



Overvågning af inddamperen under opstart af undersøgelser

Slutrapport

Vanddampbaserede varmepumpesystemer (SteamHP)

Udviklingsprojekt støttet af ELFORSK (nr. 350-052)



**DANISH
TECHNOLOGICAL
INSTITUTE**



Slutrapport

for ELFORSK-projektet
'Vanddampbaserede varmepumpesystemer' (SteamHP).



Udarbejdet af:

Teknologisk Institut
Kongsvang Allé 29
8000 Aarhus C

Køle- og Varmepumpeteknik
Frederik Holdt, konsulent
Lasse Søe, projektleder

Udarbejdet i samarbejde med:

Rotrex A/S
Johnson Controls
Krammer Innovation
Pentair

30-04-2022

1. Sammenfatning

Nærværende projekt har haft til formål at udvikle og modne vanddampbaserede varmepumpesystemer til højtemperaturapplikationer. Projektet er baseret på efterspørgsel fra industrien, og det er opbygget med teoretisk udvikling og praktisk undersøgelse.

Projektet tager blandt andet udgangspunkt i to tidligere ELFORSK-projekter (*ELFORSK 343-005: "Industrielle varmepumper for høje temperaturer"* (2011 – 2012, Rotrex, Weel og Sandvig, Dansk Energianalyse AVS) og *ELFORSK 344-009: "Udvikling af Rotrex-turbokompressor til vanddampkompression"* (2012-2018, Teknologisk Institut, Weel og Sandvig, Rotrex, Pentair, Krammer Innovation, Johnson Controls, Spirax Sarco, SE Rådgivning)), hvori de indledende undersøgelser og udviklinger forud for dette projekt er foregået.

Projektet er især en naturlig efterfølger på ELFORSK-projektet 344-09 "Udvikling af Rotrex-turbokompressor til vanddampkompression", hvori det er vist, at det både er økonomisk og teknisk muligt at fremstille en vanddampkompressor, der er billig, effektiv og kompakt. I forlængelse heraf blev det også vist i projektet, at der er behov for mere udvikling for at modne produktet til markedet. Derfor vil projektet fokusere på netop denne færdigudvikling, dokumentation og verifikation.

Vanddamp er optimalt til varmepumpesystemer af en lang række årsager, og det er både rent kølemiddelteknisk og miljømæssigt et optimalt kølemiddel til højtemperaturvarmepumper. Projektet har dels resulteret i en teknisk udvikling af Rotrex' vanddampkompressor med nye komponenter, ligesom et testanlæg til højtemperaturvarmepumper med vanddampkompressorer er opbygget hos Teknologisk Institut. Projektet har haft til formål gennem teoretiske analyser og målinger i laboratoriet at medvirke til at sikre, at fremtidige højtemperaturvarmepumpesystemer baseret på vanddamp til industrien bliver udviklet og afprøvet. Det har dermed været et erklæret mål for projektet at bringe de nødvendige komponenter tættere på markedet - og til at løse opgaven er de vigtigste aktører inden for området en del af projektet. Både udviklingen af komponenterne til vanddampkompressoren og opbygningen af anlægget er gennemgået i nærværende rapport med detaljerede beskrivelser, ligesom generelle beskrivelser af vanddamp som kølemiddel er lavet. Projektet har dels til formål at øge fokus på vanddampbaserede højtemperaturvarmepumper og dels at udvikle komponenter og anlæg, således at modningen af teknologien accelereres.

Projektets målgruppe er primært industrivirksomheder, leverandører af varmepumpesystemer og energirådgivere, og projektet er finansieret af ELFORSK-programmet med projektnummer 350-052.

Projektgruppen består af Teknologisk Institut, Rotrex AVS, Johnson Controls, Krammer Innovation og Pentair.

Indholdsfortegnelse

1. Sammenfatning	3
2.1. Generelt om projektet	5
2.1.1. Projektpartnere	5
2.1.2. Projektindhold	6
2.1.3. Projektets relevans	7
2.1.4. Arbejdsprocessen	8
2.1.5. Erfaringer fra projektet	8
3. Komponentudvikling af Rotrex-kompressor	9
3.1. Verifikation af levetid af gear	9
3.2. Levetidstest af kompressor i luftprøvestand	9
3.3. Modificering og klargøring til vanddamp	10
4. Test med damp	12
4.1. Opbygning af teststand – anlægsdesign og kalkulation	13
4.2. Opbygning af teststand – fysisk gennemgang	15
4.3. Gennemgang af udførte tests	20
5. Perspektivering	20
6. Konklusion og diskussion	21
7. Conclusion and discussion	22

2.1. Generelt om projektet

Herunder følger generel information om projektet og projektdeltagerne.

2.1.1. Projektpartnere

Projektet er lavet af en række projektpartnere, som kort beskrives herunder.

Johnson Controls er én af de store globale leverandører af industrielle køle- og varmepumpeanlæg til en bred vifte af markedssegmenter, og de besidder stor knowhow i både anlægsopbygninger og interessante kunder. De har både nationale og internationale rådgivere med ekspertise i design, salg og service af disse industrielle anlæg. Johnson Controls ser muligheder i at udskifte nuværende olie- og gaskedler til dampproduktion med højtemperaturvarmepumper.

Rotrex står for udviklingen af kompressoren, og de har stor viden omkring denne og de muligheder og begrænsninger, som kan opstå med brugen af denne type kompressor. Rotrex står for leverancen af den komplette kompressorenhed, når denne skal drives mod markedet. Rotrex ønsker at udvide deres produktlinje med egenproducerede kompressorer til vanddamp.

