mest kompakte.

Erfaringsmæssigt er der følgende specifikke priser for forskellige typer af varmepumpeanlæg. Jo flere kW der installeres jo billigere bliver den specifikke kW pris.

Anlægstype	kr. pr. kW varmeydelse
	$T_e/T_c = 0/35 \text{ } ^\circ\text{C}$
Ammoniak	2.500 – 3.500
HFC	2.000 – 2.500
HC (kulbrinte)	2.500 – 3.000
CO ₂	2.500 – 3.500

Tabel 1. Specifikke priser for varmepumpeanlæg.

Udover investeringen i anlægget og energjudgifter vil der være udgifter til service og vedligehold. Der er specielt store udgifter til ammoniakanlæg, mens CO₂ anlæg har meget lave udgifter. I Figur 9 ses flere kriterier der bør overvejes, når der investeres i en varmepumpe. Opnåelse af "10" er godt.



Figur 9. Kriterier til valg af varmepumpesystem (Inspiration fra ADVANSOR)

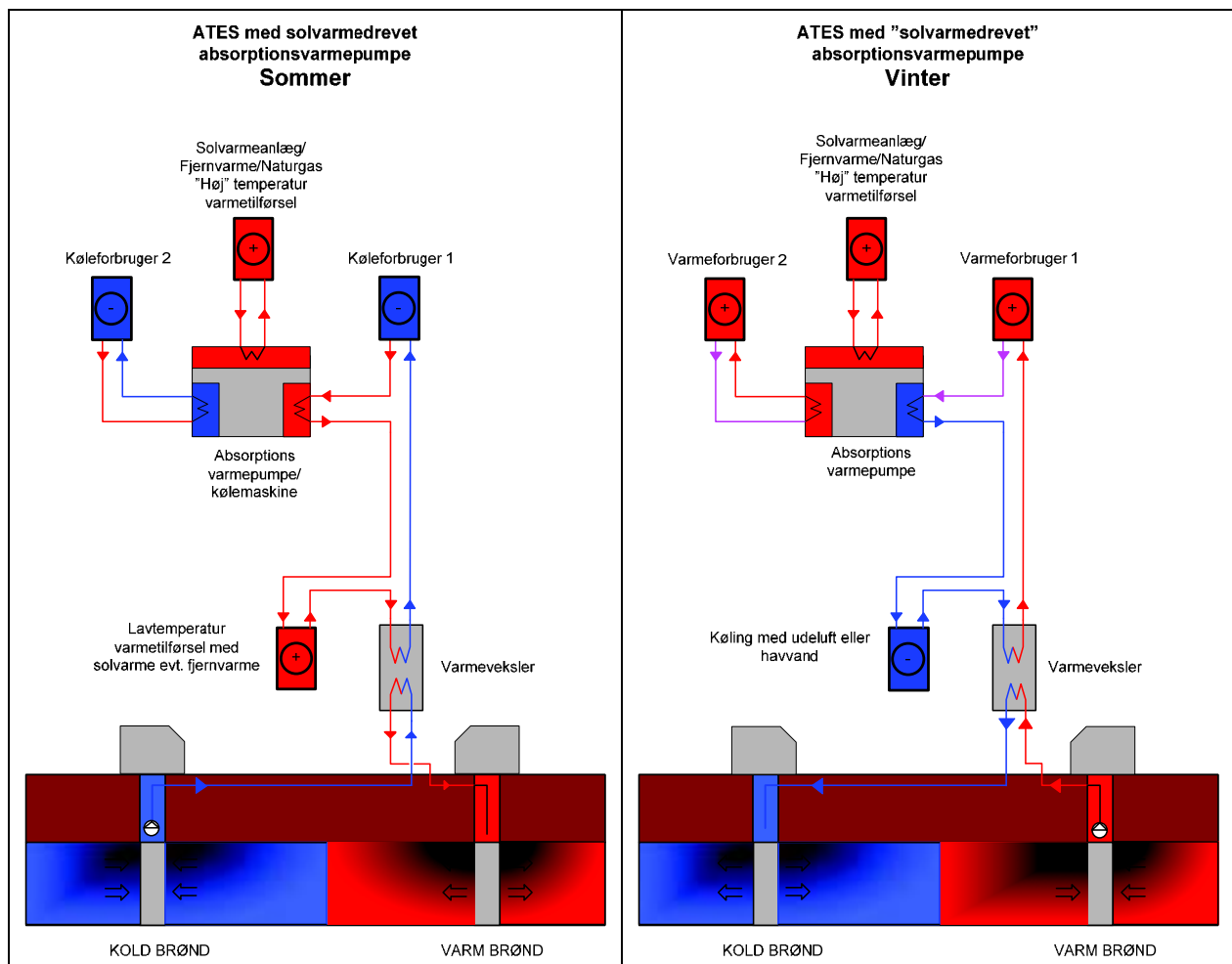
6 Varmedrevne varmepumper

Det er muligt at lave et varmedrevet varmepumpeanlæg baseret på et absorptionsprincippet. Anlægget tænkes drevet af et solvarmeanlæg kombineret med en anden energikilde eksempelvis fjernvarme. Rentabiliteten af anlægget vil afhænge meget af prisen på fjernvarme. Bemærk yderligere, at solfangerne også kræver et areal uden døre.

Et anlæg som dette vil typisk have et varmeforhold på ca. 0,6 ved temperaturniveauerne, som er aktuelle i et ATES system. Dvs. at for hver kW køl, der skal bruges hos køleforbrugeren, skal der betales med næsten dobbelt så meget varme ved den høje temperatur.

Anlægget er interessant ved komfortkøling, da størstedelen af kølebehovet normalt ligger i perioden om dagen med sol, hvor solvarmeanlægget kan anvendes.

En ulempe ved det viste anlæg kan være en dårlig afkøling af fjernvarmevandet. I mange forsyningsområder vil der være krav til afkølingen og en strafafgift, hvis denne er for lille.



Figur 10. Eksempel på varmedrevet absorptionsvarmepumpe.

7 Sammenfatning

Den ønskede temperatur på varmen fra et varmepumpeanlæg i et ATES system har afgørende indflydelse på valget af kølemiddel og effektiviteten af anlægget. Ved meget høje temperaturer på eksempelvis 80-90 °C kan CO₂ anlæg anvendes, her skal man dog være opmærksom på, at en god effektivitet for anlægget kræver at returtemperaturen efter opvarmning er lav, helst 30-35°C eller lavere. CO₂ anlæg kan også bruges selv om der ikke ønskes høj en temperatur på 80-90 °C, effektiviteten vil stadig afhænge af temperaturen på afgang af gaskøleren.

