

2006-07-19

1/7

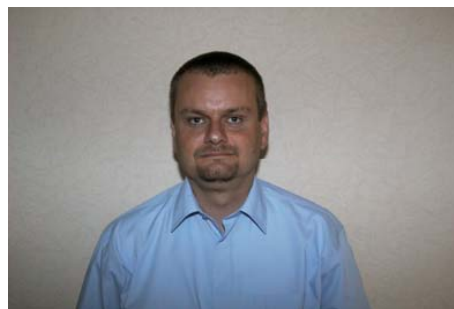
KGC/CSP

C:\Documents and Settings\CSp\Dokumenter\Artikel VP i DCKV til KV-nyt.doc

Udviklingsprojekt viser store muligheder for gasbesparelser ved anvendelse af ny varmepumpeteknologi



Kim G. Christensen
Teknologisk Institut



Claus S. Poulsen
Teknologisk Institut

Et udviklingsprojekt med deltagelse af Teknologisk Institut, Naturgas Midtnord/ HNG og Foreningen Danske Kraftvarmeværker er gennemført over de sidste 3 år. Projektet afsluttes i september i år, og denne artikel er den første af 2 artikler, der vil fortælle om projektets resultater. Gennem denne artikel vil projektets teoretiske resultater og konklusioner blive omtalt, mens den næste artikel vil fokusere på testresultater for den prototypevarmepumpe, der er bygget gennem projektet.

Ny varmepumpeteknologi gør varmepumper attraktive i forbindelse med decentrale kraftvarmeværker (DCKV). Udgangspunktet for anvendelse af varmepumper i fjernvarmesystemer er lavere varmepriser til forbrugerne gennem mindre gasforbrug og forøget fleksibilitet mellem produktion og forbrug af el og varme. Dette opnås gennem en kombination af gasmotor og varmepumpe.

Baggrunden for projektet

Projektet er gennemført under Energistyrelsens Forskningsprogram (EFP-2003), og formålet har været at udvikle en højtemperaturvarmepumpe med høj virkningsgrad (COP omkring 4) til anvendelse i decentrale kraftvarmeværker. Udgangspunktet for varmepumpen har været, at den skulle opvarme returvand fra ca. 40°C til en fremløbstemperatur på omkring 80°C. Varmekilden er i udgangspunktet røggassen fra gasmotorerne, der typisk efter LT-veksleren har en temperatur på omkring 55-60°C (normalt spildvarme), og som herefter afkøles til ca. 30°C af varmepumpen. Herved udnyttes røggassens latente varme gennem udkondensering af vanddamp, og anlæggets totale virkningsgrad hæves til ca. 102%.

Set ud fra en samfundsmæssig betragtning giver mekaniske varmepumper mulighed for at reducere problemerne omkring eloverløb og giver fleksibilitet til energimarkedet ved at indbygge en mulighed for at konvertere el til varme på en meget effektiv måde. Samtidig har anvendelsen af varmepumper i varmeproduktionen miljømæssige fordele, idet driften af varmepumpen vil reducere antallet af driftstimer på gasmotoren, hvilket fører til lavere gas-

forbrug og dermed lavere emissioner (CO, CO₂, NO_x, CH₄), og endvidere kan formaldehyd fjernes fra røggassen.

I Danmark er mere end 750 decentrale kraftvarmeværker i drift. De fleste er forpligtede til at producere varmt vand til lokale fjernvarmesystemer. Værkerne sælger samtidig elektricitet til elnettet, som produceres i forbindelse med varmeproduktionen. Varmepriisen til forbrugere er givet af omkostningerne til afskrivninger, gas og vedligehold fratrukket indtægterne ved el-salg, fordelt på den producerede varmemængde. Med de stigende gaspriser og de introducerede markedsvilkår for el-salg er det vigtigere end nogensinde at opretholde en effektiv og fleksibel varmeproduktion. Introduktion af varmepumper er et af midlerne hertil – endda et meget attraktivt middel!