Krammer Innovation designer, sælger og servicere små inddampersystemer med mange anvendelser til industrielle kunder. Krammer Innovation har en stor kontakt med slutbrugerne, og her er der identificeret store behov og ønsker om at eftermontere dampkompressorer på eksisterende anlæg såvel som nye anlæg. Krammer Innovation har især set en stor efterspørgsel på det tyske marked, hvor der hvert år installeres 200-250 inddampere med MVR i det relevante kapacitetsområde. Krammer Innovation er i løbet af projektet gået konkurs efter komplikationer forårsaget af Covid-19.

Pentair er globalt markedsførende indenfor udvikling, design, salg og levering af effektive CO₂-produktionsanlæg, og de besidder en stor erfaring i at lave komplekse og store procesanlæg. Pentair forventer at kunne installere 5-10 kompressorer i små anlæg pr. år. Potentialet er højere, især for større anlæg, men det kræver verificering af levetid og serviceintervaller.

Teknologisk Institut har en omfattende erfaring indenfor udviklingsprojekter med køle- og varmepumpeanlæg. Herunder er der især erfaring med koblingen mellem laboratoriearbejdet og reelle field-tests med verificering og implementering af nye teknologier. Teknologisk Institut har 25 års erfaring med udvikling af turbokompressorer, som dette projekt har sit primære fokus på.

2.1.2. Projektindhold

Projektet er opdelt i seks arbejdsplaner, der skal sikre et tilstrækkeligt bredt fagligt arbejdsområde med den nødvendige projektstyring og publiceringer. Herunder er hver arbejdsplan beskrevet.

Arbejdsplan 1: Projektledelse. Foregår løbende og dækker projektopstart, projektledelse, halvårige møder og generel styring af projektet. Arbejdsplanen er aktiv gennem hele projektet og sikrer, at projektet gennemføres på korrekt vis.

Arbejdsplan 2: Komponentudvikling og verifikation af levetid af gear. Arbejdsplanen fokuserer på verifikation af kompressorlevetider (udføres hos Rotrex i luftprøvestand), udvikling af akseltætning, kortlægning af temperaturforhold i kompressoren (olietemperatur) samt designmodificeringer til inddampere for sammenbygning med den udviklede kompressor.

Arbejdsplan 3: Test med damp. Opbygning af teststanden hos Teknologisk Institut foregår i denne arbejdsplan. Dette inkluderer installation af den modificerede inddampere, herunder indkøring og funktions- og ydelsestest.

Arbejdsplan 4: Detaljeret anlægsdesign og kalkulation. I denne arbejdsplan udarbejdes et detaljeret anlægsdesign, som kan testes.

Arbejdsplan 5: Undersøgelse af længere drift med damp. Denne arbejdsplan fokuserer på en længere test af anlægget, hvor kompressoren testes under samme konditioner over flere dage for at undersøge, hvordan driften ændres over tid.

Arbejdsplan 6: Formidling. Denne arbejdsplan foregår løbende gennem hele projektet og dækker over publicering af artikler, temadage og generel opmærksomhedsskabelse for projektet. Arbejdet foretages af alle parter i relevante omgangskredse.

Formålet med projektet har været justeret i løbet af projektarbejdet. Dette skyldes dels, at der har vist sig at være et større behov for et teoretisk fokus på en række af problemstillingerne i form af produktudvikling, ligesom Covid-19 har haft stor betydning for mulighederne for fysisk test. Dette har forsinket projektet, da en projektpartner har været lukket ned under pandemien, ligesom projektpartneren senere er lukket ned.

2.1.3. Projektets relevans

Procesindustriens varmforsyning er i dag primært dækket af fossile brændsler, som det bliver mere og mere relevant at fortrænge af en lang række årsager. Projektet griber ned i denne udvikling af fremtidens fossilfrie energisystem med fokus på varmeproduktion med udgangspunkt i omdannelsen af el til varme. Dette giver store muligheder for varmepumper, der især kan være nyttige ved procestemperaturer over 100 °C med en række spildvarmekilder, der kan udnyttes.

Varmepumpeteknologien er i dag i en rivende udvikling, og der er en lang række forskningsprojekter, der fokuserer på at udvide varmepumpernes arbejdsområde og stabilitet. Dette skyldes, at der er en kraftig interesse fra industrien, som søger efter muligheder for at fortrænge fossile brændsler. Muligheden for at producere varme med varmepumper ved høje procestemperaturer eksisterer allerede i dag, men varmepumper benytter teknologier såsom ammoniak-vand-hybrid-processen, der er bedst egnet til systemer, hvor både varmekilde og varmeaftaget har et højt temperaturglid.

En del industriprocesser har dog ikke mulighed for at benytte denne opvarmning med højt temperaturglid, og der er derfor stor efterspørgsel på højtemperaturvarmepumper, som kan opfylde industribehovene med et lavere temperaturglid (eksempelvis kogning, inddampning og destillering). Derudover er vanddamp som medie billigt, miljøvenligt og udbredt som varmebærende medie i industrien, hvorfor barriererne ved implementering i industrien er mindre både i forhold til eksisterende komponenter og generel kundeaccept af mediet.

Projektet bygger videre på to tidligere ELFORSK projekter og et nuværende Horizon 2020 projekt:

- ELFORSK 343-005: "Industrielle varmepumper for høje temperaturer" (2011 – 2012, Rotrex, Weel og Sandvig, Dansk Energianalyse A/S)
- ELFORSK 344-009: "Udvikling af Rotrex-turbokompressor til vanddampkompression" (2012-2018, Teknologisk Institut, Weel og Sandvig, Rotrex, Pentair, Krammer Innovation, Johnson Controls, Spirax Sarco, SE Rådgivning)
- Horizon 2020: "DryFiciency" (2018 - , Agrana, AIT, Bitzer, Chemours, EHPA, EPCON, FUCHS, Rotrex, RTDS, Scanship, Sintef, Viking Heat Engine, Wienerberger, HEATEN)

I projekterne har Rotrex-gearet været basis for turbokompressoren, da det har gjort det muligt at opnå de høje rotationshastigheder, der er nødvendige for turbokompressorteknologien. Den nuværende version af kompressoren stammer fra DryFiciency projektet, og i den seneste version er motoren direkte integreret med gearet, dvs. der er ingen drivremme eller lignende.

