



TEKNOLOGISK  
INSTITUT

---

# Plastanvendelse til ekspresorteknologi, PLET

Slutrapport

---

**Titel:**

Plastanvendelse til ekspresorteknologi, PLET – Slutrapport

**Udarbejdet for:**

ELFORSK, Projektnr.: 347-039

**Udarbejdet af:**

Teknologisk Institut  
Køle- og Varmepumpeteknik  
Gregersensvej 2  
2630 Taastrup

**I samarbejde med:**

Advansor A/S  
Bautavej 1A  
8210 Århus V

Danfoss A/S  
Nordborgvej 81  
6430 Nordborg

Super Køl A/S  
Holkebjergvej 73  
5250 Odense SV

Juni 2019

**Forfatter:**

Christian Heerup, Teknologisk Institut

## Indholdsfortegnelse

1. Projektresumé .....	4
2. Baggrund .....	6
3. Projektets formål.....	7
4. Princip .....	8
5. Projektets gennemførelse og resultater .....	10
6. Perspektivering og udnyttelse af resultater .....	13

## 1. Projektresumé

### Dansk

Projektets primære ide bygger på at udvikle en fleksibel løber i plast, som indbygget i et tryktæt hus vil kunne erstatte ekspansionsventilen i et køleanlæg. Konstruktionen virker som en kombination af en ekspander og en kompressor – deraf betegnelsen ekspressor. I stedet for at realisere et tab ved tryksænkningen i ekspansionsventilen kan der høstes nyttig energi, som hæver virkningsgraden i køleanlægget.

Løberens udformning er blevet undersøgt i et løsningsrum defineret af:

1. Funktionskrav
2. Trykindeslutningen (udformning af huset)
3. Teknologier til rådighed for 'rapid prototyping' i plast.

I projektet er der gennemført ca. halvdelen af de planlagte arbejdsopgaver, og det var nødvendigt at lukke projektet uden at opfylde formålet og nå de ønskede mål.

Det skyldes især udfordringerne med at få omsat den funktionelle ide til en brugbar geometrisk udformning for 'rapid prototyping' i plast samt udfordringer med at opnå en høj nok kvalitet af det printede element.

Da selve ideen fortsat ønskes beskyttet, beskrives i denne rapport kort baggrunden for projektet og udfordringerne med at løse opgaven. Selve konstruktionen beskrives ikke.

## English

The primary idea of the project is to develop a flexible rotor made of plastic, which – built into a pressure tight housing – will be able to replace the expansion valve in a refrigeration system. The construction works as a combination of an expander and a compressor - hence the term 'expressor'. Instead of achieving a loss when the pressure is lowered in the expansion valve, useful energy can be harvested, which will increase the efficiency of the refrigeration system.

The design of the rotor has been investigated defined by:

1. Functional requirements
2. The pressure enclosure (housing design)
3. Technologies available for 'rapid prototyping' in plastic.

In this project, approx. half of the planned work packages have been carried out, and it was necessary to close the project without meeting the objectives and achieving the desired goals.

This is mainly due to the challenges associated with converting the functional idea into a geometric design for 'rapid prototyping' in plastic as well as the challenges associated with achieving a high enough quality of the printed element.

Since it is still a wish to protect the idea, this report briefly describes the background of the project and the challenges of solving the task. It does not describe the actual construction.

## 2. Baggrund

Gennem årene er der lavet mange forsknings- og udviklingsaktiviteter internationalt inden for ekspander/kompressorteknologien. Men projekterne har hovedsageligt haft fokus på væsentligt større anlæg end dem, der her er tale om – typisk anlæg i MW-størrelse, hvor materialerne har været baseret på metaller. Hittidige udformninger af ekspandere har været baseret på kendte design af kompressorer, hvor dannelsen af væske i ekspansionen er en udfordring for de fleste design, og dermed er dette en væsentlig begrænsning for udbredelsen.

Funktionen som ekspresor, som er beskrevet i projektet, er allerede udviklet og realiseret ved hjælp af en art fristempelmaskine, som i princippet er et modificeret design af en dampdrevet kedelfødepumpe eller en trykluftkompressor fra damplokomotivernes tid. Denne udformning som fristempelmaskine har vist sig at være relativt dyr at producere. Dette svækker totaløkonomien, på trods af at der er demonstreret god effektivitet i field-test.