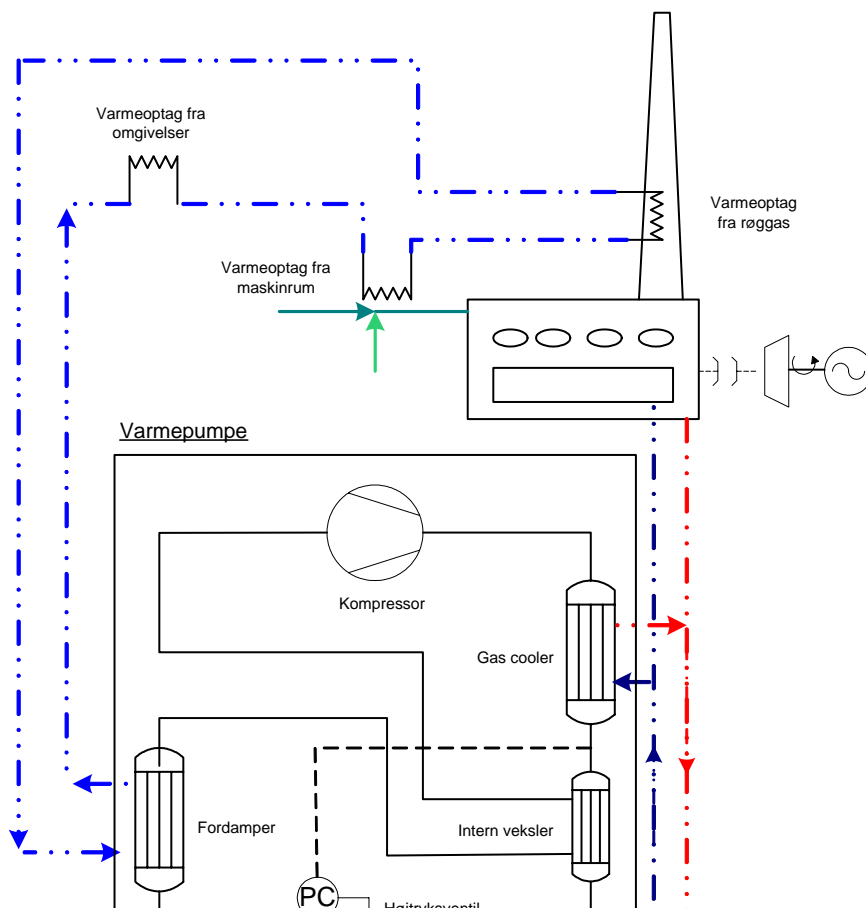
Varmepumpeteknologien

Varmepumper med traditionelle kølemidler er temperaturmæssigt begrænset opadtil af kølemidlets kondenseringstemperatur, således at der maksimalt kan produceres varmt vand ved 55-60°C. Det er imidlertid muligt at benytte CO₂ som arbejdsmedie i en transkritisk kredsproces, hvorved varmepumpens temperaturniveau kan øges til 80-90°C, samtidig med at effektfaktoren forbliver høj. Varmepumpen kan indsættes direkte som varmeproducerende enhed mellem retur- og fremløb i eksisterende anlæg uden at påvirke motorens øvrige termiske delsystemer (kølesystemer).

På figuren nedenfor ses varmepumpen parallelt integreret med vandsystemerne fra gasmotoren. Varmepumpen består af en gaskøler (varmepumpens varmeafgiver), fordamer (varmepumpens varmeoptager) samt en kompressor, en intern varmeveksler og styringsventil. På optagersiden optager varmepumpen spildvarme fra primært røggassen, men varme fra maskinrum og opgivelser kan også anvendes. Alternativt vil det være muligt at anvende en helt anden varmekilde – men jo højere temperatur varmekilden har, des højere bliver anlæggets effektivitet.

Varmepumpen arbejder i det overkritiske område for CO₂ med et tryk på 115 bar i gaskøleren. Fra gaskøleren ekspanderes CO₂ ned til 50 bar i fordamperen, hvor spildvarme optages.