Valget af vand som medie for højtemperaturvarmepumper har nogle umiddelbare miljømæssige fordele, men er også velegnet ud fra et teknisk synspunkt. Den kritiske temperatur er på 371 °C, dvs. damp kan benyttes til varmepumper med temperaturniveauer helt op til over 300 °C. De fysiske egenskaber bevirker desuden typisk 10–20% bedre COP end de kulbrintebaserede kølemidler uafhængig af systemvirkningsgraden.

For industrien er det en fordel, at damp allerede er et kendt og udbredt medie i energisystemerne i kraft af centrale kedelfyrede dampanlæg. Så der findes derfor allerede velafprøvede og modnede komponenter som varmevekslere, ventiler, instrumenter, beholdere, rør og samlinger, etc., som er umiddelbart anvendelige i et varmepumpesystem baseret på damp.

Kompressoren er den manglende komponent til varmepumpen, og det skyldes først og fremmest, at langt størstedelen af de kendte og udbredte kompressorteknologier som stempel, skrue og scroll alle er oliesmurte. Det ekskluderer umiddelbart vand eller damp som medie, da blandbarheden af vand og olie er dårlig. Så enten skal den kendte teknologi derfor tilpasses med passende tætninger og vandindsprøjtning, eller der skal benyttes en teknologi, der ikke er afhængig af oliesmøring. Det gælder netop turbokompressorer, hvor selve komprimeringen af mediet ikke kræver nogen form for smøring, og de tætninger, der adskiller leje- og motorsmøringen fra mediet, er velkendte.

Projektet er med andre ord utroligt relevant og har stor betydning for omstillingen af energiprocesserne i industriprocesser, og projektet har været fulgt af en lang række interessenter i løbet af perioden. I løbet af projektet har en række omstændigheder betydet, at projektets relevans er steget, og det er projektpartnerenes forventning, at resultaterne fortsat er af stor relevans for industrien.

2.1.4. Arbejdsprocessen

Arbejdet i projektet har haft en opdeling mellem det teoretiske med komponent- og systemudvikling og det praktiske med de fysiske tests. Alle arbejdsprocesser har fokuseret på at udvikle og dermed modne vanddampkompressoren, således at den kommer tættere på markedet. Ligeledes har der i projektet været fokus på at formidle denne udvikling, således at markedet er bekendt med udviklingen.

Processerne har været langvarige på grund af tekniske udfordringer, Covid-19 og en konkurs, hvor især de sidste to dele har gjort fysiske møder og tests besværlige, hvorfor de har været rykket til foråret 2022.

I de følgende afsnit gennemgås udviklingen i projektet, som er opdelt i selve komponentudviklingen af kompressoren og anlægsudviklingen og -opbygningen.

2.1.5. Erfaringer fra projektet

Projektet har, som tidligere nævnt, budt på en række udfordringer. Disse udfordringer har dels forsinket projektet, ligesom de har udfordret de resultater, som projektet har ønsket i forbindelse med ansøgningen.

Covid-19 har især været en udfordring i projektet, da det har besværliggjort fysiske møder og en lang række tests, da partnerne i projektet har været nødsaget til at aflyse al fysisk kontakt. Covid-19 har endvidere betydet, at en af de vigtigste partnere i forbindelse med opbygningen af anlægget er gået konkurs – hovedproblemet har ikke kun været selve konkursen, da Teknologisk Institut delvist kunne overtage disse opgaver, men det har især været problematisk, fordi konkursen blev trukket i langdrag, så hele projektet skulle være i standby, indtil der kom en klar udmelding omkring partnerens situation. Til fremtidige projekter kan det være fordelagtigt at lave en 'nødplan', hvis noget sådant skulle ske igen, selvom de ydre omstændigheder kan være svære at forudse.

3. Komponentudvikling af Rotrex-kompressor

Komponentudviklingen i projektet har især haft fokus på at udvikle kompressoren og klargøre denne til drift med vanddamp. Rotrex har valgt at tage udgangspunkt i deres standardkomponenter, som de har modificeret for at nedbringe slid og øge levetiden og holdbarheden for komponenterne i kompressoren. Processerne er langvarige og stadig igangværende, men i nærværende afsnit er det muligt at læse om den udvikling og det arbejde, der har været i forbindelse med projektet med at få kompressoren tættere på det kommercielle marked.

3.1. Verifikation af levetid af gear

Rotrex har udviklet et traktionsgear på baggrund af deres eksisterende gear, som er designet og verificeret til automotive applikationer. Det nyudviklede traktionsgear er yderligere optimeret til øget levetid, idet stressniveauet for de interne gearkomponenter er reduceret, så det matcher den nødvendige kraftoverførselsevne. Traktionsgearets funktion og kraftoverførselsevne er verificeret gennem specifikt designede funktions- og sliptests.

3.2. Levetidstest af kompressor i luftprøvestand

Kompressoren er levetidstestet hos Rotrex i en luftprøvestand under ekstreme forhold, der skal simulere en levetidsbelastning for kompressoren. Kompressoren er testet ved maksimal hastighed og belastning, hvor nøgleparametre er undersøgt. Testen i luftprøvestanden er første skridt i udviklingen, og den vurderes endnu kun som indikativ, idet vanddamp belaster kompressoren anderledes og ved højere temperaturer, hvorfor den egentlige systemtest foretages i vanddamp.

