



**TEKNOLOGISK**  
**INSTITUT**

# PSO projekt nr.: 345-029

**\_\_\_\_\_**  
Energibesparelser på industrielle køleanlæg ved brug af ny  
luftkølet hybridkøler  
Fase 2 - Målinger på prototype

**Titel:**

Energibesparelser på industrielle køleanlæg ved brug af ny luftkølet hybridkøler  
Fase 2 - Målinger  
PSO projekt nr.: 345-029

**Udarbejdet for:**

Dansk Energi  
ELFORSK  
Vodroffsvej 59  
1900 Frederiksberg C

**Udarbejdet af:**

Teknologisk Institut  
Teknologiparken  
Kongsvang Allé 29  
8000 Aarhus C  
Køle- og Varmepumpeteknik

Juni 2016

Forfattere:

Carsten Jensen, Acccoat A/S  
Lasse Andresen, Condair A/S  
Claus H. Ibsen, Vestas aircoil A/S  
Jesper W. Kristoffersen, Teknologisk Institut

## Resumé

Denne rapport beskriver det arbejde, der er udført for at kunne fremstille en hybridkøler prototype med en ydelse på op til 400 kW, som består af et kølerelement, en ventilator, et spraysystem og en styring. Prototypen er installeret hos Danish Crown A/S i Ringsted, hvor den har været i drift i seks måneder.

Formålet med projektet er at udvikle en hybridkøler, der virker som tørkøler om vinteren og køletårn om sommeren, idet der årligt vil være et besparelspotentiale på 243 GWh/år på el ved substitution af tørkølere med hybridkøleren i Danmark.

Hybridkøleren vil have et årsenergiforbrug, der er 10% lavere end en tørkøler, og vandforbruget vil kunne reduceres med op til 50% i forhold til et køletårn. Det vil ligeledes være muligt at anvende regnvand som spædevand til hybridkøleren.

I projektet er forskellige overfladebehandlinger, som skal hindre en blokering af varmevekslerens luftside, blevet testet og vurderet.

Der er gennemført et måleprogram på hybridkøleren i driftsperioden. Disse målinger danner grundlag for en sammenligning mellem hybridkøleren og henholdsvis tørkølere og køletårne.

## Indholdsfortegnelse

1. Introduktion .....	2
2. Dimensionering af hybridkøler.....	3
3. Vandtilblokning på luftsiden.....	5
4. Prototype .....	7
4.1. Kølerelement .....	7
4.2. Overfladebelægning .....	8
4.3. Ventilator .....	9
4.4. Højtryksspraysystem (HPRO) .....	10
4.5. Styring .....	11
5. Målinger på prototype .....	13
5.1. Måleresultater .....	14
6. Praktiske erfaringer .....	18
7. Konklusion.....	19
8. Referencer.....	20

## 1. Introduktion

Projektets formål er at udvikle en hybridkøler, der virker som tørkøler om vinteren og køletårn om sommeren. Energiforbruget for et køleanlæg med henholdsvis en tørkøler og et køletårn som varmeafgiversystem er sammenlignelige i vintermånederne.

Et køleanlæg med et køletårn som varmeafgiversystem har et betydeligt lavere energiforbrug i sommermånederne, og forklaringen på dette er temperaturforskellen mellem den våde og tørre temperatur. I sommermånederne er den våde temperatur noget lavere end den tørre temperatur, og i vintermånederne er forskellen mindre. Køletårnet opererer efter den våde temperatur.

Hybridkøleren vil have et årsenergiforbrug, der er 10% lavere end en tørkøler, og vandforbruget vil kunne reduceres med op til 50% i forhold til et køletårn. Det vil ligeledes være muligt at anvende regnvand som spædevand til hybridkøleren. Der er et årligt besparelspotentiale på 243 GWh/år på el ved substitution af køletårne og tørkølere med hybridkøleren /1/.

Projektets deltagere er Vestas aircoil A/S, Condair A/S, Novenco A/S, Danish Crown A/S, Acccoat A/S, IPU og Teknologisk Institut. Gruppen repræsenterer videninstitutioner, komponentleverandører og slutbrugere, hvilket sikrer et stærkt projektteam og en god forankring af projektets resultater efter afslutning af projektet.

Projektet opdeles i to dele:

Del 1: Udvikling af hybridkøler, /1/

Del 2: Energibesparelser på industrielle køleanlæg ved brug af ny luftkølet hybridkøler, fase 2 – Målinger på prototype, nærværende projekt

## 2. Dimensionering af hybridkøler

For at finde størrelsen af hybridkøleren er følgende dimensionerende tilstand blevet benyttet:

- Hybridkøleren dimensioneres for tør drift (dvs. som tørkøler)
- Det antages, at den dimensionerende varmeydelse af hybridkøleren er konstant hen over året og lig 700 kW
- Det antages, at temperaturen af luften ud af hybridkøleren kan opvarmes til 1 K under kondenseringstemperaturen
- Kondenseringstemperaturen,  $T_c$  er sat til:
  - $T_c = T_{omg,tør} + 9K$
  - Hvis ovenstående formel resulterer i en kondenseringstemperatur, der er mindre end 26 °C, så sættes kondenseringstemperaturen til 26 °C, hvilket er den laveste tilladte kondenseringstemperatur på Danish Crown, Ringsted.