Den transkritiske varmepumpe med CO₂ som arbejdsmedie er således et simpelt anlæg, men der stilles specielt store krav til design af anlæggets komponenter i relation til høje arbejdsstryk (op til 115 bar). Forskellen fra den konventionelle mekaniske varmepumpe ligger i, at den transkritiske varmepumpe ikke har kondensering ved



Figur 1: Principskitse af varmepumpe og integrationen i det decentrale kraftvarmeanlæg

afkøling af gassen på højtrykssiden, men udelukkende afkøling af gassen (ingen kondensering). Herved opstår der et temperaturglid/afkøling af kølemiddelgassen, der modsvarer det temperaturglid, der ligger på fjernvarmevandets opvarmning fra 40°C til 80°C.

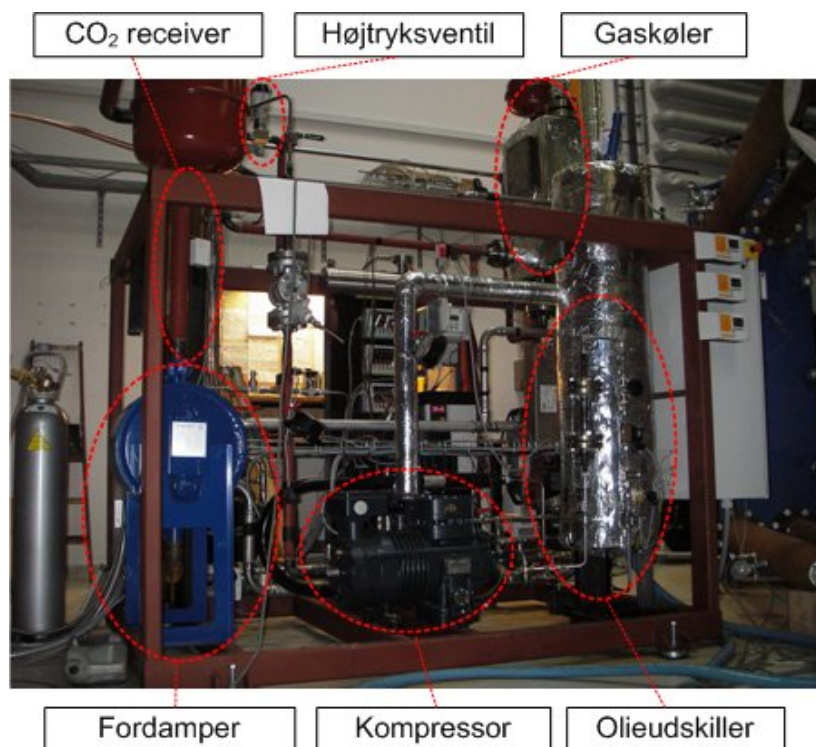
Ud over de høje arbejdstryk ligger der store udfordringer i det termiske design af gaskøleren samt styring af anlægget – beherskes disse discipliner, kan der opnås virkningsgrader for varmepumpen, der er langt bedre end alle andre varmepumpeteknologier.

Varmepumpen kan enten være drevet med el eller mekanisk. Imidlertid er energiafgiften på el så høj, at det bedre kan svare sig at koble varmepumpen mekanisk, hvilket kan implementeres på de fleste gasmotorer.

Prototypeanlægget

Projektet har taget udgangspunkt i en full-scale varmepumpe svarende til en 4 MW_e gasmotor. På denne størrelse gasmotor kan der hentes ca. 950 kW varme fra røggassen ved afkøling fra 60°C til 30°C. Samtidig anvendes 350 kW mekanisk effekt eller el til at drive varmepumpen, hvilket betyder, at der produceres 1.300 kW varme svarende til ca. 20% af gasmotorens egen varmeproduktion.

Prototypeanlægget er imidlertid noget mindre i størrelse med en samlet varmeydelse på ca. 60 kW, men principielt er anlægget opbygget fuldstændig identisk med principperne for full-scale-anlægget. Billedet nedenfor viser prototype-anlægget.