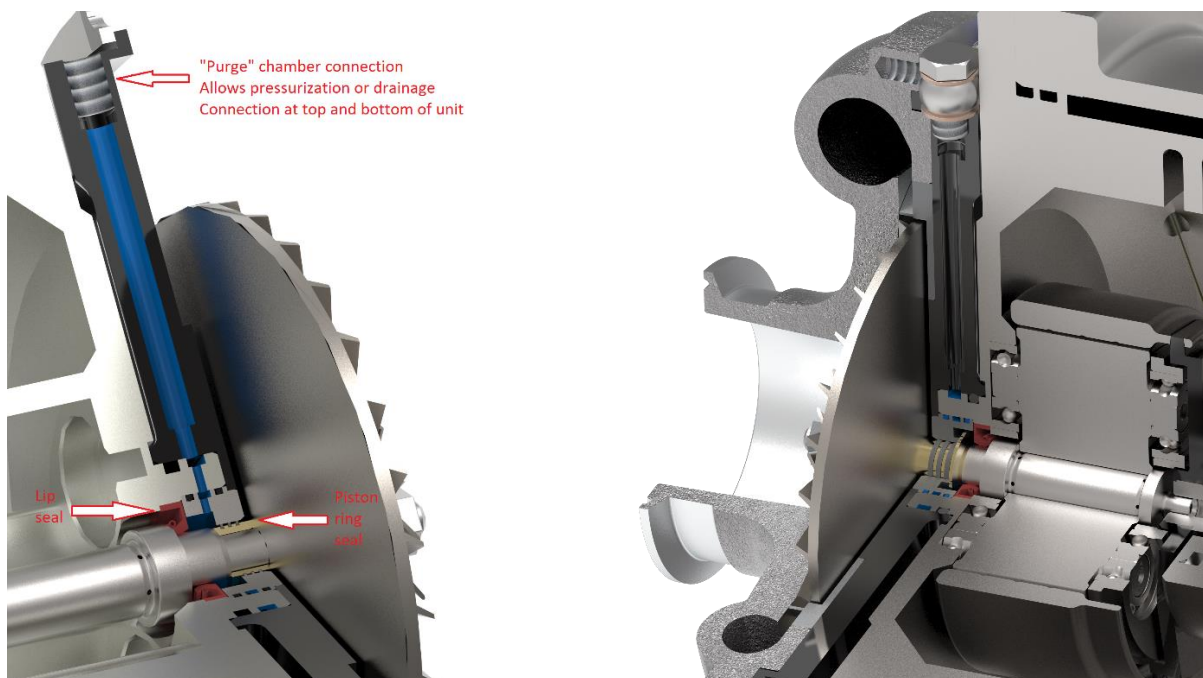


Figur 3.1 – Rotrex-kompressor i luftprøvestand

3.3. Modificering og klargøring til vanddamp

Rotrex har modificeret kompressoren yderligere, så den er velegnet til vanddampkompression. Rotrex har udviklet et unikt dobbelt pakningssystem til højhastighedsakslen, som sikrer, at vanddamp ikke kommer ind i gearkassen. Hvis vanddampen når ind i gearkassen, spredes den til olien, og ødelægger oliens viskositet, og dermed ødelægges kompressoren i løbet af kort tid.

Det dobbelte pakningssystem er designet med læbetætning mod gearkassen og en stempelringstætning mod kompressoren. Mellem de to pakninger tilføjes trykluft i et 'purge chamber', som sikrer, at vanddampen fjernes fra læbetætningen ind mod gearkassen.



Figur 3.2 – Visuel fremvisning af nye komponenter til Rotrex-kompressoren

Kompressoren med de nyudviklede funktioner er sendt til test hos Sintef i Norge, hvor alle delene skal verificeres i en levetidstest i et anlæg med vanddamp. Rotrex forventer, at disse tests er afsluttet medio 2022. Billedet viser kompressoren i forbindelse med afsendelse til Sintef i april 2022.



Figur 3.3 – Rotrex-kompressor klar til afsendelse til Sintef i Norge

4. Test med damp

På Teknologisk Institut er der blevet opbygget en teststand, der har til formål at teste kompressoren under en række forhold, og herigennem sammenligne driften med den eksisterende Roots-blæser. Teststanden er blevet opbygget som en inddamper, der bliver testet ved en række flows, temperaturer og tryk med henholdsvis en blæser og en kompressor for at sammenligne effektiviteten og lave en detaljeret mapping af kompressoren. En vigtig del af testen er samtidig at undersøge stabiliteten af kompressoren ved test med damp.

Den testede kompressor fra Rotrex er fra et tidligt stadie i udviklingen af kompressoren, og der er derfor ikke tale om en kompressor med de modificeringer, som er beskrevet i Afsnit 4. Det forventes derfor, at resultatet af en test med den nyudviklede kompressor hos Sintef vil vise andre resultater end den test, der er udført hos Teknologisk Institut. Testens resultater har endvidere til formål at støtte Rotrex i den videre udvikling med kompressoren.