Kendes den tørre omgivelsestemperatur (for eksempel fra DRY data for København), kan den logaritmiske middeltemperaturdifferens beregnes som:

$$LMTD = \frac{(T_c - T_{omg,tør}) - 1K}{\ln\left(\frac{T_c - T_{omg,tør}}{1K}\right)}$$

Heraf kan det nødvendige totale varmeovergangstal (UA-værdi) beregnes af:

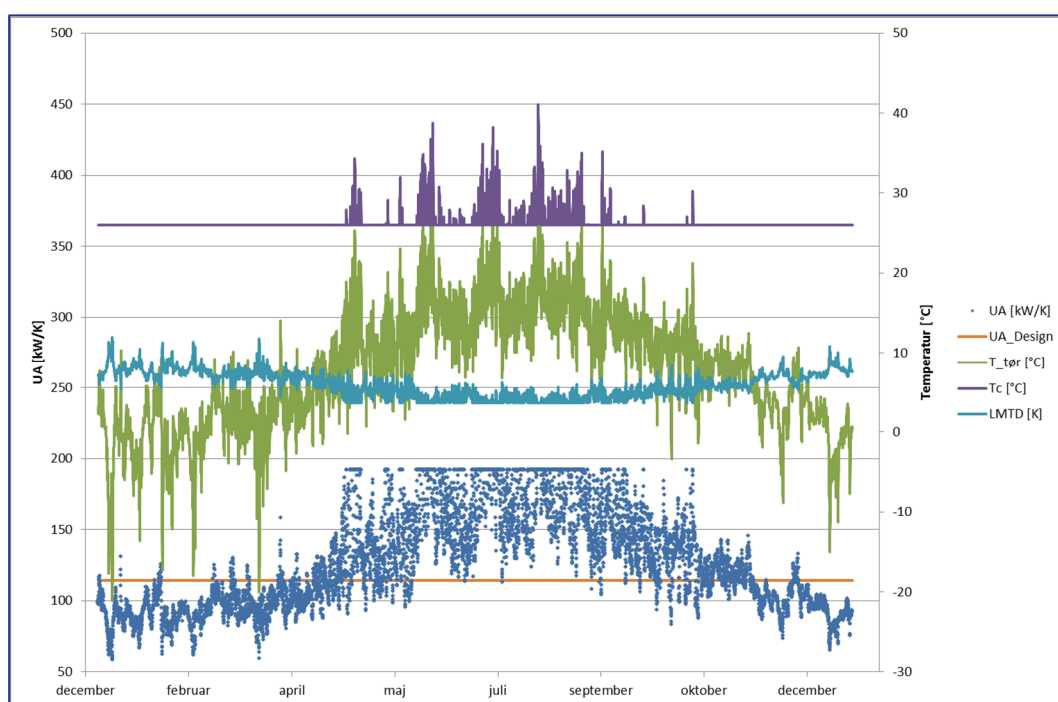
$$Q_c = UA \cdot LMTD \Rightarrow$$

$$UA = \frac{Q_c}{LMTD}$$

Hvor  $Q_c$  er den dimensionerende ydelse (= 700 kW).

Figur 1 viser en beregning af den nødvendige UA-værdi på årsbasis. Plottet viser den tørre temperatur taget fra DRY data, den beregnede kondenseringstemperatur, LMTD og den beregnede (nødvendige) UA-værdi for at opfylde den ønskede ydelse samt holde temperaturforskellen mellem kondenseringstemperatur og luft ud af køleren på 1 K.

UA\_design på plottet er UA-værdien for en køler beregnet efter standard varmetransmissionsformler i et dimensionerende punkt, hvor  $T_{\text{tør}} = 10^{\circ}\text{C}$  og  $T_c = 26^{\circ}\text{C}$ .



Figur 1: Årsdiagram for hybridkøleren

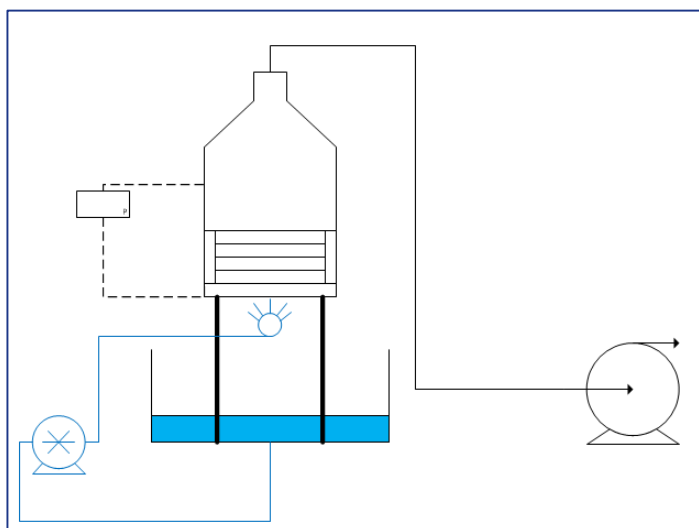
Ved temperaturer over  $+10^{\circ}\text{C}$  ses det, at hybridkølerens UA-værdi ikke er tilstrækkelig, og en forbedring af UA-værdien skal her komme fra spraysystemet.