Figur 2: Billede af prototypeanlægget ved Teknologisk Institut. Hovedkomponenterne er markeret på billedet.

Prototypeanlægget er opbygget på en ramme med dimensionerne 2000x2000x1500 (hxlxb), hvilket giver god plads mellem komponenterne til eventuelle modifikationer, hvis det viser

sig nødvendigt. Komponenterne og rør er udformet i stål og sammenføjet ved svejsning. Den varme side af systemet (afgiversiden) er isoleret for at minimere varmetabet. Specielle pladevarmevekslere anvendes som fordamper og gaskøler, mens kompressoren er en semihermestempelkompressor. Systemets maksimale arbejdstryk er 120 bar på tryksiden og 60 bar på lavtryksiden. Højtryksventilen er en specielt udviklet elektronisk ventil fra Danfoss. Beholdere (olieudskiller og lavtryksreceiver) er svejste og godkendte til de høje tryk.

Teoretiske beregninger for varmepumpen

Virkningsgrad

Varmepumpens performance er beregnet i en standard driftssituation, hvor returvandet har en temperatur på 40°C og fremløbet en temperatur på 80°C. Endvidere afkøles røggassen til 30°C, hvilket giver en fordampertemperatur for varmepumpen på 20°C. Varmepumpen kører med et højtryk på 115 bar, og kompressoren forventes at have en isentropvirkningsgrad på ca. 65%. Under disse konditioner er varmepumpens COP 3,8, hvilket betyder, at varmeydelseren er 3,8 gange højere end den elektriske effekt, der tilføres. Denne virkningsgrad ligger langt over, hvad der er opnåeligt for konventionelle kompressionsvarmepumper, hvor COP ligger mellem 2,5-3.

Økonomi i varmepumper

Varmepumper giver anledning til store besparelser, men også ekstra omkostninger. Endvidere er der stor afhængighed af eksterne faktorer som afgifter, aftaler om el-afregning og el- og gaspriser, men også interne faktorer spiller en stor rolle såsom antal driftstimer, driftsprofil, el-virkningsgrad osv. Det er således i høj grad dynamiske markedsparametre, som er bestemmende for økonomien i anvendelsen af varmepumper DCKV. Imidlertid er der alligevel gennemført en analyse af besparelsesmulighederne.

Besparelserne udgøres af nedenstående poster, hvoraf posterne c) og d) afhænger af anlæggets størrelse og udførelse, og er således ikke opnåelige for alle værker.

Driftsbesparelser ved anvendelse af varmepumpe:

- a) Mindre naturgasforbrug
- b) Færre driftstimer på gasmotoren og dermed færre serviceomkostninger
- c) CO₂ kvotebesparelse (hvis anlægget er omfattet af kvoteordningen)
- d) Mulig indmelding på reservekraftmarkedet (for anlæg med mere end en motor).

En femte indtjeningsmulighed er, at gasselskaberne nu begynder at betale for energibesparelser (for at opfylde CO₂-forpligtigelser). Således vil den gasbesparelse, varmepumpen giver, kunne omsættes til et beløb ved indgåelse af en aftale med et gasselskab. Der dog endnu ikke erfaringer med dette koncept.

Ved samdrift af varmepumpe og gasmotoranlæg udgør varmepumpens el-forbrug (eller mekaniske effektforbrug) en tabt indtjeningsmulighed for værket. Herudover er der lovpligtigt 1 års serviceeftersyn på varmepumpen, som dog er en beskedent udgift i forhold til de øvrige poster.

Driftsomkostninger ved anvendelse af varmepumpe:

- e) Tabt indtægt ved el-salg

f) Årligt serviceeftersyn på varmepumpen.

Dette projekt har primært fokuseret på varmepumper, der kapacitetsmæssigt er tilpasset gasmotorer på 4 MWe svarende til en varmeydelse for varmepumpen på ca. 1,3 MW. Der er i projektet opstillet en beregningsmodel af den økonomiske besparelse ved anvendelse af mekaniske varmepumper.