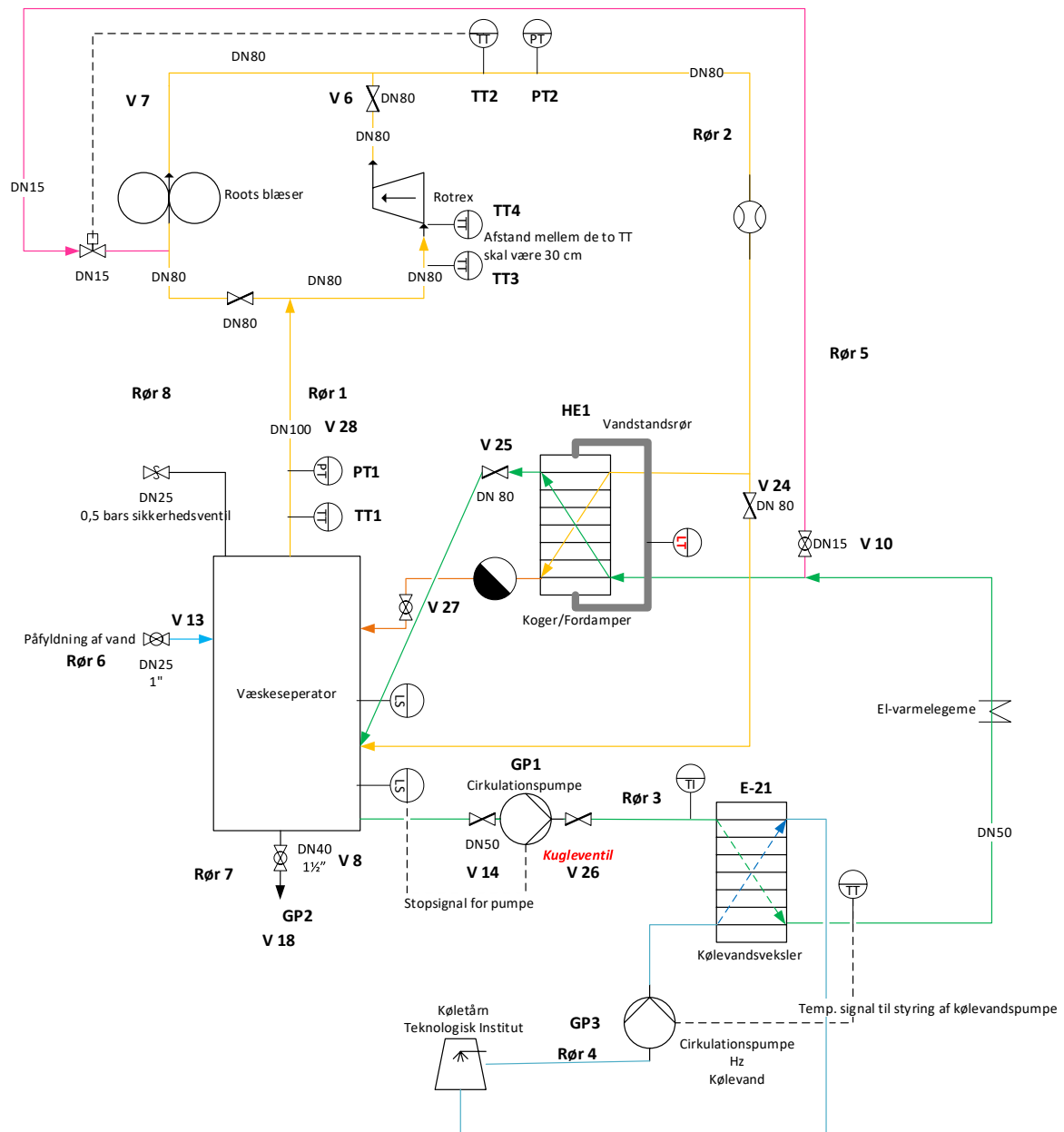
De udførte tests med damp er udført med langsom opbygning af kompressorens omdrejningstal for at sikre en skånsom indledende test. Dette skyldes, at Rotrex' turbokompressorer normalt er beregnet til luft, hvorfor kompressoren som udgangspunkt ikke er forberedt til den høje kompressionstemperatur, der medfører øget belastning på kompressorens dele samt en øget olietemperatur og varmeledning fra rotorhuset til gearhuset. Denne udfordring analyseres og ønskes løst gennem blandt andet en øget køling af olie kredsen og eventuelt med indførelse af et isolerende mellemmateriale mellem rotor- og gearhus.

Det forventes i testen, at kompressoren kan sikre et temperaturløft på 22 °C, og ved en akseffekt på 50 kW forventes en varmeeffekt på 400 kW, hvilket resulterer i en COP på 8. Et lavere temperaturløft forventes at kunne øge COP til omkring 10.

I nærværende afsnit følger indledningsvist en gennemgang af anlæggets opbygning og de overvejelser, der har været i designfasen, hvorefter den fysiske teststand gennemgås med billeder og beskrivelser. Afslutningsvist beskrives de tests, der bliver udført.

4.1. Opbygning af teststand – anlægsdesign og kalkulation

Arbejdet med at opbygge teststanden blev startet af Krammer Innovation og afsluttet af Teknologisk Institut. Indledningsvist har der været en designfase, som er mundet ud i opbygningen af et anlæg på Teknologisk Institut. Anlægget er designet som følgende:



Figur 4.1 – Systemdiagram af testanlægget på Teknologisk Institut

Designfasen har været et samarbejde mellem de involverede partnere i projektet, men især Krammer Innovation har arbejdet på denne del af projektet. Krammer Innovation har været ansvarlig for at sikre, at anlægsdesignet er udført i henhold til gældende normer, således at anlægsdesignet kommer så tæt på virkeligheden som muligt, men stadig er optimeret til tests. Anlægget er designet med udgangspunkt i Rotrex-kompressoren, således at anlægget kan testes ved en lang række driftspunkter for kompressoren med varierende indstillinger og undersøgelsesområder. En afgørende del af anlægsdesignet har været at lave en så simpel opbygning som muligt, således at dybere undersøgelser af de fysiske komponenter er let tilgængelige og relativt hurtige at justere og udskifte.