Varmepumper med ammoniak er normalt de mest effektive varmepumpeanlæg ved temperaturer op til 50-60 °C på den varme side.

Kompressorer til ammoniak findes i dag i alle størrelser monteret fra fabrikken med omdrejningsreguleret motor. Det er derfor muligt at dække mange kapacitetsbehov effektivt.

Det er også muligt at vælge løsninger med ammoniak, hvor fyldningen af ammoniak holdes på et minimum. Dette kan gøre, at anlægget kan placeres steder hvor en stor fyldning med ammoniak ellers ville forhindre dette.

Ulempen ved et ammoniak anlæg er en dyrere service og vedligehold. Samt sikkerhedsforanstaltningerne.

CO₂ varmepumper er meget effektive til opvarmning af brugsvand. I de ATES systemer hvor opvarmningen suppleres med en gaskedel til brugsvandsopvarmning og til at dække peaks på varmebæreren i årets koldeste perioder, kan det overvejes at installere en CO₂ varmepumpe i stedet.

De fleste ATES systemer vil have en størrelse, hvor der installeres flere varmepumper. Det mest optimale system fås normalt, når mindst en kompressorerne er med VSD regulering.

HFC-anlæg, der opføres i dag, må ikke være påfyldt mere end 10 kg kølemiddel, hvilket betyder at der normalt anvendes flere separate anlæg for at opfylde kapacitetsbehovet i større anlæg. De mange anlæg fordyrer både investeringen og serviceudgifterne, og anlæggene er pladskrævende. Effektiviteten bliver dårligere da små kompressorer normalt har en lavere effektivitet end store kompressorer.

Der er lånt illustrationer og tekst fra:

Rapport fra Center for Køle- og varmepumpe teknik: **"MINISKALA-VARMEPUMPE MED CO₂ SOM KØLE-MIDDEL TIL DECENTRALE KRAFTVARMEVÆRKER"**

Rapport kan findes på www.varmepumpeinfo.dk

Rapport fra Miljøstyrelsen: **"CO₂ som kølemiddel i varmepumper"**

Rapport kan findes på www.mst.dk

Rapport fra Teknologisk Institut: **"CO₂-SYSTEMER designmanual"**

Rapport kan findes på www.hfc-fri.dk

Slides fra ADVANSOR Energisystemers oplæg om : **"Køleanlæg og varmepumper med CO₂"**