### 3. Vandtilblokning på luftside

Som nævnt i kapitel 2 skal den øgede køleeffekt opnås ved at sprøjte vanddråber ind i indsugningsluften med et spraysystem.

I projektets fase 1 blev det konstateret, at en del af varmevekslerarealet på luftsiden blokeres, fordi vanddråber ophobes i kølefladen. Blokering af luftvejen forhindrer muligheden for at opnå den ønskede køleeffekt.

I fase 2, nærværende projekt, er der testet nogle forskellige overfladebehandlinger, som skulle hindre denne blokering af varmevekslerens luftside. En simpel forsøgsopstilling blev konstrueret, hvor små forsøgskølere på 300x300 mm kunne monteres, som vist i Figur 2 og Figur 3.



Figur 2: Forsøgsopstilling PI-diagram



Figur 3: Forsøgsopstilling

Kølerne blev udsat for spray fra én dyse, og tryktabet henover køleren blev målt. Ved tilblokning af kølefladen vil tryktabet stige. Tabel 1 og 2 viser, hvor meget tryktabet procentuelt er steget, når der tilføres vand i tilgangsluften.



**Tabel 1**

<b>Overfladebehandling</b>	<b>Finneafstand 2,1 mm Face hastighed <math>\approx 2</math> m/s</b>	<b>Finneafstand 2,1 mm Face hastighed <math>\approx 3,5</math> m/s</b>
<b>Ingen</b>	246	22
<b>Hydrofob</b>	103	36
<b>Hydrofil</b>	101	62

Tabel 2

<b>Overfladebehandling</b>	<b>Finneafstand 3,5 mm Face hastighed 2 m/s</b>	<b>Finneafstand 3,5 mm Face hastighed 3,5 m/s</b>
<b>Ingen</b>	36	40
<b>Hydrofob</b>	64	50
<b>Hydrofil</b>	82	60

Som det fremgår af tabellerne er den bedste løsning at benytte en ubelagt køler med en så stor finneafstand som muligt. Baseret på disse forsøg ser det ud til, at en overfladebehandling har en negativ betydning.

Da sprayvandet er relativt aggressivt over for materialerne, som køleren er fremstillet i, er der anvendt en hydrofob korrosionsbeskyttende overfladebehandling.

## 4. Prototype

Der er i projektet fremstillet en hybridkøler prototype. Prototypen består af et kølerelement, en ventilator, et spraysystem og en styring. Prototypen er installeret hos Danish Crown A/S i Ringsted, hvor den har været i drift i seks måneder. I denne periode har der været monteret måleudstyr for at måle ydelse og vandforbrug.

### 4.1. Kølerelement

Hybridkølerens køleflade består af en almindelig ammoniak kondensator fremstillet i rustfrit stål med aluminiums finner. Kondensatoren vist i Figur 4 har en fysisk dimension på 1800 x 2400 mm.



Figur 4: Køler element

Kondensatoren er designet til at kunne klare kapaciteten, indtil lufttemperaturen opnår 10°C. Herefter skal spraysystemet supplere til, at kapaciteten kan opretholdes.

## 4.2. Overfladebelægning

Accoat A/S belagde i december 2014 kølerelementet i den enhed, der nu er installeret på Danish Crown i Ringsted, med den smudsafvisende og korrosionsbeskyttende belægning ACCONAN P339.

Kort om belægningsprocessen:



Figur 5: Belægningen overrisles køleren



Figur 6: Tørring af køler efter belægning

Accoat har tidligere belagt mindre kølere med denne belægning ved at nedsænke hele elementet i den flydende belægning. Den aktuelle kølers størrelse ville medføre, at der skulle bruges meget store mængder af belægning, som er kostbar. En nytænkning af belægningsprocessen var derfor nødvendig. Resultatet blev, at belægningen blev overrislet køleren, som vist i Figur 5. Den overskydende belægning blev ledt tilbage til pumpen og derved brugt igen og igen. Denne procedureændring medførte, at belægningsarbejdet kunne gennemføres med en væsentligt mindre mængde belægning.