Forudsætningerne er listet nedenfor:

El-pris (spot): 30 øre/ kWh

Gaspris: 2,45 kr./ Nm³

Samlede afgifter på gas: 2,24 kr./ Nm³ (energiafgift, CO₂-afgift og distribution)

Kvotepri: 150 kr./ tons CO₂

COP for varmepumpe: 3,8 –

El-virkningsgrad for gasmotor: 41%

Total virkningsgrad m/u VP: 91,3%/ 101,5%

Antal årlige driftstimer: 5000 timer

Beregningen er både gennemført for en varmepumpe, drevet af el-motorer (der skal betales energifgift af strømmen), og for en varmepumpe, der er drevet direkte af gasmotoren gennem en kobling. Resultaterne for beregningen ses nedenfor.

Tabel 1: Beregning af økonomien ved anvendelse af en varmepumpe på en 4 MWe gasmotor.

DCKV

Reference (4 MW el)		Gasmotor u. VP	Anlæg med varmepumpe		Anlæg med varmepumpe	
			Kompression	COP 3,8	Kompression	COP 3,8
Eleffekt	MW	4,00	<i>direkte drevet</i>	3,64	<i>el</i>	4,00
Indfyret	MW	9,75		9,75		9,75
Varmeeffekt	MW	4,90		6,26		6,26
Totalvirkn. grad	%	91,28		101,5		101,5
Driftstimer	h/år	5.000		3915,5		3915,5
N-gaspris	kr/Nm ³	2,450		2,450		2,450
N-gasafgift	kr/Nm ³	2,24		2,24		2,24
Køb: El-pris + afgift (75 øre)	kr/kWh	1,05		1,05		1,05
Gasforbrug	Nm ³ /år	4.431.818		3.470.579		3.470.579
Varmeproduktion	MWh/år	24.500		24.500		24.500
Elproduktion	MWh/år	20.000		14.264		15.662
Gas til el	kr/år	6.853.147		4.887.561		5.366.734
Gas til varme	kr/år	7.666.346		6.920.828		6.003.554
Gas i alt	kr/år	14.519.493		11.808.389		11.370.288
El-køb	kr/år	0		0		1.468.322
Motorservice	kr/MWh-el	40,00		40		40
Motorservice i alt	kr/år	800.000		570.548		626.484
Samlet driftsomkostning	kr/år	15.319.493		12.378.937		13.465.094
Salgspis for el	kr/MWh	300,00		300		300
Nettoudgift v. eltab	kr/år	9.319.493		8.099.827		8.766.464
Pris CO ₂ -kvote	kr/ tons	150		150		150
Indtægt CO ₂ -kvote	kr./ år			282.604		282.604
Besparelse	kr/år			1.502.270		835.634
				16%		9%

Tabellen oven for viser 3 kolonner med beregnede værdier. Den første af disse er data for en gasmotor uden varmepumpe, mens 2. og 3. kolonne er data for en gasmotor med mekanisk varmepumpe, hhv. direkte drevet og elektrisk drevet.

Beregningen viser først og fremmest, at varmeproduktionen er bibeholdt (24.550 MWh/år) for alle 3 scenarier. Driftstimerne på gasmotoren er imidlertid reduceret for systemerne med varmepumpe (5000 timer reduceres til 3915 timer), da varmepumpen nu står for en del af varmeproduktionen, og derfor er gasforbruget reduceret fra ca. 4.4 til ca. 3.5 mio. Nm³. Samtidig er totalvirkningsgraden for værket væsentligt forøget. Pga. af den reducerede køretid af gasmotoren er el-produktionen fra værket endvidere reduceret. Denne reduktion for-

øges, hvis varmepumpen endvidere er drevet af gasmotoren (den mekaniske effekt tages fra el-produktionen). I tilfældet hvor den eldrevne varmepumpe anvendes, fås ikke dette ekstra tab af el-produktion, men til gengæld skal den elektricitet, der anvendes til driften af varmepumpen, købes på nettet og vil være belagt med energifgift. Denne forskel mellem de 2 varmepumpesystemer betyder - meget firkantet - at det ikke er rentabelt at anvende el-drevne varmepumper inden for DCKV – energifgiften på el er simpelthen for høj sammenlignet med energifgiften på gas. Dette betyder, at varmepumper skal kobles direkte på gasmotoren.