Det væsentligste succeskriterie er, at pris/ydelsesforholdet bliver bedre end for ejektor-teknologien, som kan realisere sammenlignelige funktioner inden for supermarkeds køling med CO<sub>2</sub>, som allerede er introduceret på markedet i en række demonstrationsprojekter, og som siden projektets start nu er på vej ind i en egentlig markedsføring hos Danfoss og hos andre producenter.

Teknologier til udnyttelse af ekspansionsenergien i køleanlæg og varmepumper har i mange år været på ønskelisten. Mange aktører har derfor arbejdet med løsninger som ejektorer eller ekspandere efter scroll-, skrue-, stempel- eller rullestempelprincippet mfl. Generelt har virkningsgraden været lavere end forventet, og for ekspanderløsningerne har stigningen i effektivitet ikke kunnet retfærdiggøre de forventede produktionsomkostninger.

For ejektorløsningerne er der udfordringer med tilpasning til varierende driftsforhold. Der er fremlagt flere lovende forslag til anlægsdesign, hvor både ejektorer og kombinerede ekspander/kompressor (ekspresor)-løsninger med middel virkningsgrad vil kunne øge effektiviteten af hele anlægget ved at muliggøre anvendelsen af oversvømmede fordampere samtidig med en reduktion af kompressorarbejdet.

En aktør oplyser, at der p.t. er ca. seks års tilbagebetalingstid ved en konkret fieldtest med ejektorer, hvor stigningen i anlæggets effektivitet er op til 20 %. Det vurderes dog, at tilbagebetalingstiden for dette anlæg ville være længere ved danske klimaforhold. Udviklingen inden for ejektorer er også baggrunden for et nyt projekt 'EcoPack', som afvikles under EUDP med opstart i 2019, og som skal fremme pris/ydelsesforholdet for ejektorer til mindre og middelstore supermarkedsanlæg.

### 3. Projektets formål

Projektet bygger på en ide, som gør det muligt at anvende plast til en ekspansionsmaskine for udnyttelse af ekspansionsenergien i køleanlæg. Energiforbruget kan på årsbasis sænkes med 10-20 % ved at udnytte ekspansionsenergien. Brug af plast betyder lavere investeringsomkostninger og dermed bredere anvendelsesmuligheder med store potentielle besparelser til følge.

Projektets analyse og studie af de tekniske muligheder for et produktionsvenligt design af en kombineret ekspander og kompressor (en såkaldt 'ekspressor') vil danne et grundlag på baggrund af hvilket, teknologien kan modnes. Et produktionsvenligt design skal her forstås som muligheden for at producere en tilstrækkeligt effektiv enhed, der er billigere end kendte konstruktioner.

Konstruktionen bygger på en ide, der ikke tidligere er anvendt, og det skal undersøges, hvordan plast kan anvendes i designet, som forudsætter, at den bevægelige del er fleksibel. 'Rapid prototyping' anvendes i projektet, og verificering foretages ved udvalgte tryk og temperaturer i et driftsområde betinget af de plastmaterialer, der er økonomisk tilgængelige.

## 4. Princip

Funktionen løses i nærværende design i en kontinuert roterende proces. Denne adskiller sig fra hidtidige design ved ikke at være afhængig af en akse til at overføre kraften mellem ekspander og kompressor. Konstruktionen er i princippet simpel og kan indbygges i en trykindeslutning på størrelse med et almindeligt filterhus –  $\varnothing$  120 mm med to ekstra rørtilslutninger i dækslet.

En model skulle fremstilles, hvori en løber produceret i plast via 'rapid prototyping' kan afprøves. Herved bliver det økonomisk overkommeligt at afprøve flere geometrier. Geometrierne udvælges efter en analysefase, hvor forskellige tab minimeres. Den funktionelle analyse blev ikke foretaget i projektet.

Tab kan ikke undgås, men beregninger viser, at en virkningsgrad på 50 % vil give tilstrækkelig effekt til at have kommerciel betydning, når blot produktionsprisen kan holdes nede. I begge kamre af ekspressoren vil der optræde to faser – det vil sige både væske og gas. Levetiden forventes dog at blive acceptabel, da løberen kan designes til en lav hastighed og derudover relativt nemt kan udskiftes på grund af den simple tilslutning.

