

# **VÆSKEBASERET SORPTIONSPROCES TIL ANVENDELSE FOR TERMISK KØLING I BL.A. LUFTKONDITIONERINGSANLÆG**

*PSO journalnr.: 464-03 projektnr.336-015*

*Februar 2008*

*Lars Reinholdt, Teknologisk Institut  
Jens Christian Riis, DONG Energy*

DRAFT version 03

## Indholdsfortegnelse

1	Indledning.....	3
2	Termisk drevet køling.....	4
3	Sorptionskøling.....	7
3.1	Sorption med affugterhjul (tørsorption) .....	8
3.2	Sorptionssystem baseret på væske (vådsorption) .....	10
3.3	Varmeafgivelse.....	13
4	Kølebehov.....	14
5	Styringsfilosofi .....	16
5.1	Skift mellem driftsmåder .....	18
6	Analyse af adiabatisk køling.....	22
7	Analyse af våd sorptionskøling .....	28
8	Videnindsamling.....	29
9	Valg af absorbermedie.....	30
9.1	Risikovurdering litiumklorid .....	32
10	Beregningsmodel .....	34
11	Pilotanlæg .....	38
12	Fremstilling af prototype .....	42
12.1	Luftkonditioneringsunit .....	42
12.2	Sorptionskreds .....	43
13	Test af prototype.....	45
13.1	Tryktab i ekstra aggregater på luftsiden .....	48
13.2	Hjælpeudstyr.....	49
13.3	Specifikke forbrug på sorptionskøleanlæg på el-siden.....	49
13.4	Vandforbrug til befugtning.....	50
14	Test af styring og regulering.....	53
15	Rapportering .....	56
	Samlede forbrug & CO <sub>2</sub> -emission.....	57
	Samlede forbrug & CO <sub>2</sub> -emission.....	57
	Sammenligningsgrundlag .....	57
	Forbrug til kompressionskøleanlæg .....	57
	Forbrug for væskebaseret sorptionsanlæg .....	58
	Sammenligning.....	59
	Energiforbrug ved lavere indblæsningstemperaturer .....	59
	CO <sub>2</sub> -emission.....	61
16	Konklusion .....	63
17	Kilder.....	64

## 1 Indledning

Formålet med projektet er at udvikle en varmedrevet sorptionskøleproces til luftkonditionering, baseret på en væskebaseret affugtningsproces efterfulgt af adiabatisk køling af luftstrømmen ved direkte fordampning af vand.

Projektets relevans udspringer af muligheden for at udnyttet sammenfaldet mellem behovet for køling og tilstedeværelsen af overskuds fjernvarme. Herved kan en del af det stigende el-behov til luftkonditionering elimineres.

Projektet bygger videre på aktiviteterne omkring udvikling af en sorptionsproces, baseret på et tørt roterende sorptionshjul. Denne proces har en del ulemper, der kan elimineres eller reduceres med indførelsen af en våd proces.

Projektgruppen bestod oprindeligt af:

1. NOVENCO (producerer store luftkonditionerings- og ventilationsanlæg)
2. EcoVent (producerer mindre luftkonditionerings- og ventilationsanlæg, samt højeffektive varmevekslere til veksling mellem ind- og udblæsningsluftstrømme)
3. Københavns Energi (nu DONG), forsyningselskab og energirådgiver
4. Batec (solvarmeanlæg)
5. Solarvent (solcelledrevne bygningsløsninger)
6. Teknologisk Institut (projektleder).

Tidligt i projektet blev det klart, at de primære problemstillinger og derfor den største del af projektets fokus ville være på udviklingen af den våde sorptionsproces. Batec og Solarvent valgte derfor meget tidligt, at træde ud af projektet, da projektet først på lang sigt vil kunne bidrage til disse firmaers udvikling.

Projektet blev gennemført i sit oprindelige omfang, baseret på de resterende partnere.

Århus, 14. maj 2008  
Teknologisk Institut  
Center for Køle- og Varmepumpe teknik

Lars Reinholdt  
Civilingeniør

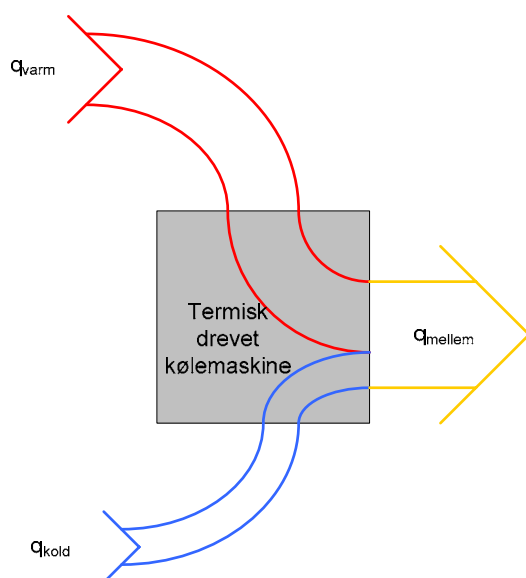
## 2 Termisk drevet køling

Ønsket om bedre komfort, nye byggemåder og -stil samt stigningen i den termiske belastning af bygninger (f.eks. IT/serverrum og andet elektrisk drevet udstyr) har medført en kraftig stigning i ønsket/behovet for aktiv køling af bygningerne. Den mest udbredte kølemåde er baseret på elektrisk drevne kompressorer - med kraftig stigning i elforbruget til følge. I forbindelse med BE06 er der indført nye krav til bygningernes energiforbrug. I disse beregninger indgår elforbruget med faktor 2,5, mens varme indgår med faktor 1. Anvendelse af varmedrevet køling frem for eldrevet vil derfor kunne være et middel til opfyldelse af energirammen.

Der findes en række forskellige termisk drevne kølemetoder:

- Absorption (enkelt eller dobbeltvirkende)
- Turbine
- Adsorption
- Adiabatisk køling (direkte fordampning af vand)
- Diabatisk køling (indirekte fordampning af vand)
- Sorptionskøling (tør eller våd).

Figur 1 viser energiflowdiagrammet for en termisk drevet køleproces. Denne er kendetegnet ved, at køleydelsen ved processens lave temperatur frembringes ved hjælp af en varmestrøm ved en højere temperatur, og den samlede varmestrøm ledes væk ved en ”mellem” temperatur mellem de to førnævnte.



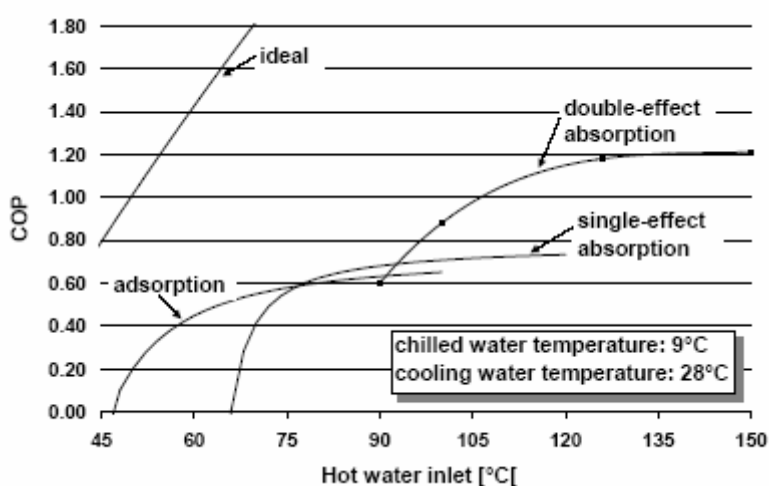
Figur 1: Termisk drevet køleproces med COP = 0,5.

Godheden af en køleproces udtrykkes normalt ved COP (Coefficient of Performance) givet ved:

$$COP = \frac{q_{køl}}{q_{var m}}$$

hvor  $q_{køl}$  er køleydelsen (kW), og  $q_{var m}$  er den tilførte varmestrøm, der driver processen (kW).

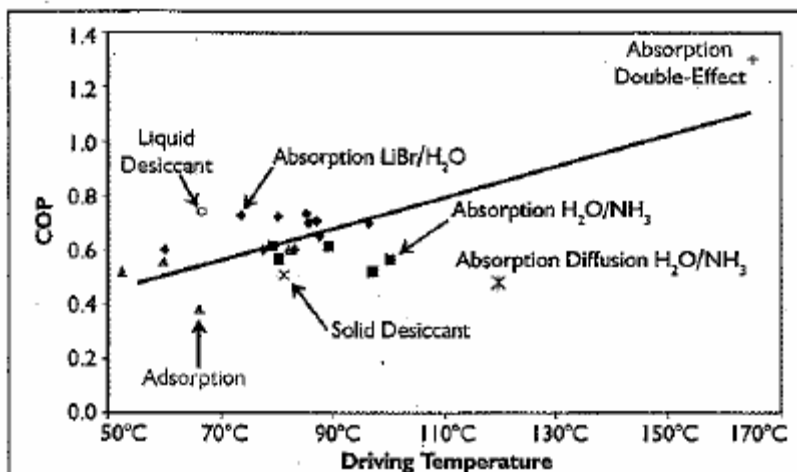
Figur 2 viser den teoretiske Carnot-virkningsgrad, der er den højest opnåelige, samt den opnåelige COP for ad- og absorptionsprocesser.



Figur 2: COP-kurver for ideel Carnot-proces samt state-of-the-art adsorptions- og absorptionsprocesser [1].

Det fremgår af kurven kaldet "ideal" i Carnot-processen, at den teoretisk maksimalt opnåelige COP hurtigt falder ved faldende, drivende temperatur: f.eks. er COP-Carnot = 1 ved en drivende temperatur på 50°C ved fremstilling af 9°C koldt vand med en køletårstemperatur på 28°C.

Figur 3 viser eksempler på COP-værdier for forskellige teknologier, målt på europæiske soldrevne køleanlæg.



Figur 3: Målt COP på nogle europæiske soldrevne køleanlæg. Værdierne kan ikke sammenlignes direkte, da der er tale om forskellige driftsforhold /2/.

I forhold til traditionel mekanisk kompressorkøling er der tale om lave COP-værdier, men da den varmedrevne proces normalt drives med billig/gratis varme (spildvarme, solvarme), kan der ikke foretages direkte sammenligning.

En relativ lav COP for termisk drevne køleprocesser medfører et behov for afgivelse af en betydelig større varmemængde i forhold til et veldimensioneret mekanisk kølesystem: ved COP = 0,5 afgives der 3 gange køleydelsen (se Figur). Dette kræver ekstra opmærksomhed ved design af det samlede system, da der er risiko for, at elforbruget til diverse pumper og ventilatorer kan blive betydeligt. Et godt mål for vurdering heraf er COP<sub>elektrisk</sub> givet ved:

$$COP_{elektrisk} = \frac{q_{køl}}{P_{elektrisk}}$$

hvor P<sub>elektrisk</sub> er elforbruget (kW) forbundet med frembringelse af q<sub>køl</sub> (kW).

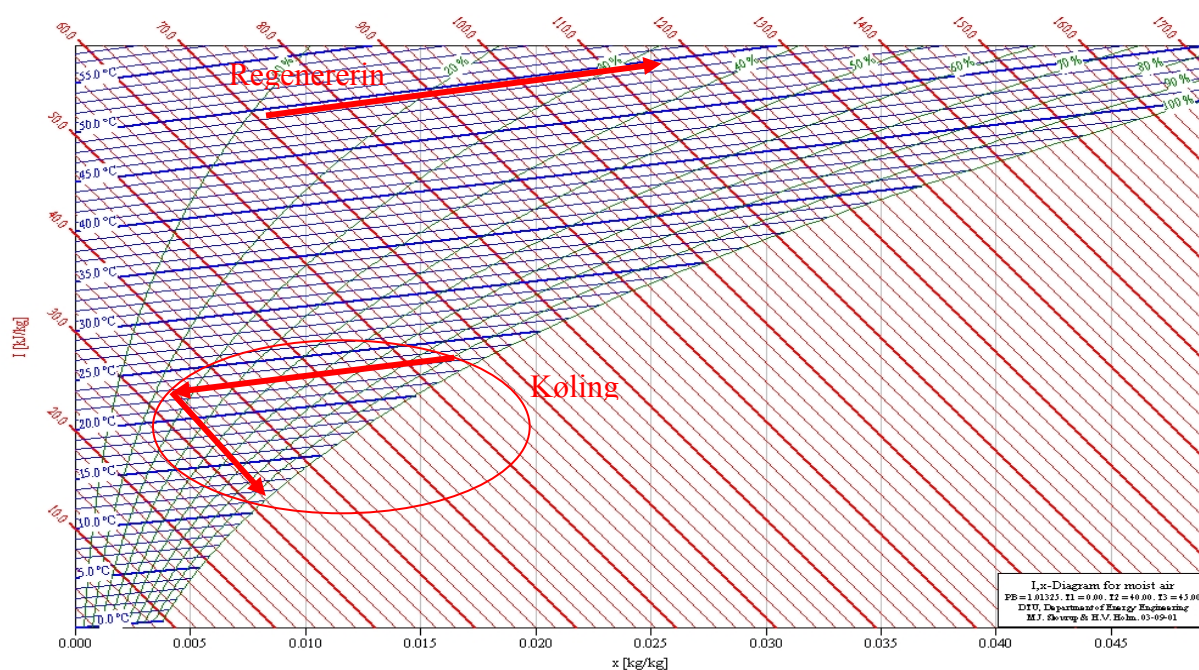
### 3 Sorptionskøling

Sorptionskøling baserer sig på en affugtning af luften med efterfølgende adiabatisk befugtning, der medfører fald i temperaturen. Hvis luften er tør nok, kan den ønskede afkøling opnås uden affugtning. Den følgende beskrivelse omhandler processen med behov for affugtning.

På engelsk betegnes sorptionskøling mere sigende ”Dessicant Evaporative Cooling (DEC) systems”, der kan oversættes med ”affugtningsfordampningskøling”.

Teoretisk består sorptionsprocessen af en isotherm affugtning af indblæsningsluften med en efterfølgende adiabatisk befugtning af luften. Den absorberede fugt skal efterfølgende afgives fra absorptionsmediet. Dette gøres typisk ved at opvarme enten afkastluften eller absorptionsmediet, hvorefter det er muligt at afgive fugten til luften. Denne proces er ens for alle typer sorptionsanlæg, uanset om de anvender tør eller våd sorption.

Den ideelle proces ses i figur 4.



Figur 4: IX-diagram med den ideelle proces indtegnet.

Den ideelle proces kræver køling af sorptionsmediet under selve luftaffugtningen, hvilket ikke sker under de her beskrevne processer.

I det følgende gennemgås to typer sorptionssystemer:

Tørsorption, der er baseret på et roterende affugterhjul.

Vådsorption, der er baseret på affugtning vha. en væskestrøm.

### 3.1 Sorption med affugterhjul (tørsorption)

I de foregående projekter på området (ENS j.nr. 731327/00 og ENS j.nr. 033005/33013-0047) er der anvendt affugterenheder, baseret på et roterende affugterhjul bestående af cellulose behandlet med litiumklorid: Indgangsluften affugtes ved at strømme gennem den del af hjulet, der er blotlagt i indblæsningskanalen. Herved overføres en del af luftstrømmens fugt til hjulets materiale. Gennem hjulets langsomme rotation føres materialet efterfølgende ind i regenereringszonen, hvor fugten drives ud ved hjælp af opvarmet luft. Til regenereringen anvendes en varmekilde, f.eks. fjernvarme, spildvarme eller solvarme. Princippet for sorptionskøling med affugterhjul er angivet i figur 5.

Processen har gennem demonstrationsprojekter vist sig at fungere, og der findes i dag kommercielt tilgængelige anlæg.

Imidlertid er der væsentlige ulemper og energiøkonomiske forhold, der kan forbedres:

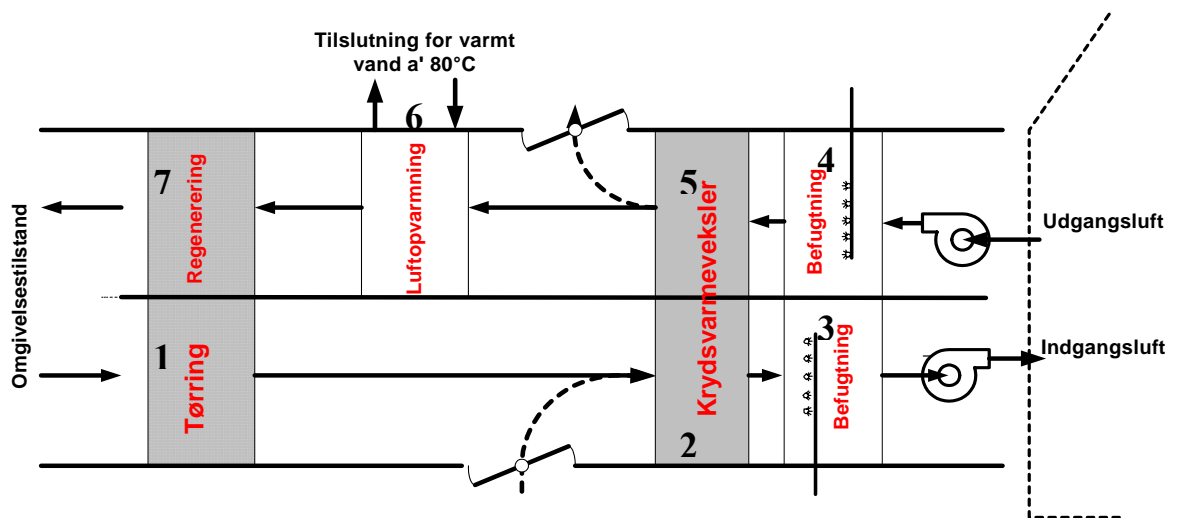
Da affugtningen foretages i et affugterhjul, føres der en ikke ubetydelig varmemængde fra den varme luftstrøm til den kolde luftstrøm (pga. hjulets termiske masse). Affugterhjulet kommer dermed til at virke som en rotationsvarmeveksler, hvilket i denne sammenhæng er direkte i modstrid med ønsket om afkøling af indblæsningsluften. Tryktabet i affugterenheden er typisk i størrelsesordenen 200-250 Pa, hvilket giver anledning til et væsentligt forøget energiforbrug til ventilation sammenlignet med kompressor-køling eller andre former for køling. Luften kan dog føres uden om affugterhjulet i perioder, hvor der ikke er behov for affugtning.