For yderligere at sikre at belægningen blev jævnt fordelt over hele kølefladen, blev der konstrueret en vogn, som muliggjorde, at køleren kunne rotere efter belægningsprocessen

og efterfølgende under tørringsprocessen i ovnen. I Figur 6 ses kølerelementet på vej ind i ovnen. Denne fremgangsmåde sikre desuden, at der ikke samles dråber på de nedadrettede flader, men at belægningen hele tiden holdes jævnt fordelt, indtil den er tør og hærdet.

Kort om belægningen:

Acconan P339 er en meget tynd (ca.  $3\mu\text{m}$ ) transparent belægning baseret på nano-teknologi. Belægningens overflade er designet til at have smudsafvisende egenskaber. Belægningen kan anvendes i både surt og alkalisk miljø og hæfter på de fleste metaller.

### 4.3. Ventilator

Til prototypen er der anvendt en aksial Novenco ZerAx AZN 1400/560 ventilator. Ventilatoren er valgt med et stort arbejdsområde, som gør det muligt at variere luft strømmingen betydeligt på prototypen. Ydermere er der monteret en akustisk diffusor for at støjniveauet bliver så lavt som muligt. Ventilatorens omdrejningstal styres med en frekvensomformer.



Figur 7: Ventilator monteret på hybridkøler

Efter kølefladen er ventilatorsektionen placeret. Det er den cirkulære del af hybridkøleren i Figur 7. Nederst består sektionen af en indløbstragt, i midten følger selve ventilatoren, og øverst sidder den akustiske diffusor.

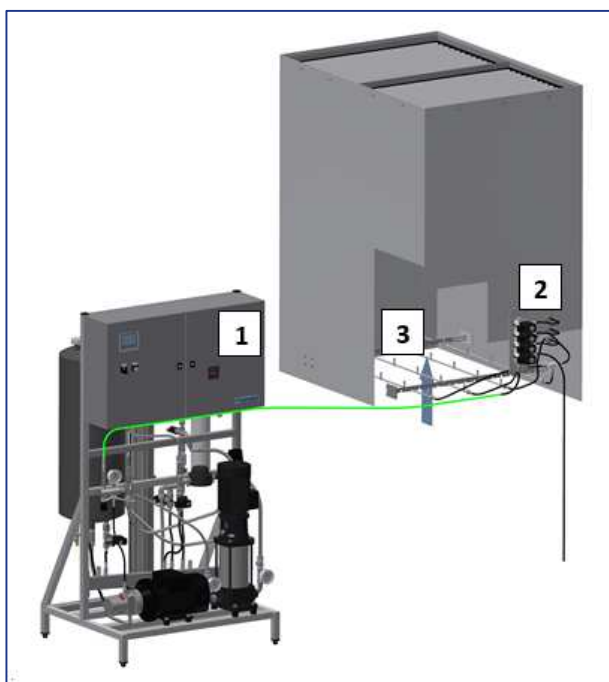
#### 4.4. Højtryksspraysystem (HPRO)

Systemet er opbygget af tre hovedkomponenter, som er illustreret i Figur 8.

1. Kombineret RO filter og højtrykspumpe

Ventilblok, der ved at koble dyserørene ind og ud kan opnå en 7-trins regulering af den samlede vandkapacitet.

Der er otte dyserør, som er opdelt i tre sektioner (trin). Der benyttes rustfrie dyser, der hver giver ca. 2,5 l/h.



Figur 8: Spraysystem

Trin:

1. 18 stk. dyser ~ 45 l/h
2. 36 stk. dyser ~ 90 l/h
3. 52 stk. dyser ~ 130 l/h

Total spray kapacitet 265 l/h @ 65 bar



Figur 9: Dyserør detalje

Dyserne er placeret i et gittermønster med 200 mm mellem dyserne, hvilket sikrer optimal fordampningsdækning uden at spraykeglerne overlapper hinanden og derved danner store vanddråber. Dyserne leverer vandtåge med en finhed af dråberne på 15–25  $\mu\text{m}$ . Hele kølefladearealet er dækket af spraymønstret, således at det er lige vådt overalt, når der sprayes med alle tre trin (fuld kapacitet).