Når det forventes, at plast er et egnet materiale, skyldes det, at kompressordelen arbejder ved lave trykforhold, og at temperaturerne er moderate. Valget af plast er åbenlyst forbundet med en række kompromiser, da fleksibiliteten og muligheden for at formgive en vilkårlig geometri er en forudsætning, samtidig med at slidstyrken og modstanden for udmattelsesbrud aldrig kan nå samme niveau som eksempelvis for metaller.

En af de risici, som stod klart allerede inden projektets start, er, at plastmaterialerne ikke kan opnå den nødvendige styrke til den bevægelige del, og at styrkeforholdet bevirker, at konstruktionen ikke kan anvendes i det høje trykområde, som det ellers er ønskeligt. Men det vurderes samtidig, at denne risiko reelt er meget begrænset, og at muligheden for senere at arbejde med materialevalget netop bevirker, at pris/ydelsesforholdet kan blive så godt, at teknologien kan udfolde sit potentiale.

Figuren nedenfor viser, hvordan ekspressoren kan indbygges i et CO<sub>2</sub>-boostersystem. Et beregningsprogram er udført i EES i forbindelse med projektet. Programmet returnerer tryk og volumenforhold samt COP ved forskellige driftskonditioner, der angives som inputværdier. Ved en isentropisk virkningsgrad for både ekspander- og kompressordelen på 0,6 og en mekanisk virkningsgrad på 0,95 kan forbedringen i COP beregnes til mellem ca. 10 % og 20 % ved typiske driftstilstande bestemt af udetemperaturen i Danmark.

I modsætning til hidtidige konstruktioner er væske i sugeledningen fra fordampere ikke et problem. Dette giver mulighed for at anvende oversvømmede fordampere og spare energi ved at hæve fordampningstemperaturen. Potentialet for ekspressoren er særligt stort for køleanlæg med CO<sub>2</sub>, og fokus er i første omgang supermarkedsanlæg i kapacitetsområdet 20 til 100 kW.

Det er i andre arbejder målt, at fordampningstemperaturen kan hæves til -2 °C ved anvendelse af oversvømmede fordampere. Hvis der regnes med, at fordampningstemperaturen hæves fra -8 °C til -3 °C og -2 °C henholdsvis sommer og vinter, bliver forbedringen



i COP fra 20 % til 35 %. Kompressorernes energiforbrug udgør typisk halvdelen af køleanlæggets samlede forbrug inklusive hjælpeenergi, hvilket medfører, at besparelsen bliver på op til ca. 17 %.

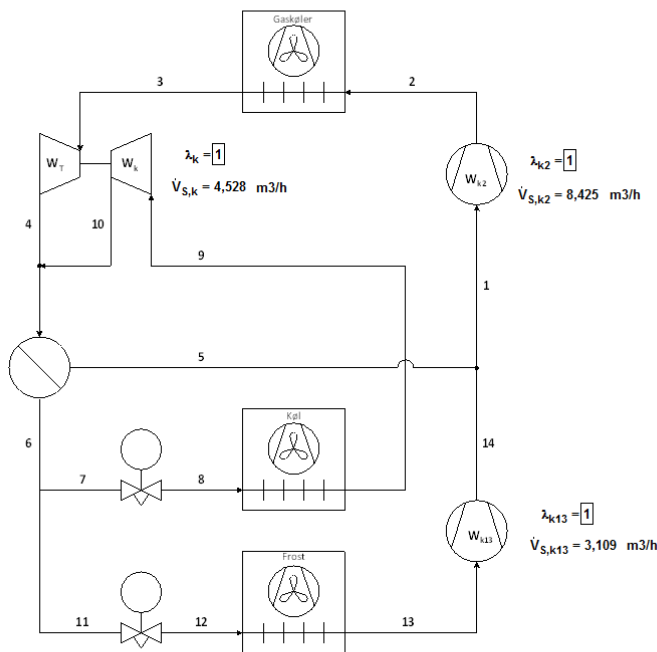
Figuren viser det simplest tænkelige diagram for indbygning. Ved en endelig applikation kan det vise sig nødvendigt med en reguleringsventil, som det også er beskrevet i litteraturen. Derved bliver det muligt at kompensere for variationer i tryk- og volumenforhold. Der er mulighed for at indbygge en mekanisme for regulering af disse forhold i konstruktionen, og udformningen af den grundlæggende geometri vil tage hensyn til en senere tilføjelse af dette element. Det er derfor muligt, at en endelig version (i et senere projekt) vil kunne eliminere både højtryksventil og gasbypassventil, som det er vist på diagrammet, og dermed gøre anvendelsen endnu mere attraktiv.