Væskeseparatorer udgør kernen i anlægget, hvori mediet har mætningstemperaturen, således at en delmængde fordampes og komprimeres i henholdsvis kompressoren og blæseren alt efter brug. Systemet er opbygget, så kompressoren og blæseren skiftevis kan frakobles, så det er muligt at teste anlægget med enten kompressoren eller blæseren alene. Dette giver mulighed for at lave direkte sammenlignelige undersøgelser.

Den mættede damp komprimeres i enten blæseren eller kompressoren. Efter kompressionen bliver dampen ført gennem en varmeveksler og herefter gennem en ekspansionsventil for til sidst at blive ført retur til væskeseparatorer. Den mættede væske føres ud af væskeseparatorer ved hjælp af en cirkulationspumpe, hvor den mættede væske afkøles af en ekstern kølekreds, som har til formål at fjerne kompressor-/blæservarmen fra anlægget. Den underkølede væske fordampes gennem varmevekslingen med den komprimerede damp og føres herefter tilbage til væskeseparatorer.

Anlægget er designet ud fra følgende forudsætninger:

- Mætningstryk: 0,58 bara
- Mætningstemperatur: 85 °C
- Trykforhold: 2,5
- Varmeeffekt: 222 kW
- COP: 8-10
- Volumenflow, kompressorindgang: 932 m³/h

Anlægget er designet med den nødvendige mængde udstyr til at udføre de undersøgelser, der ønskes lavet. Anlægget er udstyret med flowmålere, temperatursensorer og trykmålere, som bruges til at opsætte de nødvendige energibalanceligninger.

4.2. Opbygning af teststand – fysisk gennemgang

Testanlægget på Teknologisk Institut er dels blevet opbygget af en ekstern smed og dels opbygget internt af en smed hos Teknologisk Institut. Den fysiske teststand er opbygget med alle relevante sensorer og øvrige sikkerheds- og driftskrav. Tilslutningen af kompressoren er lavet i samarbejde med Rotrex, som har vejledt under både opbygning og opstart. Herunder følger en række billeder og beskrivelser af den opbyggede teststand.



Det fulde anlæg. Kedlen er placeret midt i anlægget med den gule blæser, der kan ses mod højre. Fra kedlen fordampes mediet og sendes enten gennem blæseren eller kompressoren, der lige kan anes bag den gule blæser.



Det fulde anlæg. Nederst i højre hjørne kan den ene af de to varmevekslere anes. Denne varmeveksler sikrer afkøling af motorvarmen fra blæser/kompressor og er koblet på en kølekreds fra Teknologisk Institut. De store 'kasser' forrest i billedet er frekvensomformere til motor og kompressor.

For at teste selve anlægget og opbygningen af inddamperen er anlægget i den indledende fase blevet startet op med Roots-blæseren. Blæseren er løbende skruet op, således at anlægget kunne overvåges og testes ved stigende ydelse. Blæseren ses på venstre billede herunder, og denne er drevet af den sorte motor.



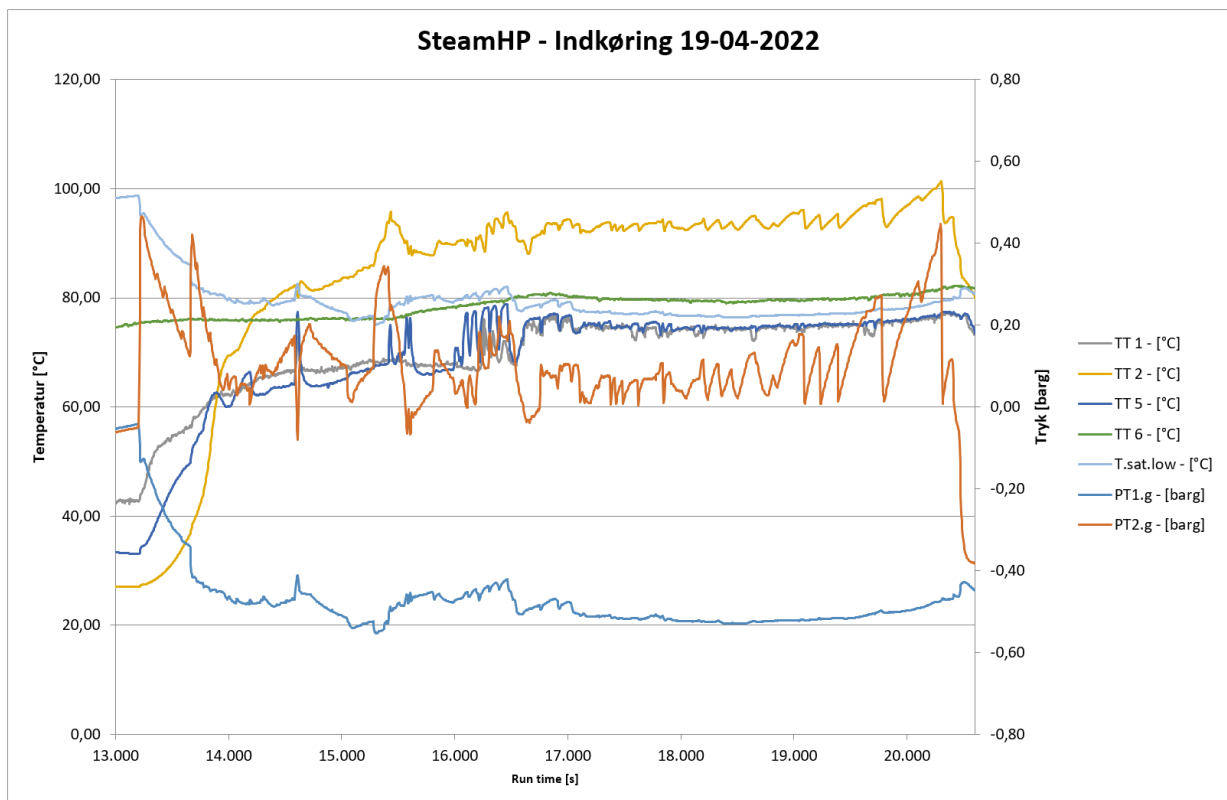
Indkig på blæseren. Drivmotoren er placeret lige under blæseren, og disse er forbundet med et remtræk, der sikrer det korrekte omdrejningstal for blæseren i forhold til de nødvendige undersøgelser.