Affugtning af indblæsningsluften og regenerering af affugterhjulet kan ikke afkobles og skal ske samtidigt.

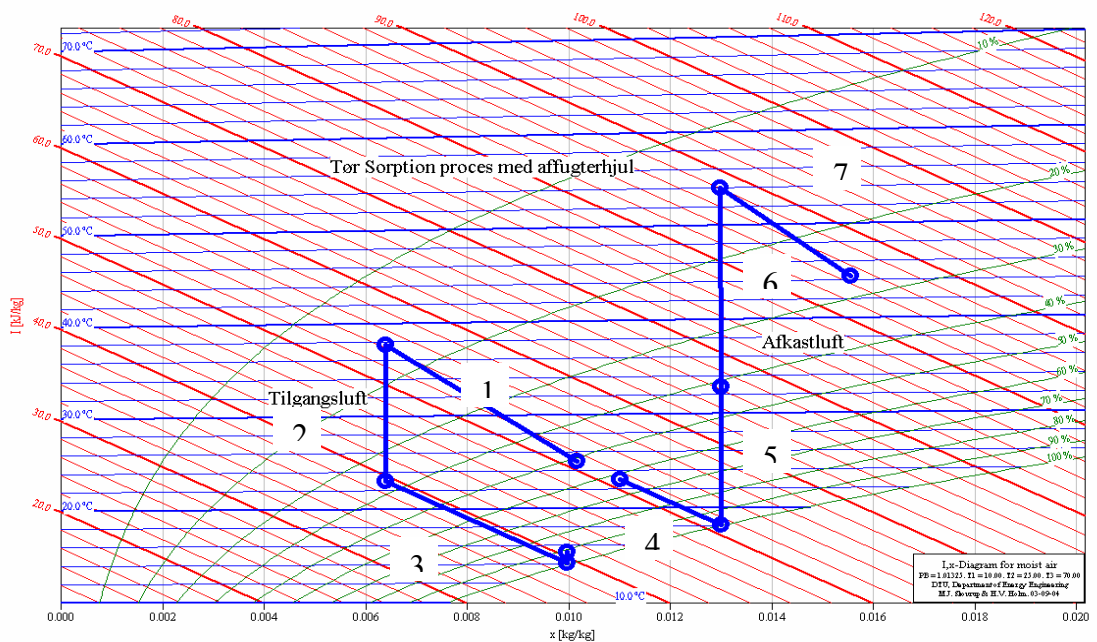
Varmekilden skal typisk have en temperatur på ca. 70 - 80°C for at kunne affugte kontinuerligt.

Anvendelse af et væskebaseret sorptionsmedie frem for affugterhjulet kan afhjælpe en del af ovenstående, hvilket er baggrunden for nærværende rapport.





Figur 5: Princip for tørabsorption.



Figur 6: Faktisk procesforløb.

Forklaring til figur 5 og figur 6, der viser processen i IX-diagrammet:

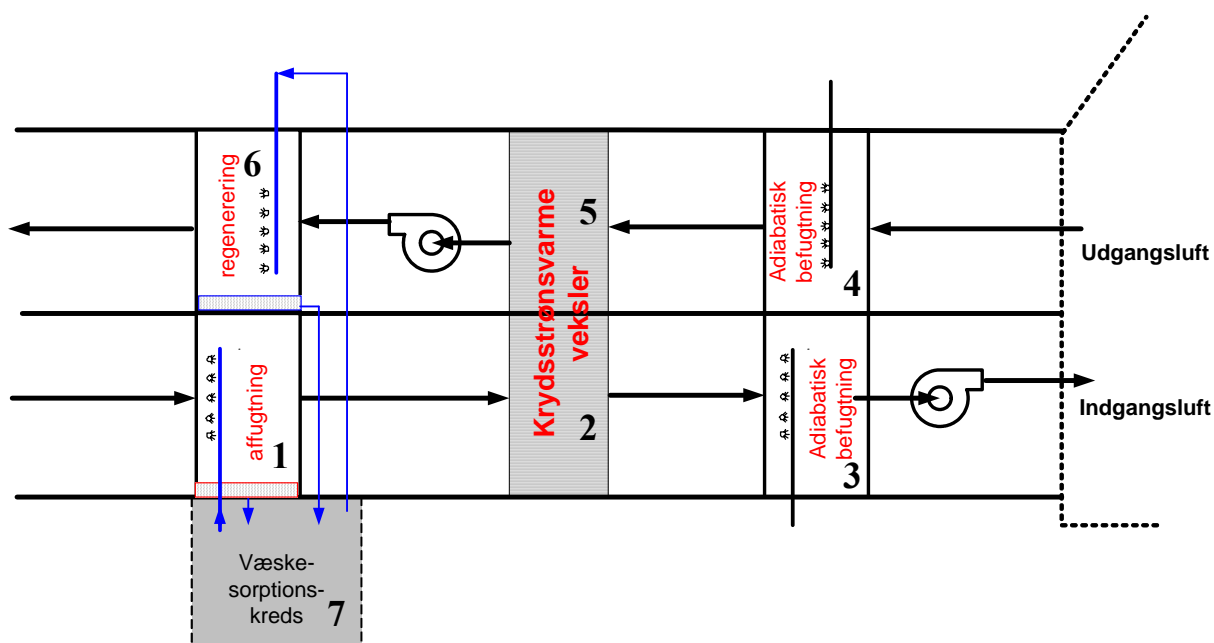
1. Tørring af indsuigningsluften
2. Varmerveksling med den koldere afkastluft
3. Adiabatisk køling af indblæsningsluften
4. Adiabatisk køling af afkastluften
5. Krydsveksling med den varmere indblæsningsluft
6. Opvarmning før regeneratoren
7. Regenerering.

### 3.2 Sorptionssystem baseret på væske (vådsorption)

Denne proces, der er vist i figur 7, fungerer i princippet på samme måde som tørsorption. Affugterhjulet er erstattet af en luftvasker (1), hvor luften affugtes ved direkte kontakt med en opløsning af f.eks. litiumklorid. Opløsningens evne til at absorbere luftens fugt afhænger af koncentrationen og temperaturen, og processen kan forløbe uafhængig af regenereringen, så længe der findes "frisk" opløsning f.eks. fra en lagertank.

Efter passende opvarmning i en varmeveksler regenereres den absorberende væske igen ved direkte kontakt med luft i en luftvasker (6). Dette behøver, som nævnt, ikke at ske samtidig med affugtningen af indgangsluften.

Som for tørsorption kan det vælges at lede luftstrømmene uden om de to sorptionsluftvaskere, når der ikke er behov for affugtning (spjæld for dette er ikke vist i figur 7).



Figur 7: Princip for vådsorption, hvor udgangsluften anvendes til regenerering.

Sammenlignes tør- og vådsorption kan følgende konkluderes:

- Da affugtersiden og regenereringssiden ikke er i direkte fysisk kontakt med hinanden, kan varmeudvekslingen mellem de to kredse elimineres.
- Tryktabet i luftvaskerne forventes at kunne reduceres til 20-25% af tryktabet i affugterhjulet, hvilket giver et væsentlig lavere energiforbrug til ventilatorerne.
- Da opvarmningen af opløsning før regenerering sker direkte, er kravet til temperaturen på varmekilden reduceret i forhold til tørsorption.

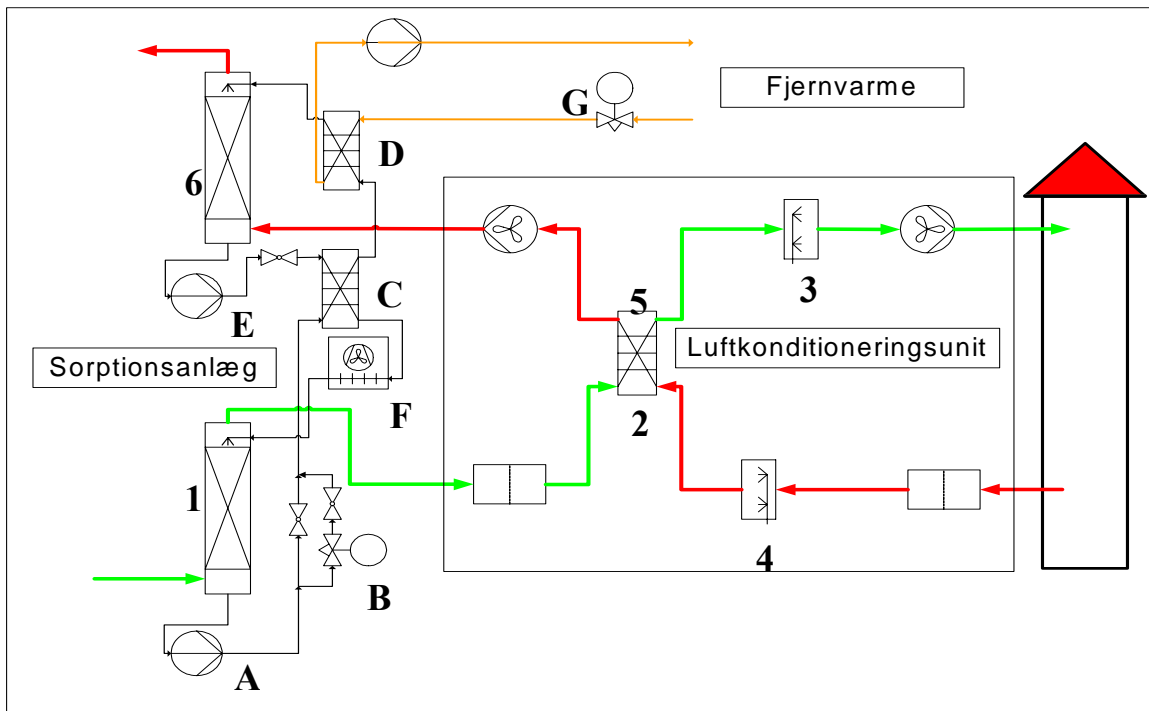
- Processen kan anvende energilagring gennem lagring af opkoncentreret opløsning. Da regenereringsprocessen er adskilt fra affugtningsprocessen, er det muligt at køre regenereringsprocessen kontinuert eller på optimale tidspunkter, selvom belastningen svinger over døgnet. Dette er specielt interessant i forbindelse med solvarme eller overskudsvarme fra procesindustri og fjernvarme.
- Processen kan reverseres og bruges som varmepumpe.
- Der er mulighed for flere forskellige styringsfilosofier.
- Systemet er betydelig mere komplekst.
- Systemet kan opbygges med én central regenereringsunit og flere decentrale kølesteder med affugtning. Sorptionsvæsken pumpes ud til de enkelte forbrugssteder. I modsætning til kølevand er der intet termisk tab i rørsystemet.
- Affugter- og regenereringsflow kan være uafhængige. Således kan systemet baseres på, at kun en delstrøm regenereres.
- Systemet skal designes, så medrivning af sorptionsmedie elimineres.

Da dette projekt omhandler mindre anlæg, er det valgt at arbejde med et koblet system, hvor regenereringen af den absorberende væske sker samtidig med affugtningen af indgangsluften. Det er valgt at regenerere det fulde flow, hvorved der kan anvendes lavere regenereringstemperatur samt opnås et betydeligt simplere system. Det vil sige, at mulighederne for energilagring i form af opkoncentreret absorptionsvæske samt forskudt regenerering ikke er undersøgt. Det anvendte design er vist i figur 8.

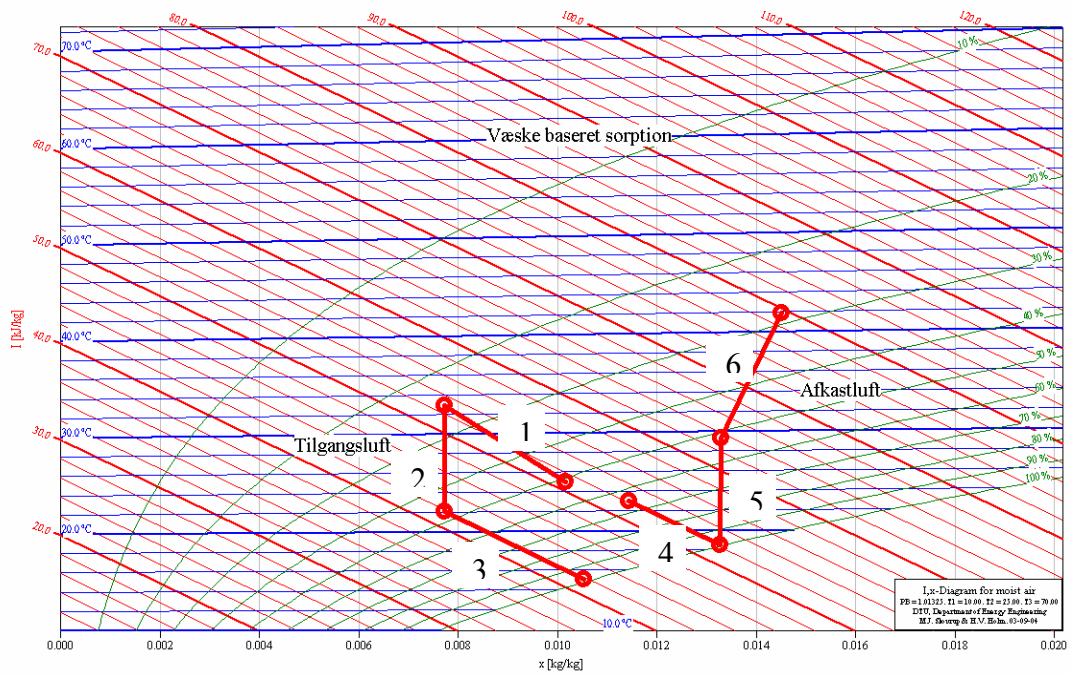
Forklaring til figur 8 og 9. Numrene beskriver luftflowene og bogstaverne beskriver sorptionsvæskens flow:

1. Tørring af indsugningsluften i ”affugtnings-luftvasker”
2. Varmevæksling med den koldere afkastluft
3. Adiabatisk køling af indblæsningsluften
4. Adiabatisk køling af afkastluften
5. Krydsvæksling med den varmere indblæsningsluft
6. Regenerering af væskeflowet i ”regenereringsluftvasker”, hvor både temperatur og fugtindhold stiger. Hvis udgangsluften ikke anvendes til regenerering, vil denne del ikke være forbundet til 5.

- A. Pumpe for svag opløsning
- B. Flowregulering
- C. Varmegenvinding
- D. Opvarmning af svag opløsning
- E. Pumpe for stærk opløsning
- F. Køleflade
- G. Regulering af opvarmning (i dette tilfælde fjernvarme).



Figur 8: Princip for vådsorption med væskekedre. Afkastluftstrømmen anvendes til regenerering.



Figur 9: Procesforløb for vådsorption.

### 3.3 Varmeafgivelse

Som nævnt er varmemængden, der skal køles væk, betydelig større for varmedrevne processer, sammenlignet med mekanisk drevne køleprocesser.

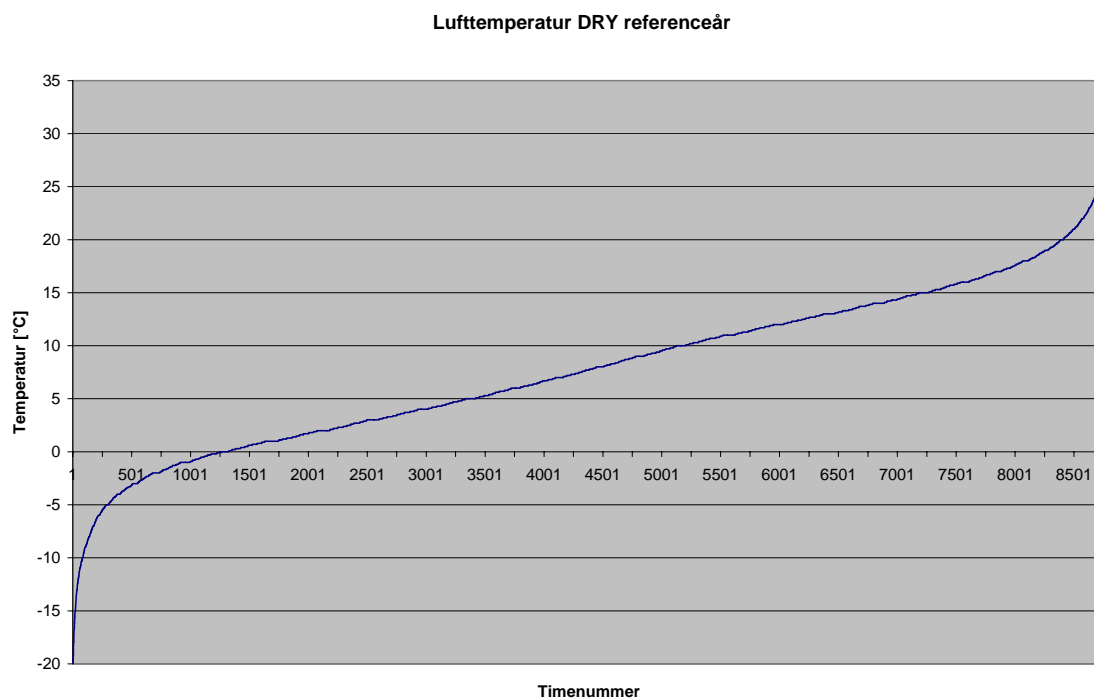
Sammenlignet med de øvrige termisk drevne køleprocesser er energiforbruget hertil dog betydelig mindre for både tør- og vådsorption. I begge tilfælde bortledes meget af varmen direkte med luftstrømmen til regenereringen, hvorfor det kun er det ekstra trykfald gennem luftvaskerne, der hæver elforbruget.

Ved tørsorption overføres den resterende varmemængde fra den varme regenererings-side til den kolde indblæsningsside, hvor den resulterer i den utilsigtede opvarmning.

Ved vådsorption genvindes en stor del af den resterende varme i varmeveksleren C i figur 8, hvorfor kun en lille del skal bortkøles i kølefladen F. I nogle driftstilfælde bliver denne mængde endda mindre end varmemængden ved konventionel mekanisk kølings-kondensator.