### CO<sub>2</sub> Køleanlæg - PLET



TEKNOLOGISK INSTITUT

Køle- og Varmepumpe-teknik Energi og Klima



**Inputs**

**Gaskøler**

$P_{G,k} = 80,4$  Bar  
 $T_{G,k} = 32$  °C

**Fordampere**

$T_{ford,køl} = -8$  °C  
 $T_{ford,frost} = -32$  °C  
 $T_{OH,køl} = 5$  °C  
 $T_{OH,frost} = 5$  °C  
 $Q_{ford,køl} = 22$  kW  
 $Q_{ford,frost} = 7$  kW

**Kompressorer**

$\eta_k = 0,65$

**Ekspressor**

$\eta_{kex} = 0,6$   
 $\eta_{Tex} = 0,6$   
 $\eta_m = 0,95$

**COP med Ekspressor**

$COP = 2,162$

**Forbedring af COP i procent**

Procent = 18,8 %

**Outputs**

**Reciever**

$P_{rec,B} = 34,27$  Bar  
 $T_{rec} = -0,4786$  C

**Δ T mellem Reciever & Fordamper**

$\delta_{T,Køl} = 7,521$  °C  
 $\delta_{T,Frost} = 31,52$  °C

**Volumen forhold**

$Rv_{34} = 3,088$   
 $Rv_{49} = 1,393$   
 $Rv_{910} = 0,8788$

**Kompressorarbejde**

$W_{k13} = 1,859$  kW  
 $W_{k2} = 11,56$  kW

**Ekspressorarbejde**

$W_T = 1,293$  kW  
 $W_K = 1,228$  kW

**Estimeret COP uden Ekspressor**

$COP_{ref} = 1,82$

Print

Calculate

LogPh

(Bemærk, at programmet er en Beta-version, og at 0 derfor indsættes som 0,001 – eksempelvis for frostbelastningen – hvis der ønskes at beregne alene for køl).

Projektet fokuserer på ekspressorens anvendelse i supermarkedsanlæg, da det vurderes, at en markedsintroduktion her vil have de bedste muligheder for at være økonomisk bæredygtig. Princippet kan efter produktmodning i en efterfølgende fase vise sig også at være muligt at anvende i varmepumper samt at skalere op og ned i størrelse, ligesom der kan tænkes versioner til andre trykforhold og kølemidler.

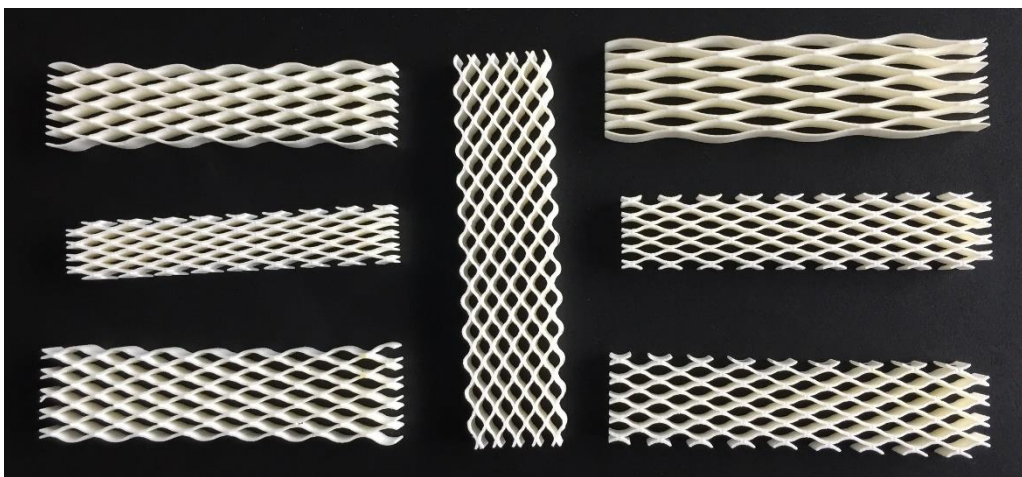
## 5. Projektets gennemførelse og resultater

Projektets struktur fremgår af arbejdspakkerne, som er oplyst her:

- 1) Projektledelse + styregruppemøder
- 2) Designkriterier + geometri af hus og løber
- 3) Konstruktion af hus og fremstilling af hus
- 4) Konstruktion og fremstilling af løber
- 5) Samling/prøvning, tryk/mekanik
- 6) Indbygning i aggregat
- 7) Validering og analyse af data
- 8) Evaluering teknisk og kommercielt
- 9) Rapportering.