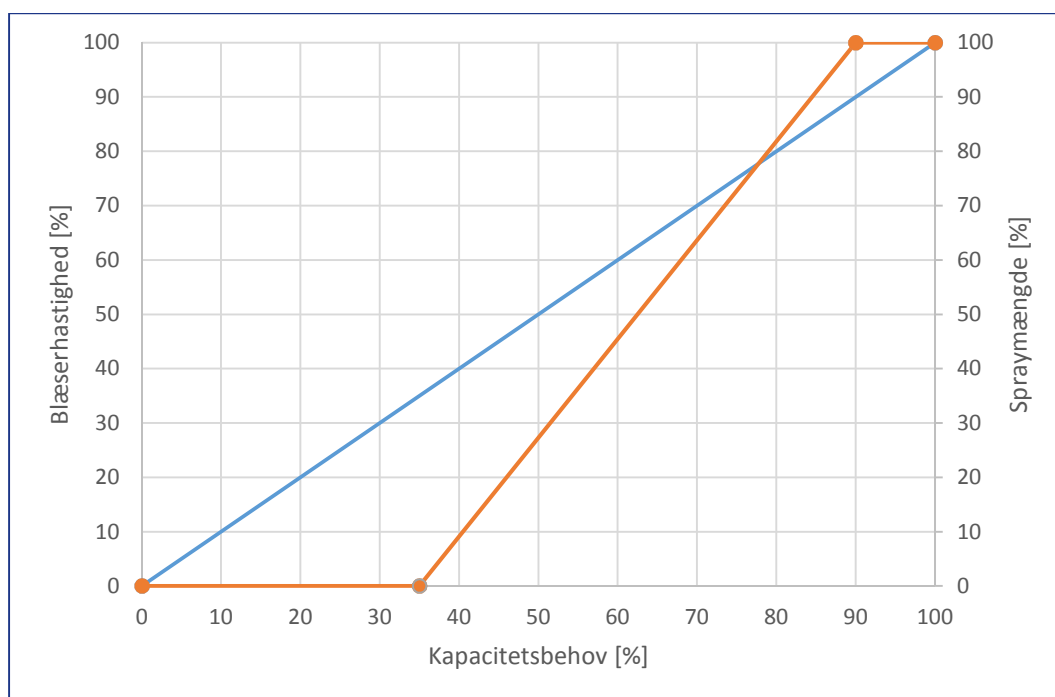
Det estimeres, at 30-50 % af vandet vil fordampe, inden det når kølerens overflade, og derved sænke lufttemperaturen 2-4 °C. Samlet effekt på pumpen er 1,1 kW  $\sim$  4,5 J/s per liter vand.

Alle vandberørte dele er udført i rustfrie materialer, således at det stærkt korroderende RO vand ikke forårsager tæring i rør og ventiler. Serviceintervallet for systemet er en gang per år, hvor filtre udskiftes og eventuelt stoppede dyser renses/skiftes. Der er 8000 timers driftsgaranti/service interval på PAHT højtrykspumpen.

#### 4.5. Styring

Hybridkølerens styringsstrategi er holdt relativt simpel. Input til styringen er kondenseringstryk og omgivelsestemperatur. Output fra styringen giver signal til ventilatorens frekvensomformer og spraysystemet.

1. Ved  $t_{\text{amb}} < 10^\circ\text{C}$ : Der reguleres kun på blæserhastigheden
2. Ved  $t_{\text{amb}} > 10^\circ\text{C}$ :
  - a) Der reguleres kun på blæserhastigheden, indtil denne kommer op på 35%
  - b) Vandmængden øges lineært med blæserhastigheden indtil 90% blæserkapacitet
  - c) Herefter skrues ventilatoren op på 100%



Figur 10: Illustration af styringsstrategi ved  $t_{amb} > 10^{\circ}\text{C}$

Den valgte styringsstrategi har mange optimeringsparametre.

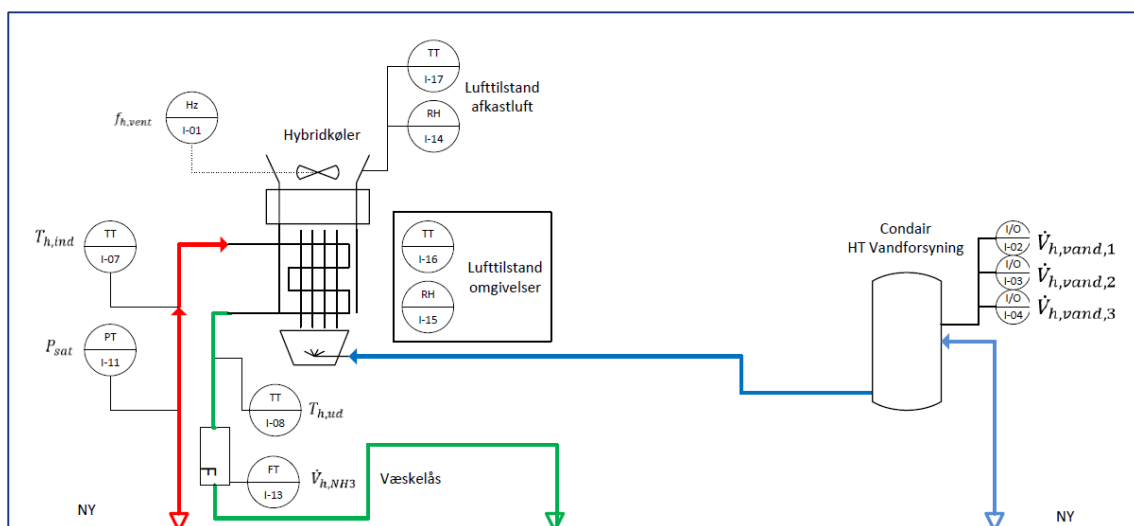
- Der kan findes et optimalt punkt, for hvornår spraysystemet skal aktiveres. Aktiveres det ved for lav lufthastighed, blokerer dråberne kølefladen, og gøres det ved for høj lufthastighed, opnår man ikke det fulde potentiale.
- Forholdet mellem ventilatorhastighed og spraysystem kan optimeres. Når spraysystemet aktiveres, kommer der en kraftig ydelsesstigning, hvorfor der med fordel kan skrues lidt ned for ventilatorhastigheden for at få en jævn regulering.
- En fugtføler kan integreres i styringen, så der tages højde for luftens våde temperatur. Dermed kan styringen beregne den optimale vandmængde til den givne lufttilstand