## 4 Kølebehov

Figur 10 viser en optælling af den tørre lufttemperatur iflg. DRY-referenceåret.



Figur 10: Tør lufttemperatur i Danmark ifølge DRY-referenceår. Antallet af timer under en given temperatur aflæses på skala "Timenummer".

Heraf fremgår, at den tørre udendørstemperatur er under 15°C ca. 7200 timer pr. år.

Ved beregning af driftstiden, hvor der er behov for køling, kan skemaet i figur 11 anvendes. Det viser en sammentælling af timer i DRY-referenceåret med samme tilstand, udtrykt ved tør temperatur (lodret), og det antal grader, den våde temperatur er lavere (vandret).

Antages temperaturstigningen i indblæsningsluften (på grund af ventilator og varmeindfald i kanaler) til at være 1 °C, vil antallet af driftstimer med køling for en ønsket indblæsningstemperatur på 16°C være 1579 timer. I et konventionelt luftkonditioneringsanlæg skal kompressorkøleanlægget altså være i drift i dette timetal. Hæves indblæsningstemperaturen til 18°C, falder driftstiden til 931 timer. Valg af indblæsningstemperatur har altså meget stor betydning for driftstiden med køling.

<b>DRY standardår</b>												Antal ialt	1579
Antal timer dem samme konditioner													
Våd temperatur, udtrykt som forskel til den tørre temperatur (°C)													Antal
Tør temp (°C)	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	>=11	
32 - 33											1		1
31 - 32													0
30 - 31											2		2
29 - 30										2	1		3
28 - 29									2	3			5
27 - 28							2	1	3	2			8
26 - 27					1	2	1	5	5				14
25 - 26					1	3	5	4	3	1	3	1	21
24 - 25				1	3	9	7	8	4	1			33
23 - 24					10	14	13	3	7				47
22 - 23		1		8	12	17	11	8	3				60
21 - 22			2	6	25	22	9	6	3	4			77
20 - 21	1	1	10	25	34	21	5	5	3	1			106
19 - 20	5	5	12	52	26	20	2	4	6				132
18 - 19	10	15	50	41	38	19	8	7	1				189
17 - 18	30	40	48	41	41	16	12	5					233
16 - 17	57	67	51	50	34	26	5	4	2				296
15 - 16	83	92	59	58	31	17	9		3				352

Figur 11: Sammentalt timetal afhængig af tilstand baseret på DRY.

## 5 Styringsfilosofi

Anvendelsen af sorptionskøling åbner for muligheden for afkobling af indblæsningsluftens temperatur og fugtighed.

Styringsstrategien er afhængig af flere forhold:

- Ønsket indblæsningstemperatur (fast eller flydende i forhold til udendørstemperaturen).
- Ønsket fugtighed af indblæsningsluften (fast, minimum og/eller maksimum).
- Temperatur og fugtighed af udsugningsluften.

Udover den direkte betydning har også kombinationen af ovenstående betydning.

Hvis det er uden for opvarmningssæsonen, kan systemet køre i fire forskellige driftsmåder, afhængig af ind- og udsugningsluftens temperatur og fugtighed.

Opstillet efter stigende udendørstemperatur bliver disse:

1. Indblæsning af udeluft uden køling.
2. Befugtning af indblæsningsluften (adiabatisk køling).
3. Som 2, med befugtning af udsugningsluften (adiabatisk køling) og varmeveksling med indsugningsluften, før denne befugtes.
4. Som 3, med affugtning af indsugningsluften før varmeveksling.

Da det er muligheden for fordampning af vand, der udnyttes i forbindelse med adiabatisk køling, afhænger valget af driftssituation også af luftens fugtighed. Som det er nærmere beskrevet i afsnit 9 "Beregningsmodel", er der udviklet to beregningsmodeller til analyse af styringsfilosofi og generel simulering af køleprocessen:

- A. "Adiabat\_koel\_AHU.EXE", der dækker driftsmåde 1 til 3.
- B. "Sorp\_koel\_AHU.EXE", der dækker driftsmåde 4.

Model A kan anvendes til at undersøge adiabatisk køling generelt, mens model B har både affugtning ved hjælp af våd sorptionsproces og adiabatisk køling.

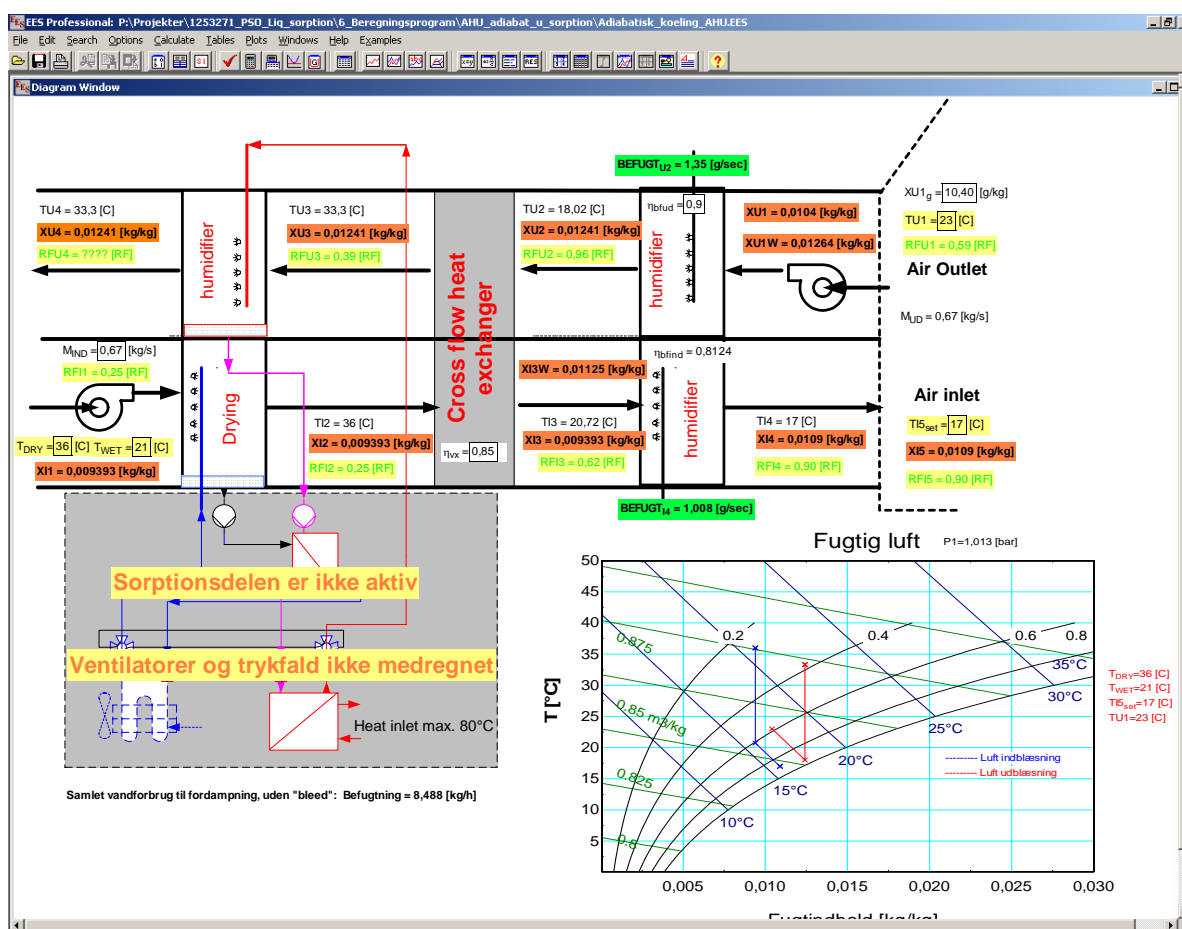
Et beregningseksempel kan ses i figur 12. Her opnås en afkøling af indblæsningsluften til 17 °C på en meget varm dansk sommerdag (36 °C tør/ 21 °C våd). Den relative fugtighed af indblæsningsluften er meget høj (90%), hvilket dog "kun" svarer til 54% ved 23 °C. I eksemplet er anvendt state-of-the-art varmevekslere. (Disse findes både som rotationsvekslere og modstrømsvekslere, og de sidste er bl.a. fra ECOVENT). Der er ikke taget hensyn til tryktab samt ventilatorernes opvarmning af luftstrømmen.



I analyserne af de forskellige driftssituationer er det forudsat, at kapaciteten af befugtningsfladerne kan reguleres. Som det er beskrevet i afsnit 11 (Pilotanlæg), blev dette ikke valgt ved opbygning af prototypen. Kapacitetsreguleringen af affugtningen kan ske på flere måder.

Ud fra et energimæssigt synspunkt er det valgt kun at undersøge to:

- Konstant sorptionsvæskeflow med varierende koncentration og dermed absorptionssevne. Denne strategi kræver lavest regenereringstemperatur.
- Varierende sorptionsvæskeflow med konstant koncentration og dermed absorptionssevne. Denne strategi kan anvendes ved konstant (høj) regenereringstemperatur.

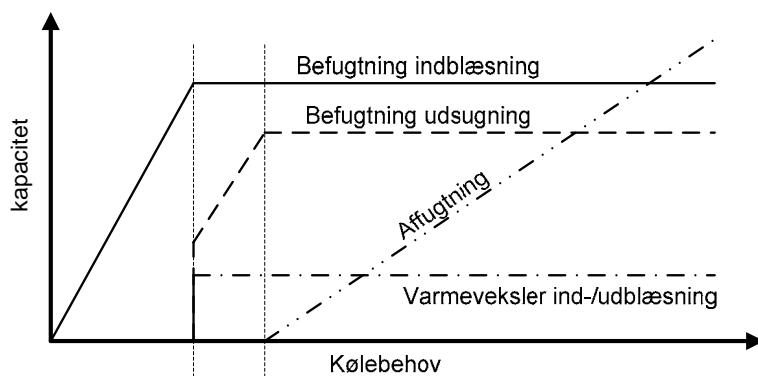


Figur 12: Eksempel på simulering af adiabatisk kølet luftkonditionering ved 36 / 21°C udendørsluft og køling til 17°C. Indblæsningsluftens relative fugtighed på 90% svarer til 62% ved 23°C.

## 5.1 Skift mellem driftsmåder

Ved stigende kølebehov er skiftet mellem de forskellige driftsmåder let at bestemme:

Når den pågældende driftsmåde er udnyttet maksimalt og kravet til indblæsningstemperaturen ikke længere kan overholdes, skal der skiftes til næste ”trin” (driftsmåde). Grafisk, kan styringsfilosofien udtrykkes som vist i figur 13.

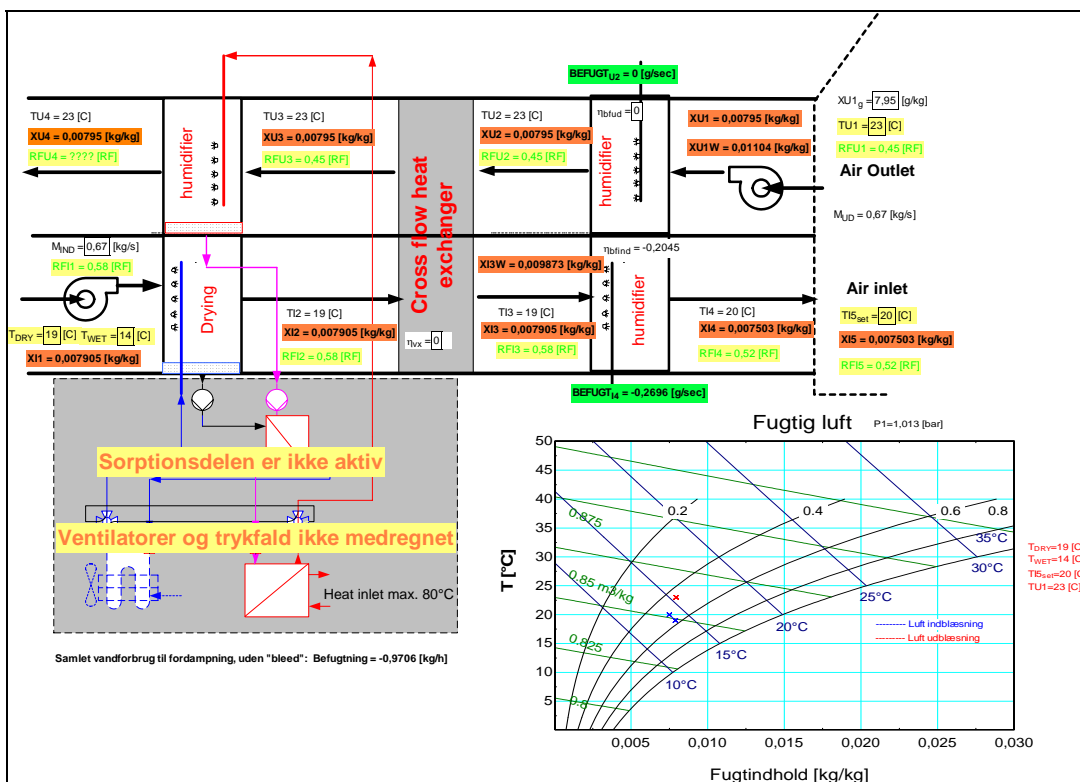


Figur 13: Styringsstrategi for sorptionskøleanlæg.

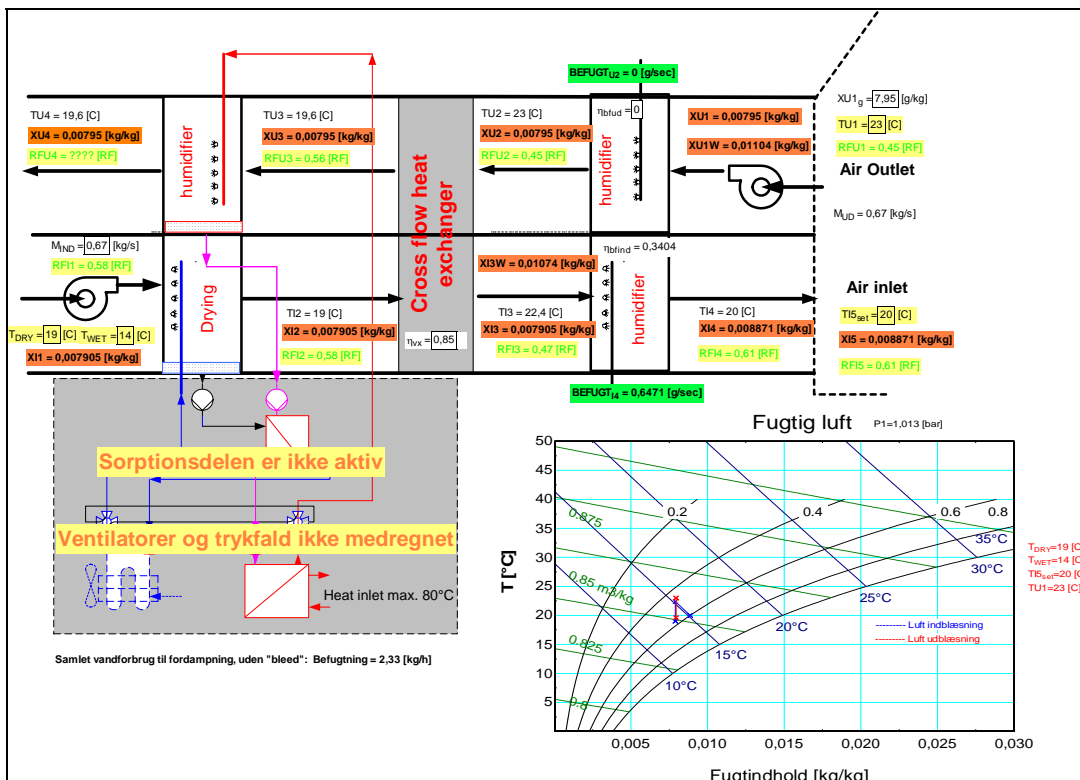
Til gengæld er det langt mere vanskeligt at bestemme det rette tidspunkt for skift til lavere ”trin”, når kølebehovet igen falder.

I det følgende ses trin 1 til 3 gennemregnet for samme udendørstilstand, 19°C tør/14°C våd, og samme krav på 20°C lufttemperatur, svarende til 21°C indblæsningstemperatur (programmets virkemåde samt fortolkning af resultaterne er gennemgået i afsnit 9).

Da den tørre udendørstemperatur er lavere end den ønskede indblæsningstemperatur, er der behov for en smule opvarmning, hvilket fremgår af figur 14 i form af negativ virkningsgrad på befugtningens fladen i indblæsningsluften. Undersøgelse af metoder til opvarmning af indblæsningsluften ligger uden for målet med nærværende rapport. Figur 15 viser drift ved samme udendørstilstand, men med varmeveksleren mellem ind- og udblæsning indkoblet. Opvarmning af indblæsningsluften til 22,4°C gennem varmeveksleren medfører, at der skal foretages befugtning af indblæsningsluften, for at kravet til indblæsningstemperatur kan overholdes. Anlægget holdes med andre ord i driftsmåde 2 med vandforbrug og større fugtbelastning af indblæsningszonen til følge. Denne driftstilstand kan være ønskelig, hvis der foreligger et krav til minimum fugtindhold i indblæsningsluften.