Overvågning af anlæg under opstart med blæser.

Indkøringen af anlægget er foretaget den 19. april 2022, og grafen nedenfor viser opstartsfasen. Grafen viser en lang række parametres værdier i løbet af indkøringen. Det er især værd at bemærke, hvordan temperaturen, den gule graf, på højtrykssiden løbende øges i løbet af indkøringen, efterhånden som belastningen på blæseren øges. Temperaturen på højtrykssiden kommer i slutningen af indkøringen lige over 100 °C mod en dimensionerende temperatur på omkring 110–115 °C. Indkøringen afsluttes med en belastning på omkring 55%, hvorfor den lavere temperatur er forventelig.

Indkøringen viste problemer i forhold til opvarmningen og udluftningen af anlægget, idet indkøringen er forløbet over meget lang tid med en hel del udluftning i systemet og en sen kondensering. Det betyder, at der efterfølgende er installeret et varmelegeme, der øger systemets starttemperatur, således at opstartsfasen bliver væsentligt kortere.

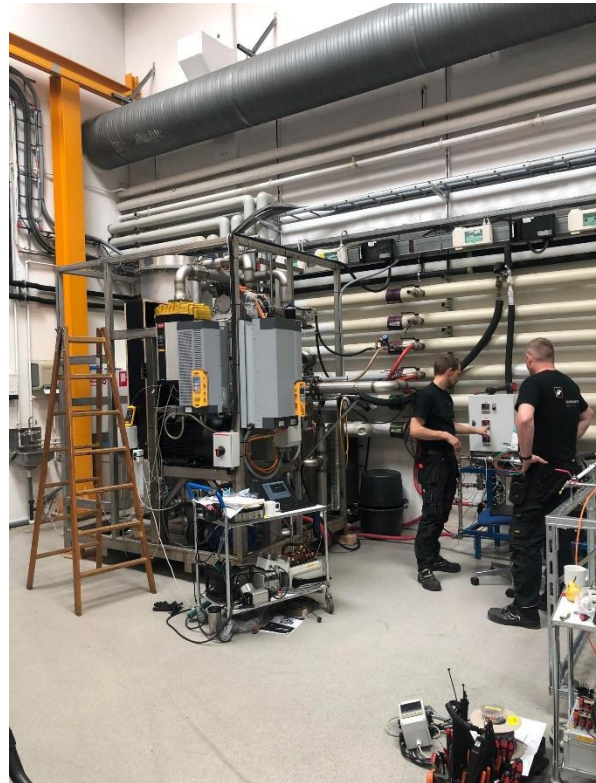


Figur 5.1 – Sensormålinger i forbindelse med indkøring af anlæg med Roots-blæser

Som det fremgår af nedenstående billeder, blev der under hele indkøringen af anlægget lavet grundige overvågninger og justeringer, således at driften af anlægget var korrekt inden tilslutning af Rotrex-kompressoren. Indkøringen viste ikke problemer med selve anlægsopbygningen, og alle komponenter virkede efter hensigten.



Overblik over anlægget i forbindelse med indkøringen af systemet. Computeren på rullebordet overvåges og bruges til at se, hvordan ændringerne påvirker systemet.



Løbende justeringer på ydelser af blæser, kølekreds og ventiler foretaget i forbindelse med indkøring af anlæg.

Efter indkøringen af anlægget er Rotrex-kompressoren i samarbejde med Rotrex blevet tilkoblet. Rotrex' teknikere indstillede kompressoren og assisterede under de indledende driftstests af kompressoren, hvor den langsomt blev startet i tomgang. Ligeledes blev alle tilslutninger og olieledning gennemgået og verificeret til tests.

Rotrex udførte endvidere en servicering og gennemgang af kompressoren efter kort tids drift for at sikre, at kompressoren ikke tager skade i forbindelse med de udførte tests.



Rotrex-kompressoren gennemgås og tilsluttes anlægget. Oliekølersystemet undersøges, og de elektriske tilslutninger udføres. Frekvensomformer (nederst) indstilles endvidere til kompressoren.



Tilkobling af Rotrex-kompressoren og overvågning i forbindelse med den indledende opstart af kompressoren. Oliesystemet skilles efterfølgende ad for at undersøge uregelmæssigheder, ligesom alle temperaturer og mekaniske dele overvåges.

4.3. Gennemgang af udførte tests

Med alle indkøringer og indledende tests er anlægget nu klar til de længere tests af kompressoren i anlægget. Ved udgangen af april i forbindelse med rapportens afslutning er disse undersøgelser igangsat, men de er endnu ikke afsluttet, og de er derfor ikke inkluderet i denne rapport. En forsøgsrapport afleveres i tillæg til denne rapport.

Følgende undersøges i forsøgsrapporten:

Generel test af inddampersystemet: Anlæggets overordnede drift undersøges. Testen har til formål at undersøge samspillet mellem komponenterne i anlægget og at verificere effektiviteten af inddamperen overordnet set.