Konklusionen på beregningen er, at der ligger et potentiale for direkte drevne varmepumper i forbindelse med DCKV med en økonomisk besparelse på ca. 1.5 mio. kr. årligt. Heraf kommer ca. 230.000 kr. ved besparelse på serviceomkostningerne på gasmotoren, 280.000 kr. fra gevinsten i forbindelse med CO₂-kvoter og resten fra besparelsen på gaskøb. Denne besparelse vil give en tilbagebetalingstid på 3-4 år for et decentralt kraftvarmeværk, og det må jo siges at være yderst rentabelt.

Herudover vil der kunne komme ekstra økonomisk gevinst, hvis varmepumpen anvendes til indmeldelse på op-/nedregulermarkedet, og hvis gasselskabernes betaling for CO₂-besparelser anvendes. Den sidste del vil være et engangsbeløb på omkring 280.000 kr., der udbetales året efter idriftsættelsen.

Følsomhedsanalyse:

Beregningen er selvfølgelig baseret på en række forudsætninger, hvor de forskellige indgående parametre kan variere. Der er en række eksterne parametre, som vil have betydning for besparelsen ved anvendelse af varmepumpen (direkte drevet). En analyse af følsomheden giver følgende resultater. 10% reduktion af gasprisen bevirker, at besparelsen reduceres med 16%. 20% forhøjelse af el-prisen (spot) bevirker, at besparelsen reduceres med 23%, men i dette tilfælde vil CO₂-kvoterne sandsynligvis udligne en del af differencen, da prisen på CO₂-kvoter også vil stige når el-prisen stiger. Endvidere er besparelsen proportional med driftstimerne for varmepumpen.

Interessen for varmepumper og lovgivningen

Der er i løbet af projektet gennemført en spørgeskemaundersøgelse, hvor nogle få spørgsmål blev stillet til 65 værker. Denne spørgeskemaundersøgelse er siden blevet udbygget af en mere omfangsrig undersøgelse, foretaget gennem et phd-projekt ved AAU.

De 65 adspurgte værker har alle installerede gasmotorer med el-effekter over 3000 kW og omfatter 12 industrielle værker og 53 DCKV. Spørgeskemaet gav en række informationer omkring varmepumper, og de gevinster de kunne have for det kv-værk.

Af de adspurgte responderede 76% på spørgeskemaet, og 71% af disse viste stor interesse for varmepumperne og ville gerne have mere information. En gennemgående tendens var, at viden omkring varmepumper ikke generelt er til stede hos værkerne, hvorfor beslutninger omkring anvendelse af denne teknologi vanskeliggøres. Endvidere viste undersøgelsen også, at værkerne er meget interesserede (ca. 50%) i at gennemføre demonstrationsprojekter, hvor den nye varmepumpeteknologi udstilles og undersøges i en reel installation. Det er blandt andet resultaterne af denne undersøgelse, der nu betyder, at nærværende projekt forsøges videreført i et demonstrationsprojekt med støtte fra energinet.dk.

En anden barriere for anvendelse af varmepumper er en svært gennemskuelig og til tider også ulogisk lovgivning på området for DCKV. For el-drevne kompressionsvarmepumper vil det være nødvendigt at købe elektriciteten på nettet (spot). Principielt kan man sige, at

værket jo selv producerer elektriciteten, men alligevel skal der betales afgifter for den købte el. Ved anvendelse af varmen til rumopvarmning skal der betales energiafgift, CO₂-afgift, PSO-afgift, distributionsafgift og nettariffer. Det viser sig hurtigt, at afgifterne på den købte el i forbindelse med rumopvarmning er så høj, at det ikke kan svare sig at drive varmepumpen elektrisk, og derfor vil varmepumpen blive drevet direkte af gasmotoren, hvilket alt andet lige er en dyrere løsning.