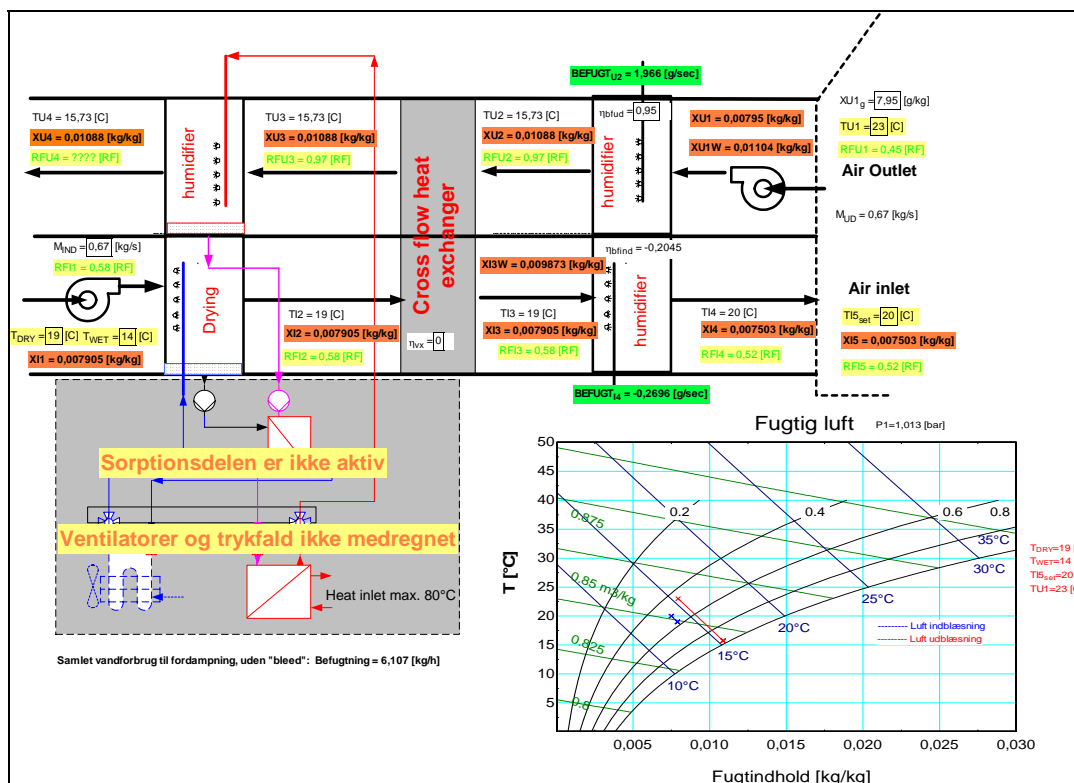


Figur 14: Driftsmåde 1. Negativ befugtning i form af  $\eta_{bfind} < 0$  udtrykker, at der er behov for opvarmning af indblæsningsluften.



Figur 15: Drift af varmeveksleren medfører en (utilsigtet) opvarmning af indsugningsluften, som kræver, at systemet skal køre i driftsmåde 2, for at kravet til indblæsningstemperaturen kan overholdes.

Figur 16 viser drift ved samme udendørstilstand, men med både befugtning af udsugningsluften og varmeveksleren mellem ind- og udblæsning indkoblet. Dette medfører en afkøling af indsugningsluften fra 19°C til 16°C, hvilket vil kræve yderligere opvarmning før indblæsningen i zonen.



Figur 16: Drift af befugtning af udsugningsluften samt varmeveksleren medfører en (utilstøttet) afkøling af indsugningsluften, som igen medfører et betydeligt behov for opvarmning af indblæsningsluften for overholdelse af kravet til indblæsningstemperatur.

Udover disse kan der også ske unødigt vandforbrug, hvis befugtning af udsugningsluften er i drift, uden der er behov for det. Så længe luftstrømmene by-passes varmeveksleren, vil dette ikke påvirke indblæsningsluften.

For både tør- og vådsorption kan driftsmåde 4 også medføre uønsket behov for køling: Drift af affugtningen vil medføre en opvarmning af indsugningsluften, selvom der ikke sker en affugtning. I begge tilfælde vil en større eller mindre andel af den til regenereringen tilførte varme blive overført til indsugningsluften. Med andre ord vil man "betale" dobbelt i form af spildt regenereringsvarme, der blot køles væk i sorptionsprocessen med et efterfølgende behov for køling af indblæsningsluften.

Af ovenstående fremgår, at man let kan komme i en situation med et stabilt, velfungerende system, der overholder kravene til indblæsningstemperatur, som har et forhøjet vand- og evt. varmeforbrug.

Skift mellem de forskellige driftsmåder er ukompliceret ved stigende behov for køling, når strategien er lagt fast.

Skiftet ved faldende varmebehov er derimod meget vanskeligt, hvor en simpel styring baseret på måling af indblæsningstilstanden ikke er tilstrækkelig. Der er behov for en prediktiv styring, der på baggrund af de aktuelle driftsdata, kan beregne det optimale skift.

Forudsat at strategien beskrevet på side 16 med først at udnytte kølekapaciteten ved befugtning af indblæsningsluften anvendes, kan skiftet mellem driftsmåderne baseres på en ret simpel beregning af, hvornår der ikke længere er behov for, at:

- 1) anvende affugtning af indblæsningsluften
- 2) varmeveksle med den befugtede udsugningsluft.

Som det fremgår af figurerne i næste afsnit, vil det alternativt være muligt at fastlægge en karakteristisk konstant våd temperatur, hvor skiftet skal foretages. Denne temperatur vil være afhængig af effektiviteten af befugterne og varmeveksleren mellem de to luftstrømme, samt tilstanden af udsugningsluften.

## 6 Analyse af adiabatisk køling

Som beskrevet i afsnit 5, kan driften opdeles i fire skarpt adskilte driftsmåder:

1. Indblæsning af udeluft uden køling.
2. Befugtning af indblæsningsluften (adiabatisk køling).
3. Som 2, med befugtning af udsugningsluften (adiabatisk køling) og varmeveksling med indsugningsluften før denne befugtes.
4. Som 3, med affugtning af indsugningsluften før varmeveksling.

I dette afsnit ses nærmere på mulighederne i ovennævnte punkt 2 og 3.

Både driftsmåden og kapaciteten er meget afhængig af kravet til indblæsningsluften samt udsugningsluftens tilstand:

- Jo højere temperatur og (relativ) fugtighed, der kan tillades, jo større del af kølebehovet kan dækkes af befugtning af indblæsningsluften.
- Jo lavere temperatur og fugtighed af udsugningsluften, jo mere kan denne udnyttes til køling gennem varmeveksling med indsugningsluften.

Figur 17 viser resultatet af en gennemregning af hele året, baseret på følgende:

- Befugtningensfladen i indblæsningsluften har maksimalt 95% virkningsgrad.
- Tilstand af udsugningsluften er 23°/45% RF (svarende til 7,95 g vanddamp pr. kg luft).
- Balanceret flow: 2000 m<sup>3</sup>/h luftflow både til og fra den konditionerede zone.
- Ønsket temperatur 20°C, svarende til 21°C indblæsningstemperatur.
- Intet krav til fugtigheden af den indblæste luft.

Det samlede årlige timetal med behov for køling falder til 418, og det ses, at kravet til indblæsningstemperaturen kan overholdes hele året på nær 9 timer udelukkende ved fordampning af vand i indblæsningsstrømmen.

Dette kræver dog, at relativ fugtighed (RF) helt op til 90% RF kan accepteres ved indblæsningen (95% RF ved 20°C (fuld udnyttelse af befugtningselementet) svarer til 14 g vanddamp/kg luft). Dette resultat er uafhængig af udsugningsluftens tilstand.

Figur 18 viser resultatet af en gennemregning af hele året, hvor kun befugtning af udsugningsluften med efterfølgende varmeveksling med indsugningsluften udnyttes. Der foretages dermed ikke befugtning af indblæsningsluften.

Beregningen er baseret på følgende:

- Ingen befugtning af indblæsningsluften (svarende til 0% virkningsgrad).
- Befugtningensfladen i udblæsningsluften har 80% virkningsgrad.
- Krydsvarmeveksleren har 85% temperaturvirkningsgrad (opnåeligt med modstrøms- eller rotationsvarmeveksler).
- Tilstanden af udsugningsluften er 23°/45% RF (svarende til 7,95 g vanddamp pr. kg luft).
- Balanceret flow: 2000 m<sup>3</sup>/h luftflow både til og fra den konditionerede zone.
- Ønsket temperatur 20°C, svarende til 21°C indblæsningstemperatur.
- Intet krav til fugtigheden af den indblæste luft.

I forhold til befugtning af indblæsningsluften kan et endnu større driftsområde opnås og endda med lavere maksimal relativ fugtighed. Baggrunden for dette er, at den våde temperatur og dermed den teoretisk laveste temperatur af udsugningsluften er 15,4°C ved den pågældende tilstand for udsugningsluften. Det kræver dog, at det lave fugtindhold i udsugningsluften kan opretholdes.

DRY standardår Trin 1: Tind = 21 °C, Tud = 23/45%RF												Antal ialt		
Antal timer dem samme konditioner												418		
Våd temperatur, udtrykt som forskel til den tørre temperatur (°C)												Antal		
Tør temp (°C)	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	>=11		
32 - 33											1		1	
31 - 32													1	
30 - 31											2		2	
29 - 30										2	1		4	
28 - 29									2	3			6	
27 - 28							2	1	3	2			10	
26 - 27					1	2	1	5	5				16	
25 - 26					1	3	5	4	3	1	3	1	24	
24 - 25				1	3	9	7	8	4	1			38	
23 - 24					10	14	13	3	7				48	
22 - 23		1		8	12	17	11	8	3				69	
21 - 22			2	6	25	22	9	6	3	4			83	
20 - 21	1	1	10	25	34	21	5	5	3	1			116	
19 - 20	5	5	12	52	26	20	2	4	6				0	
18 - 19	10	15	50	41	38	19	8	7	1				0	
17 - 18	30	40	48	41	41	16	12	5					0	
16 - 17	57	67	51	50	34	26	5	4	2				0	
15 - 16	83	92	59	58	31	17	9		3				0	

Kun befugtning af indblæsningsluft (driftsmåde "2")      Ikke behov for køling

Figur 17: Udelukkende befugtning af indblæsningsluften. Indblæsningstemperatur 21°C uden krav til maksimal fugtighed: Den højeste fugtighed er ca. 14 g/kg, svarende til 90% RF ved 21°C lufttemperatur.

DRY standardår Køling med afkastluft : Tind = 21 °C, Tud = 23/45%RF												Antal ialt		
Antal timer dem samme konditioner												418		
Våd temperatur, udtrykt som forskel til den tørre temperatur (°C)												Antal		
Tør temp (°C)	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	>=11		
32 - 33											1			1
31 - 32														1
30 - 31											2			2
29 - 30										2	1			4
28 - 29									2	3				6
27 - 28							2	1	3	2				10
26 - 27					1	2	1	5	5					16
25 - 26					1	3	5	4	3	1	3	1		24
24 - 25				1	3	9	7	8	4	1				38
23 - 24					10	14	13	3	7					48
22 - 23		1		8	12	17	11	8	3					69
21 - 22			2	6	25	22	9	6	3	4				83
20 - 21	1	1	10	25	34	21	5	5	3	1				116
19 - 20	5	5	12	52	26	20	2	4	6					0
18 - 19	10	15	50	41	38	19	8	7	1					0
17 - 18	30	40	48	41	41	16	12	5						0
16 - 17	57	67	51	50	34	26	5	4	2					0
15 - 16	83	92	59	58	31	17	9		3					0
Kun befugtning af udblæsningsluft samt varmeveksling								Ikke behov for køling						

Figur 18: Udelukkende befugtning af udsugningsluften samt varmeveksling med ind-sugningsluften ved udsugningslufttemperatur 23°C/45% RF . Indblæsningstemperatur 21°C, uden krav til maksimal fugtighed: Den højeste fugtighed i det markerede område er ca. 14,6 g/kg, svarende til 99% RF ved 21°C lufttemperatur. Den højeste værdi ved DRY-data er 14,5 g/kg.

Figur 19 svarer til figur 18, hvor fugtigheden af udsugningsluften er hævet til 63% RF (11 g vand/kg luft). Ved denne tilstand er den våde temperatur og dermed den teoretisk laveste temperatur af udsugningsluften 18,0°C, hvilket reducerer driftsområdet ved de høje udendørstemperaturer.

DRY standardår												Antal ialt		
Antal timer dem samme konditioner												418		
Våd temperatur, udtrykt som forskel til den tørre temperatur (°C)												Antal		
Tør temp (°C)	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	>=11		
32 - 33											1			1
31 - 32														1
30 - 31											2			2
29 - 30										2	1			4
28 - 29									2	3				6
27 - 28							2	1	3	2				10
26 - 27					1	2	1	5	5					16
25 - 26					1	3	5	4	3	1	3	1		24
24 - 25				1	3	9	7	8	4	1				38
23 - 24					10	14	13	3	7					48
22 - 23		1		8	12	17	11	8	3					69
21 - 22			2	6	25	22	9	6	3	4				83
20 - 21	1	1	10	25	34	21	5	5	3	1				116
19 - 20	5	5	12	52	26	20	2	4	6					0
18 - 19	10	15	50	41	38	19	8	7	1					0
17 - 18	30	40	48	41	41	16	12	5						0
16 - 17	57	67	51	50	34	26	5	4	2					0
15 - 16	83	92	59	58	31	17	9		3					0
Kun befugtning af udblæsningsluft samt varmeveksling								Ikke behov for køling						

Figur 19: Udelukkende befugtning af udsugningsluften samt varmeveksling med ind-sugningsluften ved udsugningstemperatur 23°C/63%RF (11 g vand/kg luft). Indblæsningstemperatur 21°C, uden krav til maksimal fugtighed: Den højeste fugtighed i det markerede område er ca. 14,6 g/kg, svarende til 99% RF ved 21°C lufttemperatur. Den højeste værdi ved DRY-data er 14,5 g/kg.



Figur 20 viser resultatet for en ønsket indblæsningstemperatur på 18°C (afkøling til 17°C), hvilket kræver køling i 765 timer pr. år. Tilstanden af udsugningsluften er 25°C, 53% RF (10,4 g/kg). Beregningen er baseret på følgende:

- Befugtningsfladen i udblæsningsluften har 80% virkningsgrad.
- Krydsvarmeveksleren har 60% temperaturvirkningsgrad (opnåeligt med modstrøms- eller rotationsvarmeveksler).
- Balanceret flow: 2000 m<sup>3</sup>/h luftflow både til og fra den konditionerede zone.
- Intet krav til fugtigheden af den indblæste luft.

DRY standardår														
Antal timer dem samme konditioner												Antal ialt	765	
Våd temperatur, udtrykt som forskel til den tørre temperatur (°C)													Antal	Antal
Tør temp (°C)	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	>=11		
32 - 33												1		1
31 - 32														1
30 - 31											2	2		2
29 - 30										2	1			4
28 - 29									2	3				6
27 - 28							2	1	3	2				10
26 - 27					1	2	1	5	5					16
25 - 26					1	3	5	4	3	1	3	1		24
24 - 25				1	3	9	7	8	4	1				38
23 - 24					10	14	13	3	7					48
22 - 23		1		8	12	17	11	8	3					69
21 - 22			2	6	25	22	9	6	3	4				83
20 - 21	1	1	10	25	34	21	5	5	3	1				116
19 - 20	5	5	12	52	26	20	2	4	6					150
18 - 19	10	15	50	41	38	19	8	7	1					197
17 - 18	30	40	48	41	41	16	12	5						0
16 - 17	57	67	51	50	34	26	5	4	2					0
15 - 16	83	92	59	58	31	17	9		3					0
Kun befugtning af indblæsningsluft													Ikke behov for køling	
Befugtning af både ind- og udblæsningsluft samt varmeveksling														

Figur 20: Ønsket indblæsningstemperatur 18°C (afkøling til 17°C). Udsugningsluftens tilstand: 25°C 53%RF. Både driftsmåde 1, 2 og 3. Det højeste fugtindhold i indblæsningsluften er 11,4 g/kg (65% RF ved 23°C).

Det ses, at kravet til indblæsningstemperatur kan overholdes hele året på nær 91 timer. Den højeste fugtighed af indblæsningsluften er 11,4 g/kg, svarende til 63% RF ved 23°C.

DRY standardår														
Antal timer dem samme konditioner												Antal ialt	765	
Våd temperatur, udtrykt som forskel til den tørre temperatur (°C)													Antal	Antal
Tør temp (°C)	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	>=11		
32 - 33												1 (18,8)		1
31 - 32														1
30 - 31											2	2		2
29 - 30										2	1			4
28 - 29									2	3				6
27 - 28							2 (18,0)	1	3	2				10
26 - 27					1 (19,3)	2 (18,3)	1 (17,2)	5	5					16
25 - 26					1 (18,5)	3 (17,5)	5	4	3	1	3	1		24
24 - 25				1 (18,8)	3 (17,8)	9	7	8	4	1				38
23 - 24					10 (17,1)	14	13	3	7					48
22 - 23		1 (19,3)		8 (17,3)	12	17	11	8	3					69
21 - 22			2 (17,6)	6	25	22	9	6	3	4				83
20 - 21	1 (18,9)	1 (17,9)	10	25	34	21	5	5	3	1				116
19 - 20	5 (18,2)	5 (17,2)	12	52	26	20	2	4	6					150
18 - 19	10 (17,8)	15	50	41	38	19	8	7	1					197
17 - 18	30	40	48	41	41	16	12	5						0
16 - 17	57	67	51	50	34	26	5	4	2					0
15 - 16	83	92	59	58	31	17	9		3					0
Kun befugtning af indblæsningsluft													Ikke behov for køling	
Befugtning af både ind- og udblæsningsluft samt varmeveksling														

Figur 21: Samme konditioner som **Fejl! Henvisningskilde ikke fundet.**, men med virkningsgraden hævet:  $\eta_{vx} = 0,85$   $\eta_{bf} = 0,95$ . Lavest opnåelig temperatur er vist i parentes.

Figur 21 viser gennemregning af samme krav, men med virkningsgraden for befugtningsflader hævet fra 0,8 til 0,95 og for varmeveksleren hævet fra 0,6 til 0,85. Disse værdier er mulige at nå med state-of-the-art komponenter. Det ses, at antallet af timer, hvor kravet til indblæsningstemperatur ikke kan nås, er reduceret til 58 timer. Den opnåede temperatur efter befugtningsfladen er for disse timer vist i parentes. Det ses, at kun 15 timer årligt vil have en temperatur på mere end 1°C for høj temperatur. Den maksimale fugtighed er 13,7 g vand /kg luft, svarende til 77% RF ved 23°C.

I alle eksemplerne er der forudsat en konstant temperatur og fugtighed af udsugningsluften. I bygninger/lokaler med luftskifte på 4-5 vil fugtigheden af indblæsnings- og udsugningsluften være næsten ens (forudsat, at der ikke er betydelig fugtbelastning af lokalerne). Figur 22 viser gennemregningen af denne situation med en ønsket indblæsningstemperatur på 18°C (svarende til en afkøling af luften til 17°C). Gennem i alt 55 timer opfyldes kravet til en 18°C indblæsningstemperatur ikke. Af disse vil kun 20 timer årligt have en indblæsningstemperatur, der er mere end 1°C højere end ønsket.