For en optimal styringsstrategi er det også nødvendig at tage det køleanlæg, som hybridkøleren monteres på, med i betragtningen, så der ikke opstår situationer, hvor to styringer modarbejder hinanden.



## 5. Målinger på prototype

Prototypen, som er opstillet hos Danish Crown A/S i Ringsted, er udstyret med måleudstyr med det formål at måle ydelse, el- og vandforbrug.



Figur 11: PI-diagram med målepunkter

Figur 12, Figur 13 og Figur 14 viser et par eksempler fra opstillingen i Ringsted.



Figur 12: Flowsensor



Figur 13: Tryksensor



Figur 14: Pumpestation

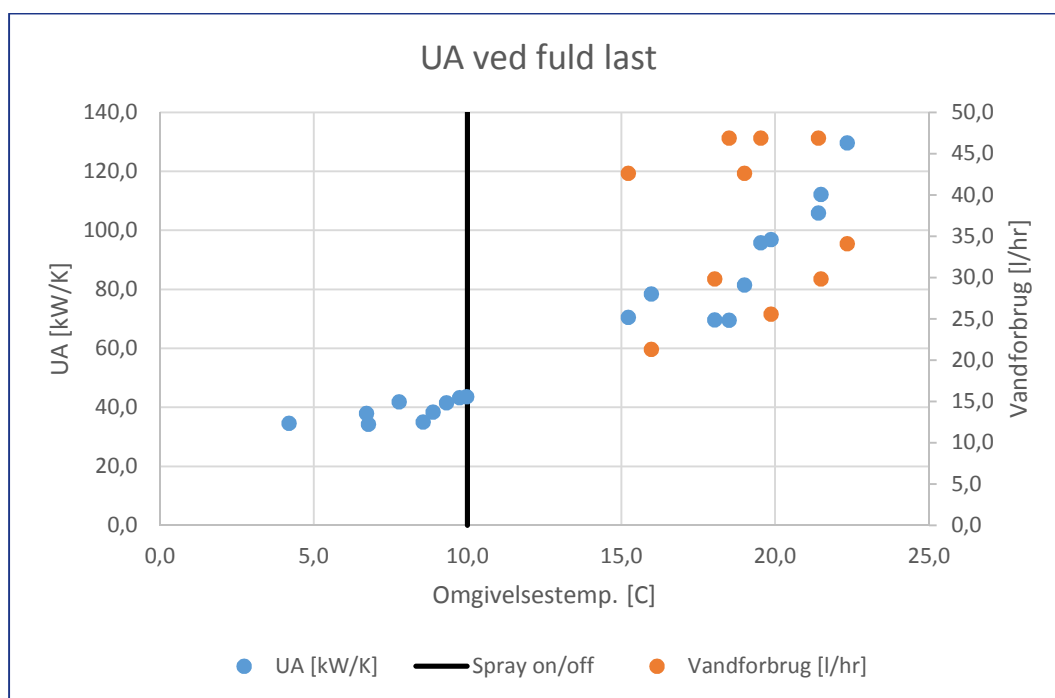


Ydelsen beregnes på baggrund af målt flow, tryk og temperatur på kølemiddelsiden. El-forbruget udgøres af ventilatoren og pumpestationen. Vandforbruget kan beregnes ud fra, hvilket af de syv dysetrin, som pumpestationen har koblet ind.