Alle arbejdspakkerne er i større eller mindre grad afhængige af arbejdspakke 4) Konstruktion og fremstilling af løber.

I første omgang blev forskellige udformninger af plastmaterialet undersøgt med hensyn til geometri, produktionsnøjagtighed, minimering af godstykkelser, styrke, elasticitet og overfladeruhed. Alt sammen egenskaber, der har betydning for det færdige produkt. Herunder ses nogle af de første emner fremstillet i nylon (polyamid), som leveres i pulverform og lasersintres til en samlet enhed.



Nogle af parametrene var acceptable, mens andre viste sig ikke at have de egenskaber, der er nødvendige. Det vil sige, at emnets fleksibilitet er vanskelig at forudsige på baggrund af det tegnede oplæg. Det samme gælder for overfladeruheden og tolerancerne. Når disse elementer ikke er tilfredsstillende, kunne funktionen ikke afprøves; enten passer løberens ikke i testhuset, eller friktionen og utætheder bevirker, at løberens ikke arbejder som tilsigtet. Selve geometrien eller muligheden for at arbejde videre med geometrien i den ønskede konstruktion var derfor ikke tilfredsstillende. Det viste sig også, at godstykkelsen, som af hensyn til fleksibiliteten skal være tynd, bevirkede, at materialet blev porøst.

Den funktionelle geometri af løberens blev forsøgt realiseret på andre måder ved fremstilling af en lang række af emner – både ved den nævnte proces og ved andre plastprinteprocesser, som består af ekstrudering af plasttråd, som svejses op til det færdige emne.

Af næste figur, hvor der ses et udsnit af de fremstillede emner, fremgår det, hvordan der i projektet i meget vid udstrækning er eksperimenteret med udformningen for at løse de nævnte problemer. De mange emner er blandt andet et udtryk for, hvor vanskeligt det er at forudsige fleksibiliteten og tolerancerne af et givet emne. Da de endelige egenskaber af en produceret løber i meget vid udstrækning er begrænset af produktionsmulighederne, vil de i projektet udførte beregninger og simuleringer kun i begrænset omfang kunne bruges til at fastlægge et endeligt design. Små ændringer og en iterativ tilgang var nødvendig for at opnå små skridt i retning af de ønskede egenskaber.

Trods denne indsats og gentagne udskydelser af projektets slutdato måtte projektgruppen til sidst erkende, at det – med de midler vi havde til rådighed i projektet – ikke var realistisk at færdiggøre projektet. Det blev derfor i samarbejde med Elforsk besluttet at lukke projektet uden det ønskede resultat.



## 6. Perspektivering og udnyttelse af resultater

Projektet har været lærerigt på den måde, at nok giver plast-printeteknologien i form af forskellige maskiner til 'rapid prototyping' mange fantastiske muligheder, men teknologierne har også deres begrænsninger.

Kombinationen af ekspander og kompressor i en samlet enhed med variabel geometri er stadig en attraktiv ide, men da løsningen af opgaven er væsentligt mere kompleks end først antaget, vil det være naturligt at undersøge muligheden for at optimere designprocessen med andre og mere avancerede softwarebaserede værktøjer – f.eks. i samarbejde med et universitet. Prototypefremstillingen ved hjælp af plast-printeprocessen vil da have et bedre udgangspunkt og gøre det mere realistisk at nå frem til 'proof of concept'.

Igennem projektet blev det også belyst, at en simplere version af princippet var brugbar – særligt i forbindelse med cirkulering af væske i oversvømmede fordampere. En anden vej er derfor at arbejde videre med dette formål, som udmærker sig ved, at kravene til effektivitet og styrke er væsentligt lavere.