DRY standardår													Antal ialt	765
Antal timer dem samme konditioner														
Våd temperatur, udtrykt som forskel til den tørre temperatur (°C)														Antal
Tør temp (°C)	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	>=11		
32 - 33											1 (18,2)		1	
31 - 32													1	
30 - 31											2		2	
29 - 30										2	1		4	
28 - 29									2	3			6	
27 - 28							2 (18,5)	1 (17,2)	3	2			10	
26 - 27					1 (20,2)	2 (18,9)	1 (17,6)	5	5				16	
25 - 26					1 (19,2)	3 (17,9)	5	4	3	1	3	1	24	
24 - 25				1 (19,6)	3 (18,3)	9 (17,2)	7	8	4	1			38	
23 - 24					10 (17,4)	14	13	3	7				48	
22 - 23		1 (20,2)		8 (17,7)	12	17	11	8	3				69	
21 - 22			2 (18,1)	6	25	22	9	6	3	4			83	
20 - 21	1 (19,6)	1 (18,4)	10 (17,2)	25	34	21	5	5	3	1			116	
19 - 20	5 (18,8)	5 (17,6)	12	52	26	20	2	4	6				150	
18 - 19	10 (17,9)	15	50	41	38	19	8	7	1				197	
17 - 18	30	40	48	41	41	16	12	5					0	
16 - 17	57	67	51	50	34	26	5	4	2				0	
15 - 16	83	92	59	58	31	17	9		3				0	
Kun befugtning af indblæsningsluft													Ikke behov for køling	
Befugtning af både ind- og udblæsningsluft samt varmeveksling														

Figur 22: Ønsket indblæsningstemperatur 18°C (afkøling til 17°C). Udsugningsluftens tilstand: 25°C og samme fugtindhold som for indblæsningsluften. Både driftsmåde 1, 2 og 3. Det højeste fugtindhold i indblæsningsluften, hvor temperaturkravet er opfyldt, er 11,4 g/kg (65% RF ved 23°C). Den højeste for alle driftspunkter er 14,3 g/kg (81% RF ved 23°C).

Af denne gennemgang fremgår det, at potentialet ved adiabatisk køling er meget stort under danske forhold. I hvor stor udstrækning det kan anvendes som eneste bygningskøling afhænger af flere forhold i den konkrete opgave:

- Ønsket indblæsningstemperatur og fugtighed.
- Temperatur og (især) fugtighed af udsugningsluften på det konkrete tidspunkt.
- Maksimal tilladelig indblæsningstemperatur og fugtighed.

Der foreligger i dag en del forskellige filosofier vedr. driftskrav til luftkonditionering, herunder de ret overordnede: Er der tale om ventilation for opnåelse af passende luftkvalitet, eller er der tale om behov for køling?

Direkte adiabatisk køling af indblæsningsluften vil notorisk medføre højere fugtighed i den indblæste luft. Fugtighederne i ovenstående analyse er dog ikke højere, end hvad der kan forekomme ved anvendelse af direkte indblæsning af frisk udeluft, og det kræver en dybere undersøgelse af komfortfølelsen afhængig af den givne tilstand (temperatur og fugtindhold) af indblæsningsluften, før potentialet i teknologien kan afdækkes helt. I den forbindelse kunne forhold som termisk og fugtmæssig aktive bygningskonstruktioner være af stor interesse.

## 7 Analyse af våd sorptionskøling

Kombinationen af den beskrevne adiabatisk køling med mulighed for affugtning af den indsugete luft åbner for afkobling af indblæsningsluftens temperatur og fugtighed.

Ved anvendelse af traditionel mekanisk kompressorkøling vil affugtning af den indsugete luft kræve afkøling til under dugpunktstemperaturen, svarende til den ønskede fugtighed. Efter affugtning vil lufttemperaturen derfor ligge tæt på dugpunktet med efterfølgende behov for opvarmning. F.eks. er dugpunktstemperaturen 11°C for en ønsket lufttilstand på 21°C, 52 %RF (8 g vand/kg luft), svarende til en fordampningstemperatur på ca. 6°C for et veldimensioneret, direkte køleanlæg. Anvendes en sekundær kølekreds (kold vand), bliver fordampningstemperaturen højst 4°C. Analyse af DRY-referenceåret viser, at ønsket om maksimalt 8 g vand/kg luft vil kræve affugtning i 1674 timer pr. år.

Ved anvendelse af sorptionskøling sker der en stigning i lufttemperaturen under affugtningen (under affugtningen stiger luftstrømmens entalpi svagt). Indblæsningstemperaturen bestemmes af den efterfølgende afkøling.

## 8 Videnindsamling

Der foregår megen forskning inden for anvendelsen af sorption til luftkonditionering. Dette er drevet af ønsket om anvendelse af soldrevet køling og langt den største del er koncentreret omkring den tørre sorptionsteknologi med et roterende hjul. En søgning på internettet vil give mange henvisninger.

En god indgangsvinkel til emnet varmedrevet køling er aktiviteterne under det Internationale Energi Agentur (IEA), der er samlet på <http://www.iea-shc.org/>.

Det våde sorptionsprincip er behandlet mindre på det overordnede plan, og en søgning i artikeldatabaser vil vise, at der foregår betydelig forskningsarbejde på området.

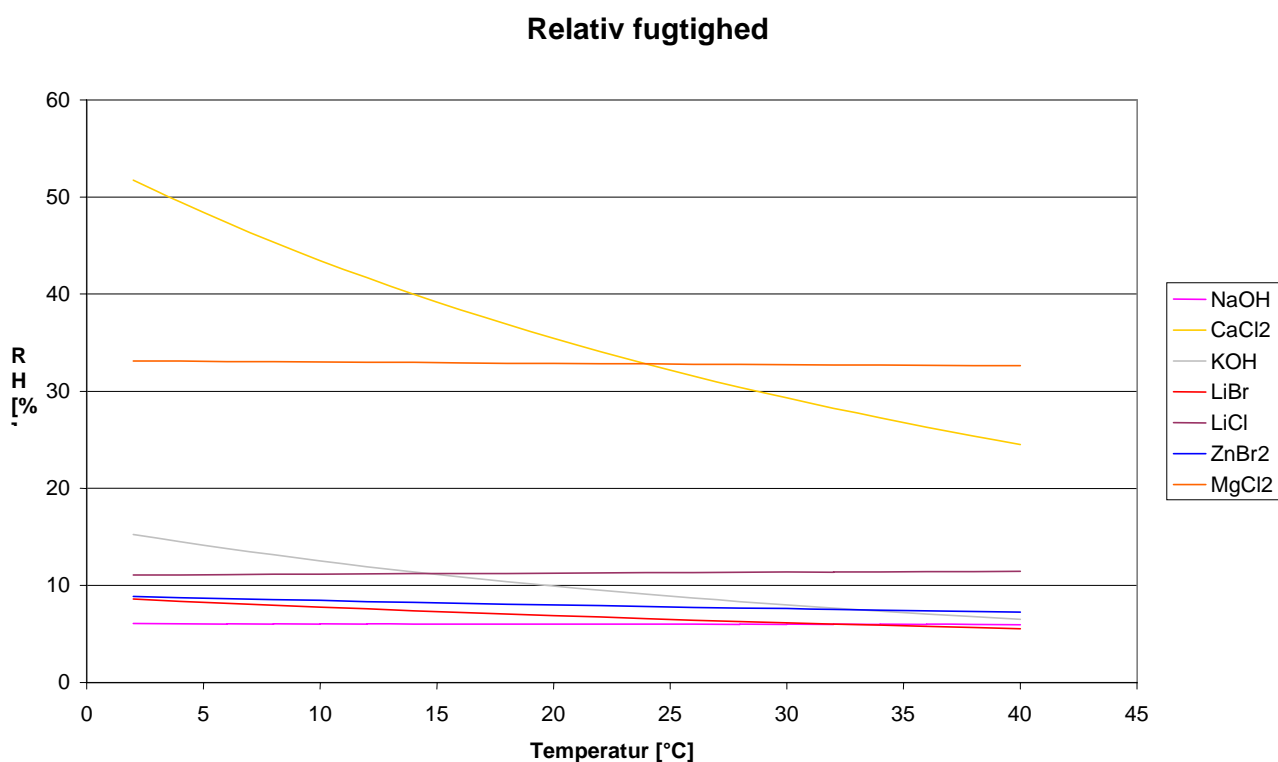
Endvidere henvises til listen over kilder brugt i denne rapport.

## 9 Valg af absorbermedie

For at processen kan fungere tilfredsstillende, skal det valgte medie have følgende egenskaber:

- Lav ligevægtsfugtighed.
- Ligevægtsfugtigheden må ikke være afhængig af temperaturen.
- Skal kunne anvendes i direkte kontakt med indgangsluften.
- Skal have lav viskositet.

Figur 23 viser den maksimale affugtning, der kan opnås med mættede opløsninger af de oplyste stoffer ved atmosfæretryk.



Figur 23: Ligevægtsfugtighed for forskellige opløsninger ved atmosfæretryk.

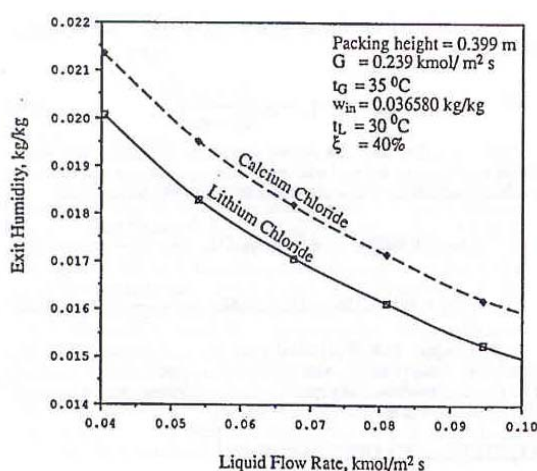
En del af saltene kan udelukkes:

- MgCl<sub>2</sub> udelukkes pga. for høj ligevægtsfugtighed.
- KOH, ZnBr<sub>2</sub> og LiBr udelukkes pga. faldende ligevægtsfugtighed ved stigende temperatur, hvilket vil gøre det svært at regenerere opløsningen.

Tilbage er NaOH, CaCl<sub>2</sub> og LiCl:

NaOH udmærker sig ved at have en ligevægtsfugtighed på 6%, hvilket er meget lavt. Det ville medføre, at systemet sikkert kan bygges meget kompakt. Der har dog ikke kunnet findes kilder, der har arbejdet med dette stof (hvilket måske skyldes manglende stabilitet i forbindelse med luft), og der er ikke arbejdet videre med dette.

I figur 24 ses en sammenligning af affugtningsegenskaberne for CaCl<sub>2</sub> og LiCl som funktion af den molare flux. Sammenligningen sker ved de samme driftsforhold.



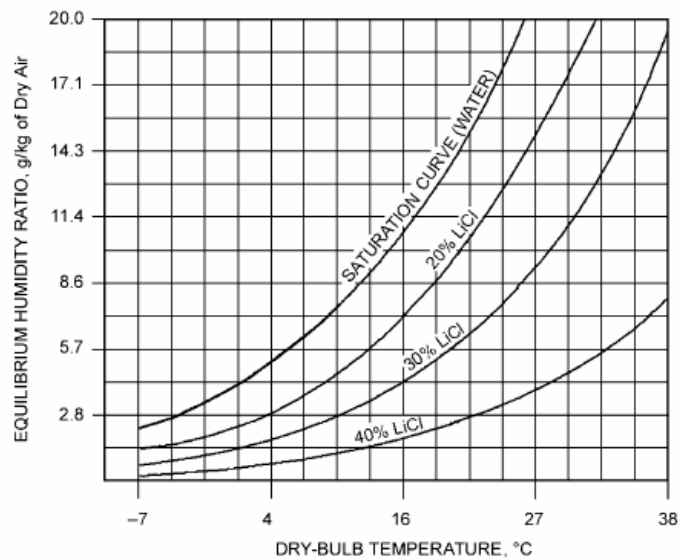
G: Molare flux af luft  
t<sub>G</sub>: Lufttemperatur  
W<sub>in</sub>: Fugtighed indgang  
t<sub>L</sub>: Blandingstemperatur  
ξ: Koncentration af blanding.  
Packing height: Højde af affugterelement

Figur 24: Viser affugtningens midlerne CaCl og LiCl's evne til at affugte som funktion af den molare flux.

Ud fra figur 24 kan det konstateres at LiCl affugter luften bedre end CaCl. Leverandører af affugterudstyr baseret på teknologien oplyser, at kapaciteten på deres udstyr falder til det halve ved anvendelse af CaCl<sub>2</sub> i stedet for LiCl.

Figur 25 viser, hvor lavt fugtindhold der (teoretisk) kan opnås ved affugtning af luft ved atmosfæretryk. Der er tale om fugtindhold og ikke relativ fugtighed, som vist i figur 23. LiCl har en ligevægtsfugtighed på 11%, hvilket er tilstrækkeligt. LiCl har været anvendt til affugtning igennem mange år, og der findes en del referencer, der anvender dette stof. LiCl er det mest stabile medie /3/. En stor ulempe er den høje pris. Dette er forsøgt ændret gennem blanding med CaCl<sub>2</sub> i forholdet 1:1 /3/. Dette skulle stabilisere det langt billigere CaCl<sub>2</sub> (denne rapporterede ustabilitet er ikke undersøgt nærmere) uden for stort fald i ydelse.

Desværre er LiCl dyrt, hvilket kunne tale for CaCl<sub>2</sub> som affugtningmiddel: CaCl<sub>2</sub> koster ca. 2 kr./kg, hvorimod LiCl er det dyreste affugtningmiddel og koster 4-8 \$ pr. lb./4/ svarende til ca. 100 kr./kg. Produkter, der indeholder Li er generelt dyre, og en undersøgelse af markedet viste, at der kun omsættes meget små mængder LiCl. Det var derfor kun muligt at finde leverandører af LiCl til laboratoriebrug, hvilket afspejlede sig i prisen på ca. 250 kr./kg.



Figur 25: Fugtindhold i luft i ligevægt med LiCl-opløsning.

Ud over de nævnte salte, anvender nogle få kilder triethylenglycol (TEG). Dette er ikke undersøgt nærmere.

På basis af ovenstående er det valg at anvende en vandig opløsning af LiCl som sorptionsmedie.

### 9.1 Risikovurdering litiumklorid

Grundstoffet litium er i sig selv neurotoksisk. Det anvendes bl.a. til behandling af depression. Litiumklorid vil have samme virkning på mennesker som rent litium - dog skal dosen være større.

LiCl har CAS. Nr. 7447-41-8. Kontakt til Miljøstyrelsen, Sundhedsstyrelsen og Beredskabsstyrelsen viste, at der ikke foreligger oplysninger om LiCl. Det kan ikke heraf umiddelbart konkluderes, at der ikke er sundhedsfare ved LiCl. Anvendelsen af LiCl er ikke ret stor, hvilket kan betyde, at der aldrig er rekvireret en undersøgelse. En leverandør oplyste telefonisk, at der ikke er sikkerhedskrav ved koncentrationer under 20%.

Optegnelse over toksikologisk viden om stoffet kan findes på hjemmesiden <http://ntp.niehs.nih.gov/go/26536> (National Toxicology Program).

LiCl er stærkt korrosivt over for metaller. Forsøg med galvaniseret plade gav krystalvækst, der mindede om mug! Der er ikke fundet problemer ved anvendelse sammen med almindeligt brugte plasttyper.



LiCl har en antibakteriel virkning på luft: vaskning med LiCl-opløsning vil medføre en renere luft. Dette er baggrunden for, at stoffet i dag anvendes i medicinal- og fødevarerindustrien, hvor der er meget strenge krav til luftens renhed. På Statens Serum Institut har det bl.a. været brugt til luftkonditionering af produktionsområder, hvor der har været åbne produktionskar, og anlægget er stadig i brug.

På baggrund af ovenstående samt det faktum, at LiCl igennem mange år har været (og stadig bliver) brugt til affugtning af indgangsluft, er det blevet vurderet, at det er forsvarligt at anvende LiCl uden yderligere afklaring af sikkerhedsmæssige aspekter. Dette skal også ses i lyset af, at sorptionsanlæggene skal designes på en sådan måde, at risikoen for medrivning af opløsningen elimineres. Dette er både på grund af prisen for LiCl og anlæggets driftssikkerhed, men især det faktum at medrivning vil medføre ødelæggende korrosion af metaldele i den øvrige del af luftkonditioneringssystemet, samt derum, luften blæses ind i.

## 10 Beregningsmodel

Som det fremgår af afsnittet om styring, skal affugtningsdelen kun køre i en begrænset del af året. Med henblik på at give mulighed for simulering og analyse af forskellige driftssituationer og -strategier for køleprocessen, er der udviklet matematiske simuleringmodeller. Modellerne er udviklet ved hjælp af programmeringsværktøjet EES (www.fchart.com), og de kan rekvireres ved henvendelse til Teknologisk Institut mod betaling af et mindre vederlag for håndtering og forsendelse.

Af programmeringsmæssige årsager har det ikke været muligt at dække alle driftssituationer i én og samme model. Der er derfor udarbejdet to selvstændige programmer for henholdsvis drift uden og drift med behov for affugtning af indgangsluften:

- A. "Adiabatisk\_koeling\_AHU.EXE", der dækker driftsmåde 1 til 3
- B. "Sorptionskoeling\_AHU.EXE", der dækker driftsmåde 4.

EES arbejder med ligningssystemer, og ved hjælp af "Parametric Table" kan der foretages analyse med andre input end de valgte i diagramvinduerne. Der henvises til litteratur vedrørende EES for yderligere information.