Længere test af kompressor: Kompressoren testes gennem drift i en periode over flere døgn for at undersøge holdbarhed og effektivitet ved varig drift. Testen har til formål at køre ved høje belastninger og høje omdrejningstal ved et anlæg baseret på vanddamp, således at kompressoren kan testes til drift med vanddamp. Det skal her bemærkes, at den testede version af kompressoren ikke indeholder de nyeste udviklinger af Rotrex, og at effektiviteten af kompressoren derfor kan være forbedret yderligere.

Specifikke funktions- og ydelsestests: Kompressoren undersøges ved en række konditioner, som skal bidrage til at lave en kompressormapping under de specifikke forhold. Dette gøres ved løbende at justere på ydelsen for anlægget og ved at observere og indsamle data.

Alle forsøgene udføres på den opsatte teststand på Teknologisk Institut, og de forventes afsluttet og afrapporteret medio 2022 under forudsætning af, at kompressoren ikke ødelægges under tests.

5. Perspektivering

Udviklingen af anlægget og den fortsatte udvikling og test af kompressoren giver en lang række muligheder for en fremtidig bæredygtig drift med en vanddampkompressor fra Rotrex i en fungerende inddamper. Det er vigtigt for den fortsatte udvikling og verificering af løsningen, at især kompressoren fortsat testes under længere drift med vanddamp.

Der er ingen tvivl om, at projektet har bragt højtemperaturvanddampkompressorer tættere på markedet, og at produktet og markedet som helhed har udviklet sig. Der bør udarbejdes et projekt, som kan bringe produktet videre og bringe det tættere på markedet, således at slutbrugere kan få installeret pilotanlæg on-site, hvor vanddampkompressoren kan testes yderligere under reelle kundeforhold.

Det forventes, at højtemperaturvarmepumper baseret på vanddampteknologi får mere opmærksomhed fremadrettet, idet teknologien viser sig at være konkurrencedygtig i forhold til en lang række andre kølemidler, ligesom et større fokus på at frigøre sig fra gas og generelt fokus på bæredygtighed trækker interessen i retningen af vanddamp.

6. Konklusion og diskussion

Der er i projektet blevet udviklet og opbygget en inddamper med vanddamp som kølemiddel, der har til formål at teste den nyudviklede Rotrex-kompressor. Det er i projektet vist, at det er muligt at opbygge en fungerende inddamper, hvor selve anlægget kan drifte med en Roots-blæser, og hvor tilfredsstillende resultater opnås.

Der er i projektet endvidere blevet udviklet på turbokompressoren fra Rotrex. Kompressoren er blevet testet og verificeret til langtidsdrift i luft under ekstreme forhold. Det er i projektet blevet undersøgt, hvordan vanddamp adskiller sig fra luft, og med udgangspunkt i undersøgelserne er der blevet udviklet en række nye komponenter til Rotrex-kompressoren, der er dokumenteret i nærværende rapport. Dette har resulteret i et dobbelt pakningssystem til højhastighedsakslen med læbetætning og en stempekringstætning, således at vanddamp ikke kommer ind i gearkassen. Kompressorens nye dele testes på Rotrex' initiativ hos Sintef i Norge i medio 2022.

Teknologisk Institut har i samarbejde med Krammer Innovation opbygget en fungerende inddamper med udgangspunkt i de anlægskrav, der er oplyst af slutbrugerne. Inddamperen er testet gennem en lang række funktions- og ydelsestests, og det er vist, at inddamperen opfører sig efter ønsket, og at den er klar til yderligere undersøgelser med vanddampkompressoren fra Rotrex.

Udviklingen af dråbeudskilleren har været undervejs hos Krammer Innovation, men det har i projektet ikke været muligt at færdigudvikle dråbeudskilleren på grund af konkursen hos netop Krammer Innovation, der var ansvarlig for denne del af projektet. Dråbeudskilleren havde minimal påvirkning på anlægget som helhed, og det har været muligt at bruge anlægget uden problemer.

Der er i projektet lavet et detaljeret anlægsdesign med alle nødvendige komponenter til anlægget, ligesom det er fysisk gennemgået i rapporten med en række billeder. Anlægget forventes at drifte videre indtil de endelige tests er færdige. Undersøgelserne er påbegyndt, og afslutningen af undersøgelserne forventes i slutningen af 2022, såfremt kompressoren virker gennem hele processen.

7. Conclusion and discussion

In this project, an evaporator using water as refrigerant has been developed and built. The evaporator aims to test the newly developed Rotrex compressor using water. The project has shown that it is possible to build a functioning evaporator by using a Roots blower with satisfactory results.

Furthermore, a turbo compressor from Rotrex has been further developed during the project. The compressor has been tested and verified for long-term operation using air under extreme conditions. It has been researched how steam differs from air, and new components for the Rotrex turbo compressor have been developed based on these investigations. This has resulted in a double sealing system for the high-speed shaft with a lip seal and a piston ring seal ensuring that no steam enters the gear box. The new components of the compressor will be tested by Rotrex and Sintef in Norway in medio 2022.

Danish Technological Institute and Krammer Innovation have in cooperation built a working evaporator based on the preliminary requirements from the end-users. The evaporator has been tested in numerous performance tests where it is shown that the evaporator performs as desired and is ready for tests using the Rotrex compressor with steam.

The development of the droplet separator has been underway at Krammer Innovation, but the development has not been finalized due to the bankruptcy at Krammer Innovation who were responsible for this part of the project. The droplet separator had a minimal impact on the evaporator, and it has been possible to use the evaporator without problems.

Finally, a detailed evaporator design with all necessary components for the evaporator has been made. In addition to this, the evaporator has been described and physically examined. The evaporator is expected to continue running until the final tests have been made, which is expected to be in the end of 2022 provided continuous operation of the Rotrex compressor.



**DANISH
TECHNOLOGICAL
INSTITUTE**