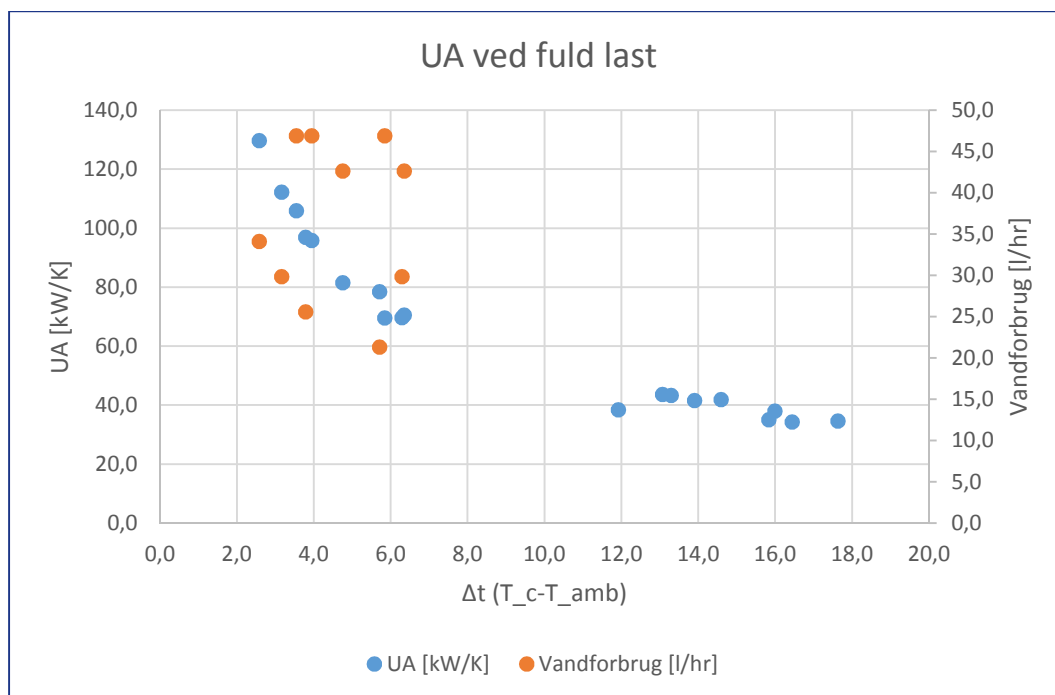
Hele måleopstillingen har været koblet op til en fjernovervåget computer, hvorfra det er muligt at downloade måledata.

### 5.1. Måleresultater

Hybridkølerens UA-værdi er beregnet ved forskellige udetemperaturer og temperaturforskelle mellem udetemperaturen og kondenseringstemperaturen på køleanlægget. Figur 15 og Figur 16 viser resultatet af disse beregninger. Alle punkter er beregnet på baggrund af middelværdier observeret over en times varighed. Der er nogle områder, hvor der ikke er punkter, hvilket skyldes, at der ikke har været nogle valide datasæt på grund af en ustabil flowmåling i disse områder.



Figur 15: Ydelse afhængig af omgivelsestemperatur

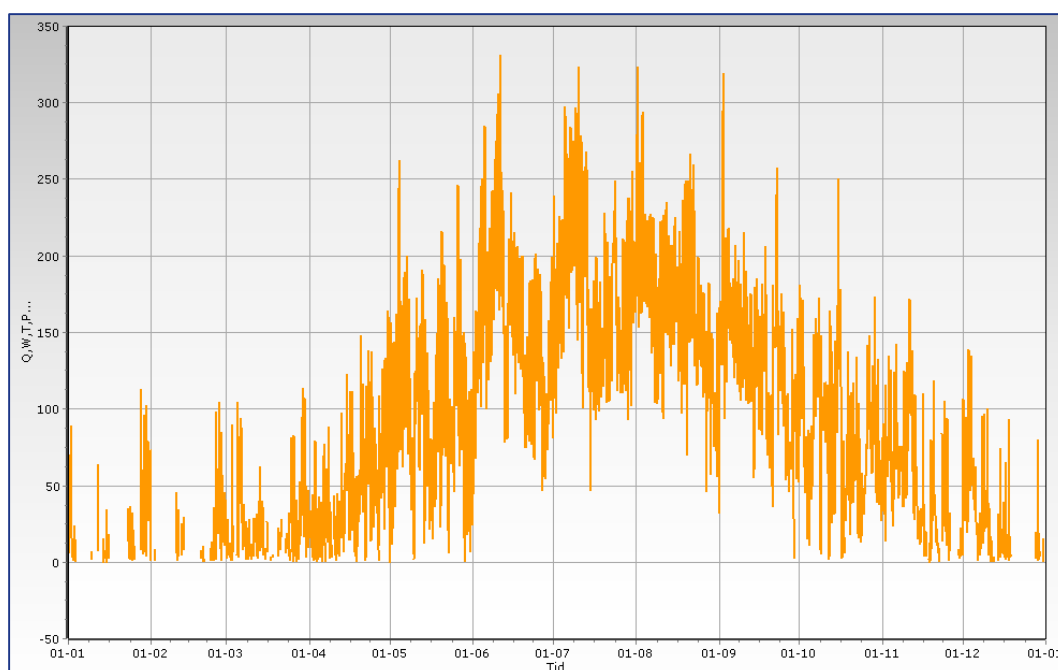


Figur 16: Ydelse afhængig af temperaturforskel

Figurene viser, at hybridkølerens UA-værdi stiger 100%, når den opererer aktivt med spraysystemet. Forbedringen opnås uafhængigt af hvor meget vand der tilføres. Dette kan indikere, at spraysystemets vandmængde kan reduceres yderligere uden det påvirker ydelsen af køleren.