Dialogvinduet for "Adiabatisk\_koeling\_AHU" fremgår af figur 26 med følgende input (markeret med firkant omkring talværdien):

$T_{\text{DRY}}$ :	Udendørstemperatur, tør	°C
$T_{\text{WET}}$ :	Udendørstemperatur, våd	°C
$M_{\text{IND}}$ :	Massestrøm af tør luft, ind	kg/s
$\eta_{\text{VX}}$ :	Termisk virkningsgrad af varmeveksler	-
$TI5_{\text{set}}$ :	Ønsket indblæsningsstemperatur, tør	°C
$TU1$ :	Udsugningstemperatur, tør	°C
$XU1_{\text{g}}$ :	Fugtindhold, udsugningsluft	g /kg luft
$\eta_{\text{bfud}}$ :	Virkningsgrad af befugtningsflade ud	-

Modellen er udviklet for balancerede systemer, hvorfor MUD (massestrøm af tør luft, ud, kg/s) er den samme som MIND.

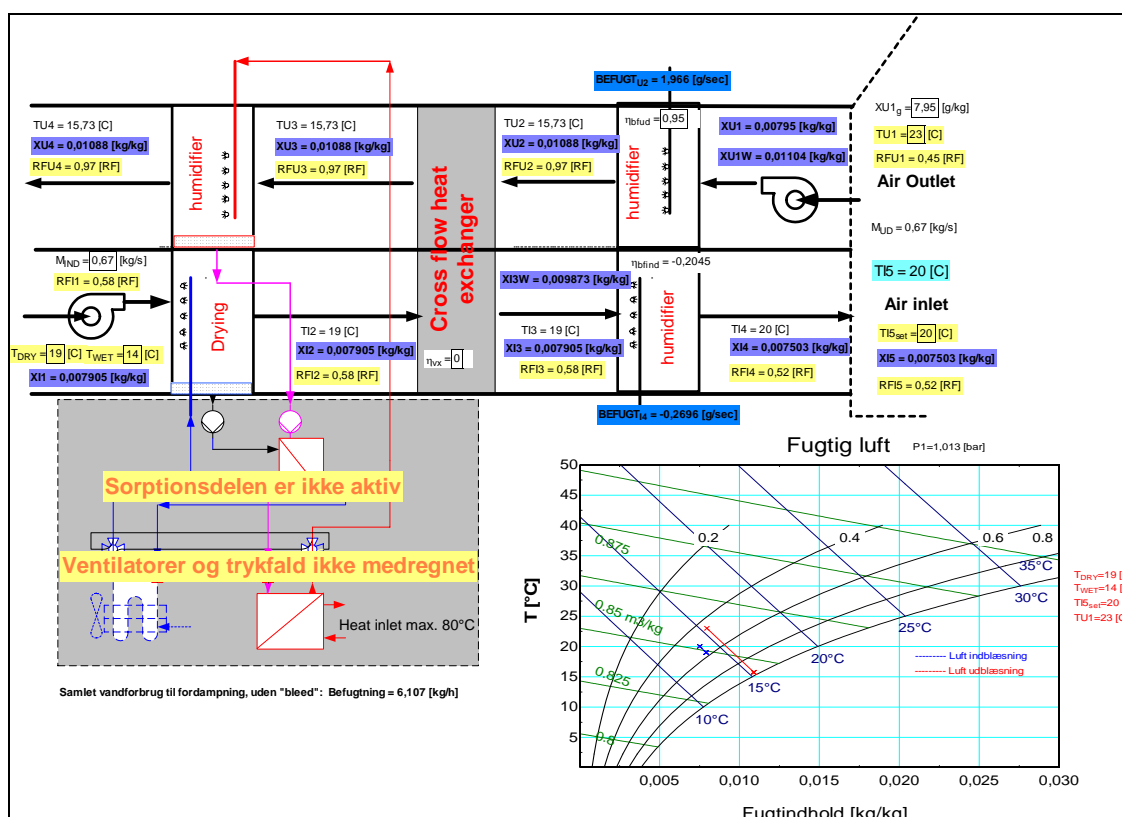
Modellen er opbygget, så resultatet skal tolkes på baggrund af  $\eta_{\text{bfind}}$  (virkningsgrad af befugtningsfladen for indblæsningsluften): Fra definitionen kan denne kun antage værdier mellem 0 og 1. Modellen kan give resultater, der ligger uden for dette:

$\eta_{\text{bfind}} < 0$  indikerer, at indblæsningsluften skal opvarmes for at overholde den ønskede indblæsningsstemperatur.

$\eta_{\text{bfind}} > 1$  indikerer, at den ønskede indblæsningsstemperatur ikke kan nås, selv ved 100% befugtning: Indblæsningsluften er for varm og/eller fugtig før befugtningsfladen.

De forskellige driftsmåder vælges ved at sætte virkningsgraderne til "0" for komponenter, der ikke er i drift (f.eks. vil  $\eta_{\text{vx}} = 0$  medføre, at der ikke foretages varmeveksling mellem de to luftstrømme).

Modellen kan ikke beregne fugtatslag (kondens) i varmeveksleren. I sådanne tilfælde vil beregningen stoppe med en fejlmeddelelse.



Figur 26: Dialogvindue for "Adiabat\_koel\_AHU.exe".

Dialogvinduerne for "Sorptionskoeling\_AHU" fremgår af figur 26:

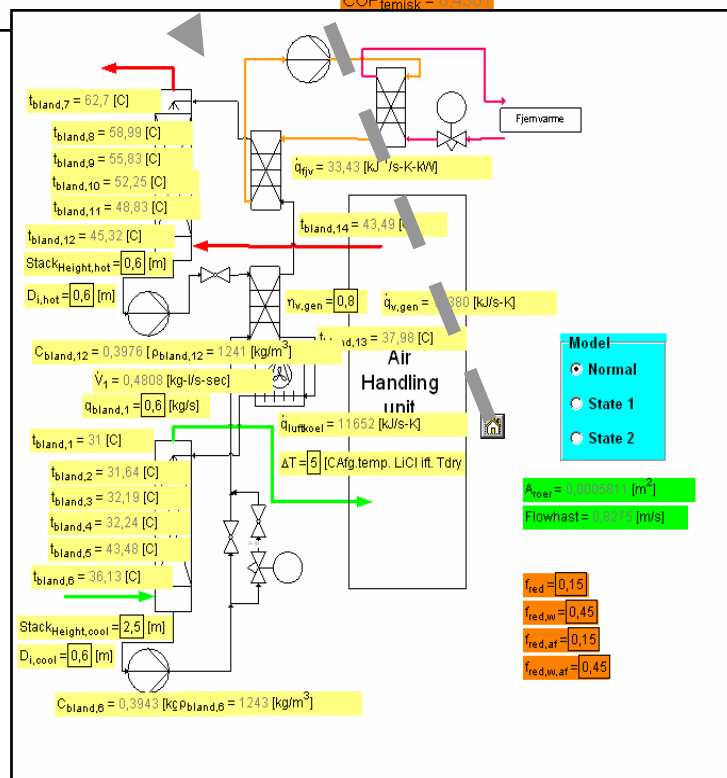
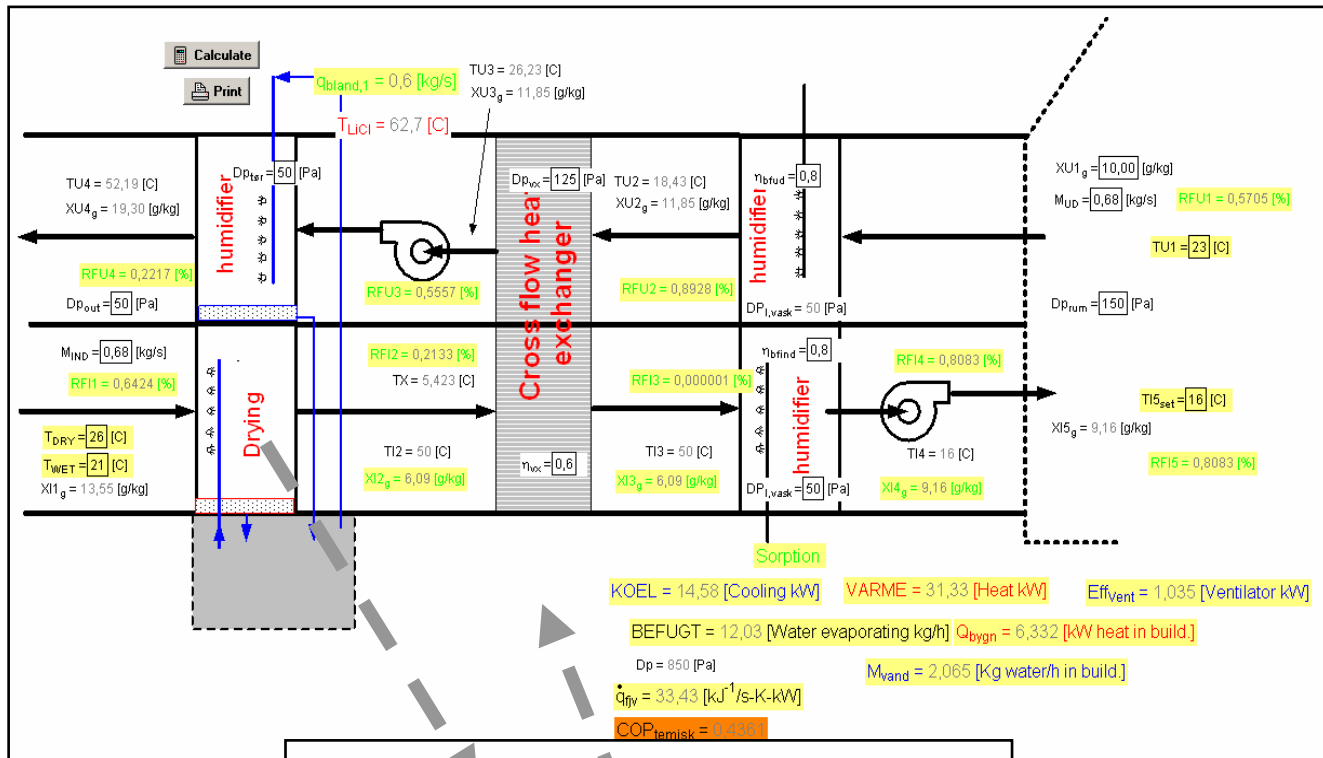
Det første billede dækker luftkonditioneringsenheden med følgende input:

$T_{DRY}$ :	Udendørstemperatur, tør	°C
$T_{WET}$ :	Udendørstemperatur, våd	°C
$M_{IND}$ :	Massestrøm af tør luft, ind	kg/s
$\eta_{VX}$ :	Termisk virkningsgrad af varmeveksler	-
$\eta_{bfind}$ :	Virkningsgrad af befugtningsflade, ind	-
$T_{I5\_set}$ :	Ønsket indblæsningstemperatur, tør	°C
$T_{U1}$ :	Udsugningstemperatur, tør	°C
$X_{U1g}$ :	Fugtindhold, udsugningsluft	g / kg luft
$M_{UD}$ :	Massestrøm af tør luft, ud	kg/s
$\eta_{bfud}$ :	Virkningsgrad af befugtningsflade, ud	-
$DPI_{,vask}$ :	Trykfald, befugtningsflader	Pa
$DP_{rum}$ :	Trykfald, kanalsystem	Pa
$DP_{VX}$ :	Trykfald, varmeveksler	Pa
$DP_{tør}$ :	Trykfald, affugter- og regenereringstårn	Pa
$DP_{out}$ :	Trykfald, udblæsningssystem	Pa

Ved ”klik” på det skematisk viste affugtersystem, åbnes et detaljeret billede af dette med følgende input:

$STACK_{Height,cool}$ :	Aktiv højde af affugtertårn	m
$D_{i,cool}$ :	Diameter af affugtertårn	m
$STACK_{Height,hot}$ :	Aktiv højde af regenereringstårn	m
$D_{i,hot}$ :	Diameter af regenereringstårn	m
$\Delta T$ :	Afgangstemperatur fra LiCl-køler ift. omgivelsestemperatur	°C
$q_{bland,l}$ :	LiCl-opløsningsflow	kg/s
$\eta_{v,gen}$ :	Temperaturvirkningsgrad af LiCl/LiCl- varmevekslerradio-knapper	
”Model”:	Hvis modellen ikke konvergerer, kan der forsøges med anden ”state”.	

Ved ”klik” på det lille hus returneres til hoveddialogbilledet igen.



Figur 27: Dialogvinduer til beregningsmodel.

## 11 Pilotanlæg

Anlægget består overordnet af en luftkonditioneringsunit (i det følgende kaldet AHU: Air Handling Unit) med befugtningselementer, der sammenbygges med en affugtningselement (sorptionsunit).

Projektet fokuserer på problemstillingerne, der er ved udvikling af sorptionsuniten, som blev undersøgt gennem opbygning af to pilotanlæg, der ikke omfattede AHU'en.

Det første pilotanlæg (vist i figur 28 og diagrammet i bilag A) var et godt bud på, hvordan en endelig unit kunne se ud med henblik på sammenbygning med en AHU bestående af standardmoduler: Der var tale om en vandret luftstrøm, hvor affugtningen skete med et "gardin" af LiCl-dråber. Det vil sige, at der var tale om krydsstrøm. Medrevne dråber blev fanget af et dråbefang.



*Figur 28: Første pilotanlæg for affugtningprocessen.*

Allerede ved de indledende test viste det sig, at anlægget ikke fungerede tilfredsstillende. Da den matematiske modellering af affugtningprocessen i krydsstrøm også vil være forbundet med stor usikkerhed, blev det besluttet at opbygge en ny model med lodretstående vandvaskertårne med væske og luft i modstrøm. Denne model er vist i figur 29.

På grund af den høje koncentration, der anvendes i sorptionsanlæg, medfører den høje pris på LiCl, at prisen bliver ca. 200 kr./liter opløsning.

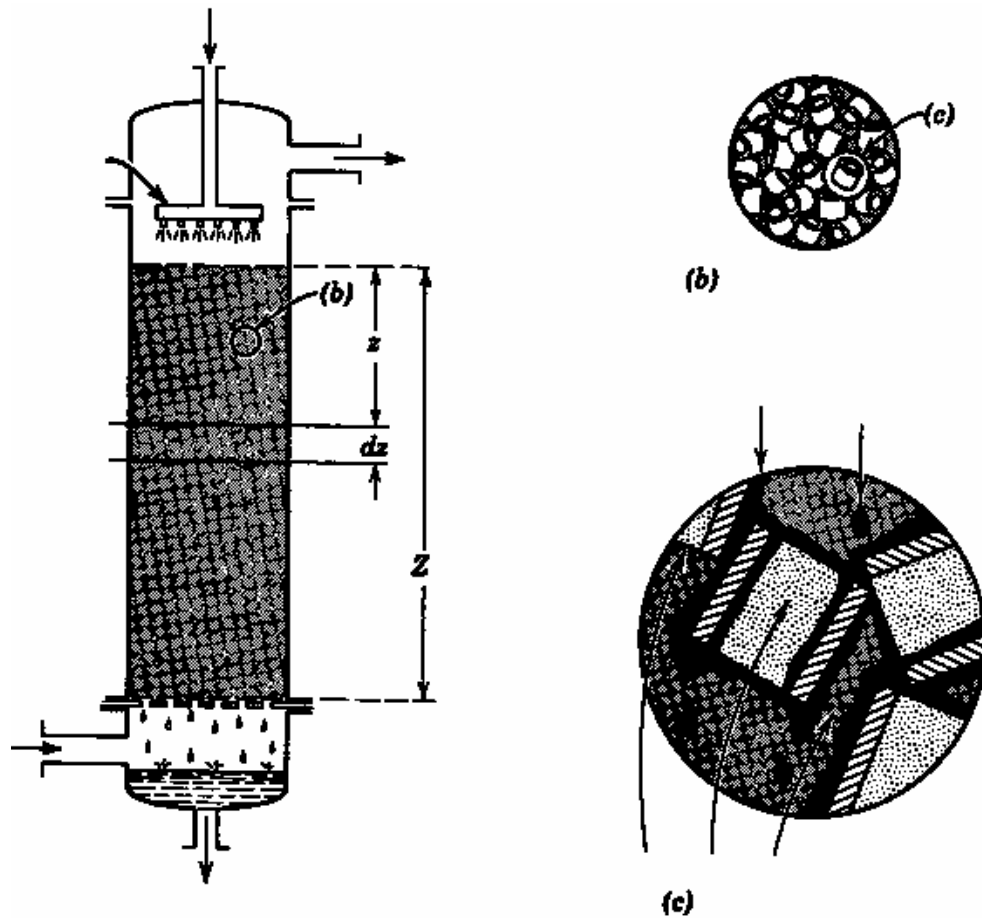
Dette førte til et design med reservoir indbygget i bunden af de to tårne. Herved kunne et lagertankvolumen spares. Førnævnte reservoir blev anvendt til dykpumperne, der blev anvendt som LiCl-opløsningspumper.

Dette anlæg blev anvendt ved udviklingen af beregningsmodellen for sorptionsdelen samt til verifikation og justering af beregningsmodellen.



*Figur 29: Andet pilotanlæg med lodretstående luftvaskertårne.*

Designet af de lodrette tårne er baseret på teknikkerne anvendt i mange former for procesårne, og de er vist i figur 30.

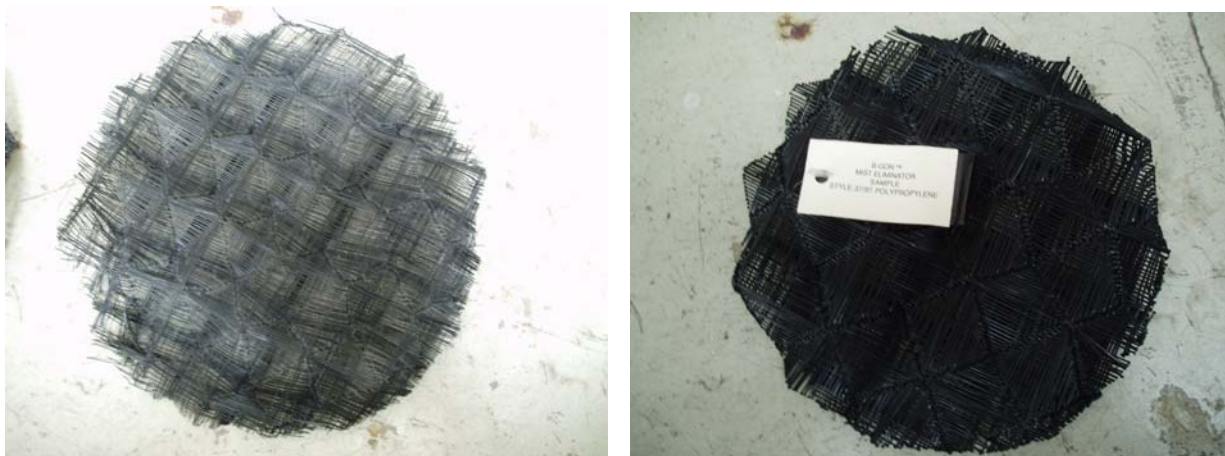


Figur 30: Procestårn med ustruktureret (tilfældig) pakmateriale (fyldlegemer) /5/.