Regnestykket er forsøgt forklaret nedenfor. Energi- og CO₂-afgifter på elektricitet er sammenlagt 62,6 øre/ kWh el. Sammenlignet er energi- og CO₂-afgifterne på gas 20,3 øre/ kWh. Pr. kWh gasforbrug (beregnet ved nedre brændværdi) fås ca. 0,35 kWh el og 0,57 kWh varme (en total virkningsgrad på 92%). Hvis afgiften fordeles mellem både varme og el, fremgår det, at de samlede afgifter på el ligger nede omkring 22 øre. Det er netop denne afgiftsforskel, der gør, at det kan betale sig at koble varmepumpen direkte på gasmotoren.

At lovgivningen skal gå hen og blive en barriere for anvendelsen af varmepumperne i DCKV er meget ærgerligt, da denne anvendelse ville kunne give en socioøkonomisk gevinst på ca. 1 mia. kr. om året og en miljømæssigt gevinst på 1 mio. tons CO₂ årligt svarende til 2% af Danmarks totale CO₂-emission. Det var netop disse samfundsøkonomiske perspektiver, der lå til grund for de ændringer af miljø- og energiafgiftslovene, L81, som Folketinget vedtog den 16. december 2005. Afgiftsændringen skal bidrage til at løse det problem, at elproduktionen i perioder overstiger den indenlandske efterspørgsel. Imidlertid har L81 ikke den ønskede effekt for varmepumperne, da afgiftslempelsen gennem en maksimal tilladelig afgift ligger på varmen og ikke på el. Endvidere gælder lovgivningen kun, når gasmotorerne ikke kører. Projektgruppen har gennem hele forløbet påvirket beslutningsprocessen politisk og undersøger muligheder for tilkobling og styring af varmepumpen således, at investeringen i ny varmepumpeteknologi kan blive mest rentabel. Dette arbejde vil også blive fortsat i et nyt demonstrationsprojekt.

Konklusioner

Resultatet af det gennemførte projekt viser, at der er store økonomiske og miljømæssige besparelser at hente ved anvendelse af varmepumper i DCKV. Den økonomiske besparelse ligger på ca. 1,5 mio. kr. årligt og vil give en tilbagebetalingstid på ca. 3-4 år. Imidlertid er der for denne besparelse forudsat, at varmepumpen kobles på gasmotoren direkte, da afgifterne på el ellers ødelægger hele økonomien. Endvidere har projektet vist, at det er muligt at anvende den nye CO₂-teknologi i højtemperaturvarmepumper, hvor COP-værdier på omkring 3,8 er opnåelige. Der er bygget et prototypeanlæg, og måleresultater for dette anlæg vil blive formidlet gennem den næste artikel i det næste nummer af KV-nyt.

Resultaterne af dette F&U-projekt er så lovende, at et demonstrationsprojekt vil blive ansøgt under energinet.dk med henblik på at videreføre og demonstrere forskningsresultaterne fra EFP-projektet. Demonstrationsprojektet skal vise, at CO₂-baserede varmepumper kan forbedre økonomien for decentrale kraftvarmewærker væsentligt og samtidig forøge fleksibiliteten på energimarkedet mellem el og varme, således at de samfundsmæssige tab kan minimeres, og udbygningen af VE forøges til ca. 40%. Den nye varmepumpeteknologi sammen med nye integrations- og styringsprincipper skal afprøves i projektet.

Deltagere i projektet vil være Teknologisk Institut, Ålborg Universitet, Foreningen Danske Kraftvarmewærker, Advansor (udførende anlægsbygger), Dansk Fjernvarme og Energi- og miljødata samt en række anlægsværter.