Da slagteriets kølesystem styrer efter at opretholde en konstant kondenseringstemperatur, er alle punkter med lav  $\Delta t$ , jf. Figur 16, med spraysystemet aktive og alle med høj  $\Delta t$  med spraysystemet inaktive.

Der er foretaget årssimuleringer af et kølesystem i PackCalc, se figur 17. Kølesystemet er et to-trins ammoniak anlæg med åben mellemkøler. Energiforbruget er oplyst for henholdsvis lavtryks og mellemtryks trinnet. Kondensatorens elforbrug til ventilator og pumper er inkluderet i mellemtryks trinnet.



Figur 17: Belastningsprofil anvendt i PackCalc

Måledata fra hybridkøleren er benyttet til at sammenligne hybridkøleren med en tørkølers energiforbrug og et køletårns vandforbrug. Resultaterne af disse sammenligninger fremgår af **Figur 18** og **Figur 19**. Der opnås en energibesparelse på 8,1 % og en vandbesparelse på 35% i forhold til de to referencesystemer.

Pumps and fans energy consumption	Air cooler (reference)	Hybrid cooler
LT [kWh]:	203	203
MT [kWh]:	26,961	11,235
Total [kWh]:	27,164	11,438
Compressor energy consumption		
LT [kWh]:	86,021	86,021
MT [kWh]:	166,751	159,855
Total [kWh]:	252,773	159,941
Total energy consumption		
LT [kWh]:	86,224	86,224
MT [kWh]:	193,712	171,090
Total [kWh]:	279,937	257,315
Savings		
Yearly energy savings [kWh]:	-	22,622
Yearly energy savings [%]:	-	8,1

Figur 18: Energiforbrug sammenlignet med tørkøler

	Cooling tower	Hybrid cooler
Yearly water consumption [m <sup>3</sup> ]	786,2	509,6
Yearly water savings [m <sup>3</sup> ]:	-	276,6
Yearly water savings [%]:	-	35,2

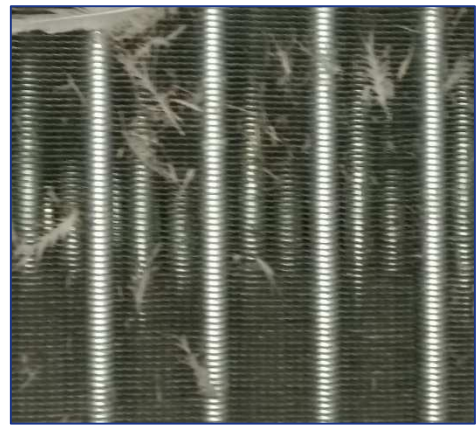
Figur 19: Vandforbrug sammenlignet med køletårn

## 6. Praktiske erfaringer

En vigtig parameter for hybridkølere er korrosion. Da sprayvandet er aggressivt over for materialerne, kan det forventes, at kølefladen nedbrydes, hvis ikke den beskyttes. I nærværende projekt er kølefladen visuelt inspiceret efter seks måneders drift, hvor der ikke var synlige tegn på nedbrydning af kølefladen. Som for alle køleflader placeret i det fri, opsamles der skidt imellem finnerne, som vist på Figur 21. Dette skal fjernes med passende mellemrum for at opretholde en fornuftig performance.



Figur 20: Køleflade og dysearrangement.



Figur 21: Nærbillede af køleflade.

## 7. Konklusion

Denne rapport beskriver det arbejde, der er udført for at kunne fremstille en hybridkøler prototype med en ydelse på op til 400 kW. Projektet er en fortsættelse af det udviklingsarbejde, som er foretaget i PSO projekt. 344-019 "Udvikling af hybridkøler".

Der er designet en hybridkøler prototype bestående af en standard kondensatorflade, en højeffektiv ventilator kombineret med et højtryksdysesystem, som befugter indsugningsluften. Prototypen er korrosionsbeskyttet med en ultra tynd overfladebehandling for at undgå nedbrydning af materialerne.

Prototypen er installeret og har været i drift i seks måneder på Danish Crowns slagteri i Ringsted. Der er i denne periode foretaget målinger af prototypens ydelse og vandforbrug. Samtidig er virkningen af overfladebehandlingen blevet vurderet. Der er ikke fundet tegn på korrosion.

Målinger danner grundlag for års simuleringer foretaget i beregningsprogrammet Pack-Calc. Disse simuleringer viser, at hybridkøleren kan spare 8,1% el i forhold til en almindelig tørkøler, og der kan spares 35,2% vand i sammenligning med et køletårn.

## 8. Referencer

- /1/ Udvikling af hybridkøler, PSO projekt nr. 344-019, Peter Schneider et al., april 2013
- /2/ Energibesparelser på industrielle køleanlæg ved brug af ny luftkølet hybridkøler, fase 2 – Målinger på prototype, PSO projekt nr. 344-029, Jesper Kristoffersen et al., juni 2016