For at opnå stor kontaktoverflade mellem luft og sorptionsvæske er tårnene flydt med fyldlegemer til en passende højde. Den anvendte type fyldlegeme fremgår af bilag F.

I pilotanlægget blev der anvendt en dyse til at fordele sorptionsvæsken jævnt ud over fyldlegemerne. Dette medførte dannelsen af mange små dråber, der kunne bæres med den affugtede luft ud af tårnet. Der blev installeret dråbefang i form af polymerbaseret demister, som vist i figur 31. Kravet til et endeligt design er en sikring af, at der slet ikke rives sorptionsvæske med, dels på grund af at væsken er stærkt korrosiv men især på grund af pris og behovet for at anlægget kan køre i lang tid uden tilsyn. De anvendte demistere var ikke effektive nok til at opfylde dette.





*Figur 31: Dråbefang (demister) anvendt i pilotanlægget.*

Desværre viste det sig, at det var umuligt at opnå en stabil driftssituation for den samlede proces, bestående af luftaffugtning i det ene tårn med samtidig regenerering i det andet tårn.

Med den valgte opbygning med manuel regulering af flow samt de relativt små differencer, kunne der ikke opnås målinger med acceptabel usikkerhed. Verifikation og justering blev derfor foretaget på tårnene hver for sig. Resultaterne fra dette anlæg blev brugt til udvikling og til den første kalibrering af beregningsmodellen for sorptionsanlægget.

## 12 Fremstilling af prototype

Design- og procesmæssigt kan anlægget opdeles i luftkonditioneringsunitten (AHU'en) og sorptionskredsen. I forbindelse med designet af prototypen forsøgte man at vælge simple og dermed billige løsninger. F.eks. er der ikke procesmæssige grunde til at anvende udblæsningsluften fra AHU'en til regenereringen. Men anvendelsen af regenereringsluft suget direkte fra omgivelserne vil kræve en separat ventilator, hvilket komplicerer både opbygning og styring med fordyrelse af anlægget til følge. De mulige procesmæssige fordele af dette er ikke undersøgt nærmere.

Kapaciteten blev valgt til 2000 m<sup>3</sup>/h. Med et fuldstændigt luftskifte på 5 gange i timen svarer dette til en mindre virksamhed på ca. 200 m<sup>2</sup>

### 12.1 Luftkonditioneringsunit

Luftkonditioneringsunitten (AHU) blev baseret på NOVECO's mindste model (Climaster ZCN 9/6) og opbygget af standardkomponenter (designet fremgår af bilag 2). Den maksimale kapacitet af denne model er betydelig større end de valgte 2000 m<sup>3</sup>/h, hvorfor ventilatorerne blev sænket i omdrejningstal. Projektets fokus blev tidligt i forløbet lagt på design og test af sorptionsdelen, hvorfor der kun i mindre grad er undersøgt alternative komponenter:

- Højeffektive luftmodstrømsvarmevekslere fra ECOVENT kunne ikke anvendes, da kapaciteten af de enkelte elementer var for lav, og montage af flere elementer i parallel var ikke praktisk muligt.
- Spraybefugtning blev fravalgt på grund af behov for vandbehandling samt krav til indbygning (længde af kanal for sikring af fuldstændig fordampning).
- Ultralydsbefugtning kunne ikke anvendes af økonomiske grunde.

Det viste sig, at de to befugterelementer (standardelementer type RA6 fra Munters) var langt de dyreste komponenter, og at regulering af kapaciteten ikke var mulig, da elementtypen skal være overcirkuleret for at modvirke ophobning af salte og kalk fra det anvendte vand (der ikke var forbehandlet). Selve unitten og de to sektioner med befugtningselementerne fremgår af figur 32.



Figur 32: NOVENCO Climaster ZCN 9/6 unit og sektionerne med Munters RA6 befugtere.

## 12.2 Sorptionskreds

Som nævnt var ét af kriterierne ved valg af design og løsning, at opbygning og styring skulle være simpelt. Dette skyldtes primært, at anlægsprisen skulle holdes så lav som muligt for at kunne konkurrere med en traditionel løsning med kompressorkøling. Det er velkendt at traditionelle køleanlæg for luftkonditionering er meget prisoptimerede.

Designet fra pilotanlæg nr. 2 blev også anvendt til sorptionsdelen i prototypen af det komplette anlæg. Skitse af tårnbygningen og designet af samme fremgår af bilag G. Designet med lodrette luftvaskere er ikke optimalt, da dette ”procestårnsdesign” ikke er arkitektonisk velegnet til placering på en bygning, men på baggrund af erfaringerne fra første prototype blev det alligevel valgt, da anvendelse af f.eks. luftvaskere efter krydsstrømsprincippet ville påføre projektet stor usikkerhed, da udviklingsfasen af sådanne vaskere i sig selv ville udgøre en meget stor opgave og naturligt ville komme til at ligge i en efterfølgende fase.

Af korrosionsmæssige årsager blev LiCl-kredsen som udgangspunkt opbygget i plast, men det viste sig, at der ikke findes pumper og varmevekslere i plast, der kunne være relevante i forhold til det, som en endelig unit må koste. Der blev derfor anvendt almindelige rustfrie pladevarmevekslere (disse skal udføres i titanium, hvis korrosionsmæssige problemer skal elimineres) samt billige dykpumper fra et byggemarked. Det viste sig, at disse er fremstillet næsten udelukkende af plast. De viste forbavsende god holdbarhed, men de er ikke gode nok til en egentlig installation. Pumper til den kemiske industri vil være alt for dyre.

Diameteren på de to tårne er bestemt med hjælp fra fyldlegemeleverandøren: Hvis lufthastigheden bliver for stor, vil væsken ikke kunne strømme ned gennem tårnet, hvorved opstuvning opstår. Dette vil føre til endnu højere lufthastighed gennem det resterende frie areal, hvilket forværrer situationen. Denne maksimale lufthastighed ligger til grund for diameteren. Den udviklede beregningsmodel blev brugt ved dimensioneringen af sorptionsanlægget på prototypeanlægget Bilag E viser et parameterstudie for designet og forklarer de valgte flow og tårnfyldningshøjder.

Alle varmevekslere var standard kobberloddede pladevarmevekslere. På grund af faren for gennemtæring, der kunne føre til forurening af fjernvarmeforsyningens rørsystem, blev der indskudt en ekstra lukket vandkreds med cirkulationspumpe (E-8 på diagrammet i bilag D).

Før produktet kan produktmodnes, skal følgende videreudvikles/ændres på sorptionsdelen:

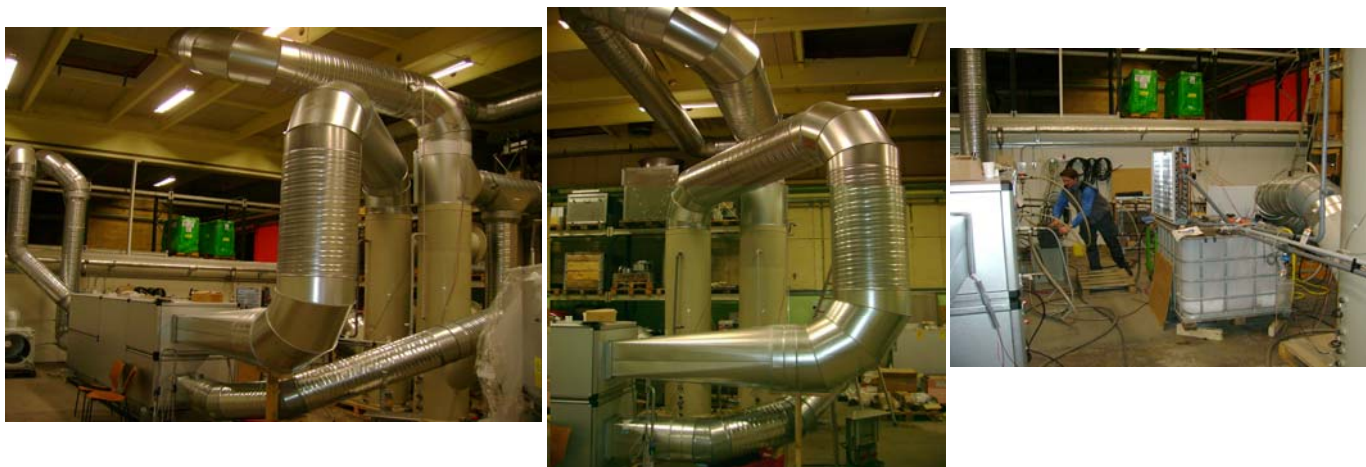
- Billige varmevekslere i korrosionsfast materiale.
- Billige men effektive LiCl-pumper i korrosionsfast materiale.
- Vandbesparende befugtningsflader, gerne regulerbare.
- Effektiv køletårn / tørkøler for varmeafgivelse med lavt elforbrug.
- Nye luftvaskere:
  - lavere, gerne vandrette
  - sikret mod medrivning af LiCl-opløsning
  - minimering af trykfald
  - prismæssig optimering.

Der er i løbet af projektet identificeret nye lovende luftvaskere under udvikling. I de luftvaskere løber sorptionsvæskeflowet ned over plader, der overstryges af luften. På denne måde kan væskeflowet reduceres betydeligt, samtidigt med at risiko for medrivning kan fjernes. Dette design vil gøre design af kompakte affugtere mulig.

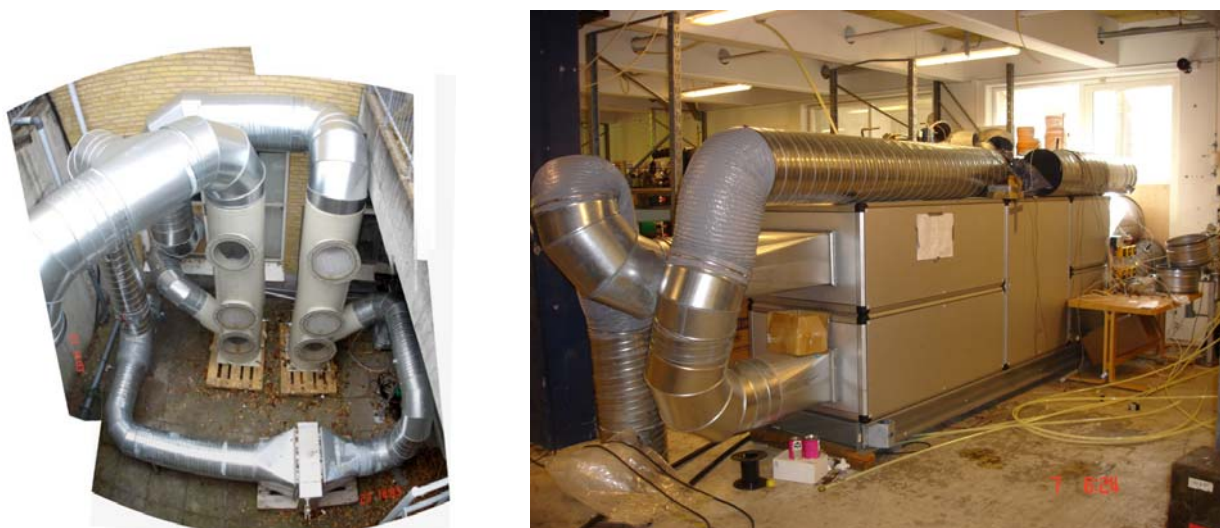
### 13 Test af prototype

Ret tidlig i forløbet blev det besluttet ikke at søge en slutbruger med henblik på egentlig fieldtest. Dette skyldes faren for LiCl-medrivning samt stor risiko for, at en del af de valgte komponenter i LiCl-kredsen ikke vil udvise særlig lang levetid.

Prototypen blev opstillet i NOVENCO's testfacilitet (figur 33) og efterfølgende hos Teknologisk Institut i Århus (figur 34). I begge tilfælde blev testene gennemført ved simuleret udendørstilstand: Hos NOVENCO i form af en varmeplade samt dampbefugter i indsugningskanalen til affugtertårnet, og hos Teknologisk Institut i form af recirkulering af en del af afkastluften fra regenereringstårnet. Ved opstillingen hos Teknologisk Institut blev der anvendt køletårnsvand i tre pladevarmeveksler i stedet for luftkøleren for LiCl-flowet.



Figur 33: Prototypen opstillet hos NOVENCO.



Figur 34: Prototypen under opstilling hos Teknologisk Institut. Sorptionskredsen uden-dørs, AHU-unit indendørs.

Der var en del problemer i starten:

- Procedure for opløsning af LiCl, der blev leveret i pulverform.
- Sammenkobling mellem pumper og anlæg blev foretaget med slanger, der blev bløde ved opvarmningen, samtidig med at LiCl-opløsningen viste sig at være meget smørende. Metalspændebånd var fravalgt pga. korrosion.
- Udfældning af salt ved stilstand: Under drift kunne der opnås koncentrationer, der førte til udfældning af salt, når anlægget blev kølet ned. Pumperne havde så vanskeligt ved at starte igen.
- En LiCl-pumpe kortslyttede og måtte skiftes på grund af tæring.
- To gange blokerede én af centrifugalpumper for LiCl i akseltætningen. Efter at have løsnet den, kørte pumpen igen.

Driftspunkterne ved de to test fremgår af figur 35.

DRY standardår													Antal ialt	1579
Antal timer dem samme konditioner														Antal
Våd temperatur, udtrykt som forskel til den tørre temperatur (°C)														
Tør temp (°C)	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	>=11		
32 - 33											1		1	
31 - 32													0	
30 - 31											2		2	
29 - 30										2	1		3	
28 - 29									2	3			5	
27 - 28							2	1	3	2			8	
26 - 27					1	2	1	5	5				14	
25 - 26					1	3	5	4	3	1	3	1	21	
24 - 25				1	3	9	7	8	4	1			33	
23 - 24					10	14	13	3	7				47	
22 - 23		1		8	12	17	11	8	3				60	
21 - 22			2	6	25	22	9	6	3	4			77	
20 - 21	1	1	10	25	34	21	5	5	3	1			106	
19 - 20	5	5	12	52	26	20	2	4	6				132	
18 - 19	10	15	50	41	38	19	8	7	1				189	
17 - 18	30	40	48	41	41	16	12	5					233	
16 - 17	57	67	51	50	34	26	5	4	2				296	
15 - 16	83	92	59	58	31	17	9		3				352	
Novenco													Teknologisk Institut	

Figur 35: Driftspunkter ved test af prototype.

testnr.	T <sub>omg</sub>	T <sub>omg,våd</sub>	RF <sub>omg</sub>	luftflow	luftflow	T <sub>indbl</sub>	RF <sub>indbl</sub>	T <sub>U1</sub>	RF <sub>U1</sub>	LiClflow	ΔT	q <sub>fjv</sub>	q <sub>køl</sub>	COP <sub>th</sub>	fjv.flow	T <sub>fjv,ind</sub>	T <sub>fjv,ud</sub>	ΔT <sub>fjv</sub>
	°C	°C	%	m <sup>3</sup> /h	kg/s	°C	%	°C	%	kg/s	°C	kW	kW	-	kg/s	°C	°C	°C
1	25,9	19,0	52,3	2064	0,684	17,6	90,2	23,0	0,56	0,45	8,1	25,3	10,1	0,40	0,34	70,0	52,2	17,8
2	26,1	19,1	52,0	2064	0,684	17,5	89,8	23,0	0,57	0,45	7,2	18,1	10,7	0,59	0,32	62,2	48,7	13,5
3	26,1	19,0	51,4	2064	0,684	17,5	89,8	23,0	0,57	0,44	6,7	16,5	10,6	0,64	0,34	58,5	46,9	11,6
4	26,1	19,2	52,5	2064	0,684	17,6	90,1	23,1	0,58	0,45	6,4	16,5	10,6	0,64	0,33	58,2	46,3	11,9
5	26,1	19,1	51,7	2064	0,684	17,5	89,9	23,0	0,58	0,45	5,7	10,7	10,6	0,99	0,33	50,4	42,7	7,7
6	26,1	19,2	52,2	2064	0,684	17,4	90,2	22,9	0,58	0,45	5,2	10,9	10,9	1,00	0,33	50,0	42,2	7,8
7	26,3	19,4	52,4	2064	0,682	17,9	91,2	23,0	0,59	0,46	5,9	20,7	10,1	0,49	0,19	70,4	44,0	26,4
8	26,3	19,5	53,2	2064	0,682	17,9	90,9	23,0	0,6	0,46	5,6	17,4	10,4	0,60	0,18	66,2	43,1	23,1

Figur 36: Resultater fra testen hos NOVENCO (index "U1" henviser til tilstanden efter opvarmning med varmebladen i AHU'en (simulering af rumbelastning). Se evt. diagrammet i bilag D.



testnr.	T <sub>omg</sub>	T <sub>omg,våd</sub>	RF <sub>omg</sub>	luftflow	luftflow	T <sub>indbl</sub>	RF <sub>indbl</sub>	T <sub>U1</sub>	RF <sub>U1</sub>	LiClflow	ΔT	q <sub>fjv</sub>	q <sub>køl</sub>	COP <sub>th</sub>	fjv.flow	T <sub>fjv,ind</sub>	T <sub>fjv,ud</sub>	ΔT <sub>fjv</sub>
	°C	°C	%	m <sup>3</sup> /h	kg/s	°C	%	°C	%	kg/s	°C	kW	kW	-	kg/s	°C	°C	°C
1	25,1	19,1	56,6	1654	0,54	17,1	91,1	26,2	48,7	0,39	5,6	19,4	8,6	0,44	0,29	63,7	47,6	16,0
2	26,9	20,4	55,7	1666	0,54	18,5	91,2	24,9	57,9	0,31	5,9	17,1	9,0	0,52	0,29	64,7	50,6	14,1
3	32,0	24,0	51,6	1647	0,53	21,5	94,1	26,7	62,7	0,29	5,4	15,2	11,1	0,74	0,29	64,7	52,3	12,4
4	27,5	21,5	59,2	1666	0,54	18,1	92,1	24,6	57,4	0,29	1,9	21,5	11,3	0,53	0,29	72,3	54,7	17,6
5	26,4	20,5	58,7	1676	0,55	15,9	92,9	23,2	55,3	0,29	-3,8	21,9	12,9	0,59	0,29	71,1	53,0	18,1
6	29,8	22,9	55,5	1651	0,54	18,8	92,6	25,0	60,0	0,57	2,8	27,2	13,3	0,49	0,29	68,9	46,4	22,5
7	28,2	21,2	53,9	1659	0,54	17,9	92,6	24,5	57,1	0,59	3,2	22,4	11,6	0,51	0,29	61,8	43,3	18,6
8	37,4	27,3	46,3	1654	0,53	22,0	95,1	27,0	62,1	0,58	-1,4	19,6	18,6	0,95	0,29	63,2	46,9	16,3

Figur 37: Resultater fra testen hos Teknologisk Institut (index "U1" henviser til tilstanden efter opvarmning med varmefluden i AHU'en (simulering af rumbelastning). Se evt. diagrammet i bilag D.

Som det fremgår af figur 37 blev der hos Teknologisk Institut gennemført tests, hvor LiCl-flowet til affugtertårnet blev afkølet til temperaturer under den tørre omgivelsestemperatur. Denne driftstilstand kan opnås med et åbent køletårn.

I begge testserier ses urealistiske COP-værdier (test 5 og 6 i "NOVENCO" serien i figur 36 og test 3 og 8 i "Teknologisk Institut" serien i figur 37). Dette førte til en dybere gennemgang af måleopstillingen og de anvendte instrumenter: En følsomhedsanalyse viste, at især målingen af luftfugtigheden er meget kritisk for resultaterne. Dels på grund af, at den målte relative fugtighed kombineret med den tørre temperatur anvendes til beregning af det absolutte fugtindhold (hvorved usikkerheden på begge målinger spiller ind), og dels fordi der er tale om små ændringer i fugtindholdet (differenser mellem to målesteder), hvorfor den relative usikkerhed bliver stor. Det viste sig, at selv ved valg af instrumenter med betydeligt større nøjagtighed (andet måleprincip) vil usikkerhederne på resultaterne blive betydelige.

Begge testserier blev gennemført som en serie målinger med en stabiliserende periode mellem parameterskift. En sammenligning viste, at disse perioder har været for korte ved "NOVENCO" serien (ca. 20 min), hvilket skyldes manglende erfaring med systemets tidskonstanter. Dette er nærmere behandlet i 13 "Test af styring og regulering". Ved drift på baggrund af fjernvarme vil en succes for varmedrevet køling afhænge af muligheden for en passende stor afkøling af fjernvarmevandet. "NOVENCO" testserien var koncentreret omkring analyse af dette. I test nr. 5 og 6 er fremløbstemperaturen sænket til ca. 50°C, og de høje COP-værdier er med stor sikkerhed påvirket af "reservekapaciteten", der findes i sorptionsvæskens manglende ligevægt (højere koncentration) med den lave regenereringstemperatur. Dette viser også den nævnte mulighed for energilagring ved regenerering til højere koncentration.

Returtemperaturen for fjernvarmevandet (og dermed indirekte afkølingen) er begrænset af sorptionsvæskens temperatur før opvarmningen. Dette fører til to begrænsende forhold: Dels den interne varmegenvinding (som det fremgår af parameterstudiet i bilag E), og dels afkølingen af sorptionsvæsken før indløbet til affugtertårnet: Jo højere temperatur før affugtertårnet, jo højere temperaturniveau for sorptionsvæsken. Den laveste opnåede fjernvarmereturtemperatur er 42°C, men det vil kræve en egentlig fieldtest, før en endelig konklusion kan slttes.

Hvis der ses bort fra de førnævnte fire testpunkter, er der opnået termisk COP på 0,4 til 0,65, hvilket er meget tilfredsstillende.

Virkningsgraderne for de to befugtningsflader er fundet til ca. 0,8, krydsvarmeveksleren til ca. 0,6 og varmegenvindingsveksleren i sorptionskredsen til ca. 0,8.

Det er vurderet, at de målte temperaturer er målt med acceptabel usikkerhed, og disse er anvendt til indjustering af beregningsmodellerne, således at forskellen er mindre end 5%.

I det følgende er nærmere redegjort for forbruget af el og vand i demoanlægget.

### 13.1 Tryktab i ekstra aggregater på luftsiden

Ventilationsluften vil i forhold til et konventionelt anlæg med en køleflade til at køle luften møde mere modstand i et sorptionskølesystem. Den ekstra modstand kommer fra de 2 befugtningsflader og de 2 tårne. Tryktabet i aggregaterne blev målt til følgende:

Sted	$\Delta p$ [Pa]
Tårn indblæsning	230
Tårn afkastluft	140
Befugtningsflade indblæsning	67
Befugtningsflade afkastluft	67

Tabel 1: Tryktab målt i system.

Selvom der passerer samme luftmængde på indblæsnings- og afkastsiden, er der forskel på trykfaldene over tårnene. Dette skyldes, at der er flere fyldelementer i tårnet på indblæsnings siden.

De målte tryktab er fundet ved et luftflow  $q$  på ca. 2.000 m<sup>3</sup>/h. Antages ventilatoren med motor og transmission at have en virkningsgrad på 60 %, kan det specifikke effektoptag, til at trække luften gennem de ekstra modstande, findes som:

$$\frac{P}{q} \left[ \frac{W}{\frac{m^3}{h}} \right] = \frac{\Delta p \text{ [Pa]}}{3.600 \left[ \frac{h}{h} \right] \cdot 0,6}$$

Sted	$\Delta p$ [Pa]	Specifikt effektoptag [W pr. m <sup>3</sup> /h]
Tårn indblæsning	230	0,106
Tårn afkastluft	140	0,065
Befugtningsflade indblæsning	67	0,031
Befugtningsflade afkastluft	67	0,031

Tabel 2: Specifik effektoptag til at drive luften gennem ekstramodstande i sorptionsanlæg på luftsiden.

Luften bør passere uden om tårnene i den periode, hvor der ikke er behov for affugtning.

For et konventionelt køleanlæg er trykfaldet over kølefladen i indblæsningskanalen typisk 100 Pa.



## 13.2 Hjælpeudstyr

### Pumper til LiCl-kredsen

I hvert af de 2 tårne er der placeret en dykpumpe til at cirkulere blandingen af LiCl. Effektoptaget på de 2 pumper blev målt til ca. 350 W pr. stk.

Pumperne skal kun være i drift, når affugtertårnene anvendes. I Danmark vil det typisk være i ca. 200-600 timer alt efter den ønskede indblæsningstemperatur.

### Blæser på tørkøler i LiCl-kredsen

I LiCl-kredsen mellem varmeveksleren og affugtertårnet er der placeret en tørkøler. Effektoptaget til ventilatoren i denne sættes til 200 W. Blæseren skal kun være i drift, når der er behov for affugtning af luften. I Danmark vil det typisk være i ca. 200-600 timer alt efter den ønskede indblæsningstemperatur.

## 13.3 Specifikke forbrug på sorptionskøleanlæg på el-siden

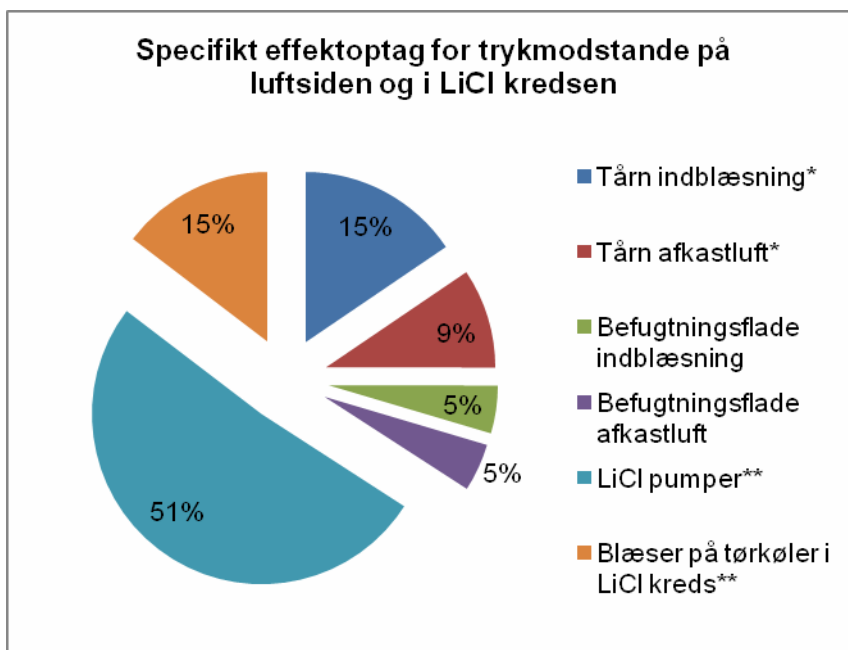
I tabel 3 ses det specifikke effektoptag for komponenter i sorptionsanlægget. Det ses, at LiCl-pumperne har det højeste specifikke effektoptag. Elforbruget vil afhænge af driftstiden, eller hvor mange timer pr. år luften passerer den givne komponent.

- \*\* : betyder, at komponenten kun er i brug, når affugtningsmodulet er i drift.
- \* : betyder, at man kan vælge, om komponenten skal passeres/er i brug, når affugtningsmodulet ikke er i drift.

Sted	Specifikt effektoptag for trykmodstande på luftsiden og i LiCl-kredsen [W pr. m <sup>3</sup> /h]
Tårn indblæsning*	0,106
Tårn afkastluft*	0,065
Befugtningsflade indblæsning	0,031
Befugtningsflade afkastluft	0,031
LiCl pumper**	0,35
Blæser på tørkøler i LiCl-kreds**	0,1

Tabel 3: Specifikt el-effektoptag for komponenter i sorptionskøleanlægget.

I figur 37 er de specifikke effektoptag illustreret grafisk. Det ses, at LiCl-pumperne har det markant største specifikke effektoptag, men driftstiden for disse vil være kort. Til gengæld kan elforbruget til at trække luft gennem tårnene blive en stor udgift, hvis luften passerer tårnene konstant. Det er derfor vigtigt, at anlægget opbygges, så luften kun passerer tårnene, når der er behov for affugtning af luften.



Figur 37: Specifikt el-effektoptag for komponenter i sorptionskøleanlægget.

## 13.4 Vandforbrug til befugtning

### Befugter uden recirkulering

Ved test af sorptionsanlægget blev der anvendt en befugter fra Munters model FA6. Befugteren er uden recirkulering fra bundkarret, og overskydende vand ledes til kloak.

### Befugter med recirkulering

Anvendes befugteren uden recirkulering er vandforbruget noget højere end med recirkulering. Under forsøgsrækken var forbruget af vand ca. 5 gange højere end forbruget brugt til den adiabatisk afkøling af luften. Det høje vandforbrug skyldes anvendelsen af 2 kugleventiler til at dosere vandmængden på hver befugter. Justeringen af ventilerne foregik manuelt. For at få en bedre udnyttelse af vandet skal der anvendes en ventil, der doserer mere nøjagtigt og bedre ved en lav åbningsgrad.

Vandet i bundkarret vil ved recirkulation ophobe mineraler og kalk, hvis der ikke anvendes vandbehandlingsanlæg. Det vil derfor være nødvendigt at "bleede" vand af. For køletårne regnes normalt med, at ca. 30 % af det anvendte vand bleedes af.

## Teoretisk vandforbrug

Ud fra den udarbejdede simuleringssmodel og referenceåret DRY er det muligt at få et overslag på det årlige vandforbrug for et sorptionskøleanlæg.

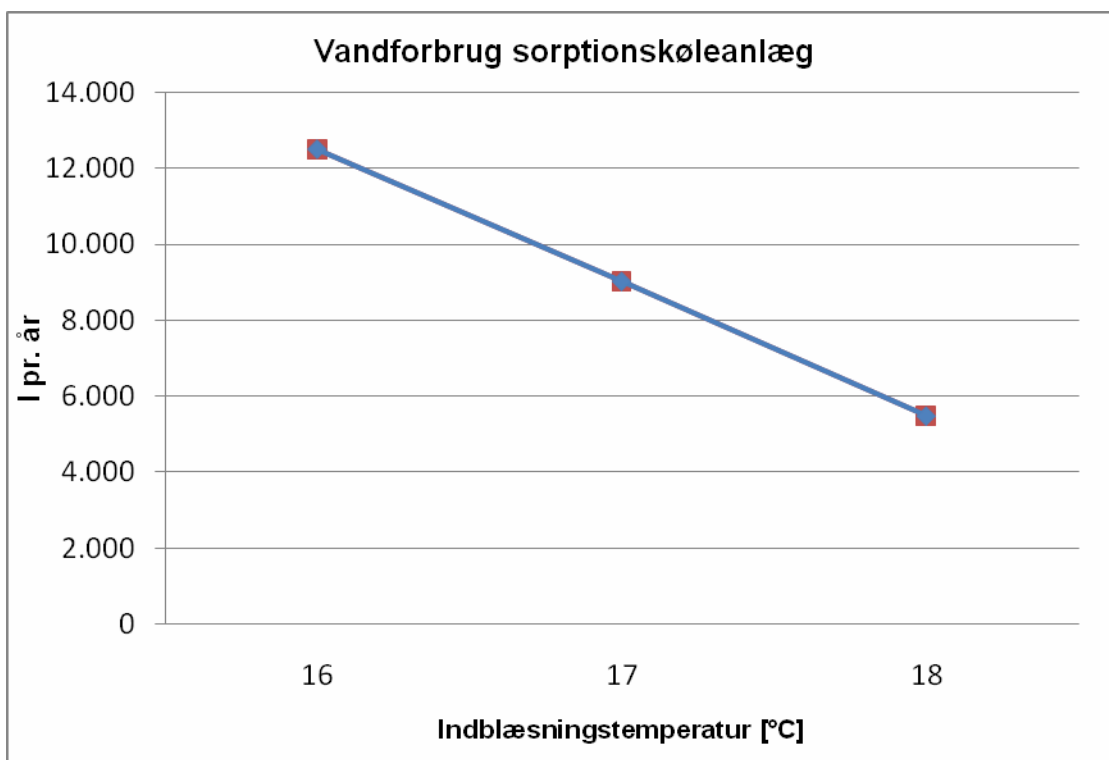
Ønskes luften konditioneret til en indblæsningstemperatur på 18°C, skal der i teorien anvendes ca. 5,5 m<sup>3</sup> vand pr. år til adiabatisk afkøling.

Til beregningen er der følgende forudsætninger. En temperaturstigning på 1°C af indblæsningsluften ved passage af ventilator og motor. Udsugningstemperaturen fra den ventilerede zone er 25°C.

Ved beregningen er der 299 timer pr. år, hvor affugtningsmodulet kombineret med befugtning skal anvendes.

Da køleeffekten for sorptionssystemet fremkommer ved en kombination af affugtning og befugtning af indsugningsluften, er det muligt i perioder af året, hvor indsugningsluften er tilstrækkelig tør, udelukkende at køre med befugtning. Befugtning alene skal foretages i 632 timer pr. år for at nå ned på en indblæsningstemperatur på 18°C.

Bleedning er 30% af den samlede vandmængde svarende til 2,4 m<sup>3</sup>/år. Det samlede teoretiske mindste vandforbrug bliver ca. 8 m<sup>3</sup>/år, ved en indblæsningstemperatur på 18°C.



Figur 38: Teoretisk vandforbrug for sorptionskøling uden bleedning. Der regnes med 1°C stigning over indblæsningsventilatoren.

## **Vandpris**

Vandprisen i Danmark varierer mellem kommunerne, men prisen ligger i 2008 typisk på 30 kr./m<sup>3</sup> ekskl. moms. Kun 40% eller ca. 12 kr./m<sup>3</sup> går til vandet, de resterende 60% er afledningsafgift.

Det er normalt muligt at arrangere det således, at der kun betales afgift af det vand, der udledes til kloak. Der regnes med en vandpris på 20 kr./m<sup>3</sup>.

## 14 Test af styring og regulering

Som nævnt i 4 ”Styringsfilosofi”, startes affugtningen (sorptiondelen af anlægget) først, når den fulde kapacitet af de to adiabatisk køleflader og krydsvarmevekslingen er udnyttet fuld ud. Reguleringen af køleydelsen kan dermed kun ske gennem regulering af affugtningen af indsugningsluften.

Denne regulering kan ske på tre måder:

1. Sorptionsvæskens koncentration.
2. Sorptionsvæskens flow.
3. Sorptionsvæskens temperatur ved indløbet til affugtertårnet.

I pilotanlægget var der installeret en styring efter ovennævnte første princip. Da det ved opbygningen var prioriteret at forsøge at anvende standardiserede komponenter, blev en regulator af type C14 fra Danfoss valgt. Filosofien var at anvende denne standardregulator konfigureret til styring af en sekundær kølekreds: Ved stigende temperatur vil regulatoren gradvist åbne en ventil. I sorptionskredsen skulle regulatoren styre fjernvarmeflowet: Ved stigende temperatur i indblæsningstemperaturen ville fjernvarmeflowet blive reguleret op med højere temperatur, med regenerering af sorptionsvæsken til følge. Dette ville medføre større affugtning og dermed større afkøling af indblæsningsluften.

På grund af at det var nødvendigt at gennemføre testene med simuleret udendørstilstand og tidskonstanterne i systemet, var det desværre ikke muligt at gennemføre test af denne styring. I det følgende er de tre filosofier derfor undersøgt ved hjælp af beregningsmodellen. Alle analyserne er foretaget ved samme udendørstilstand: 26°C tør og 21°C våd (13,6 g/kg) og 2000 m<sup>3</sup>/h balanceret luftflow. Udsugningsluften er 23°C varm og 57% RF (10 g/kg).

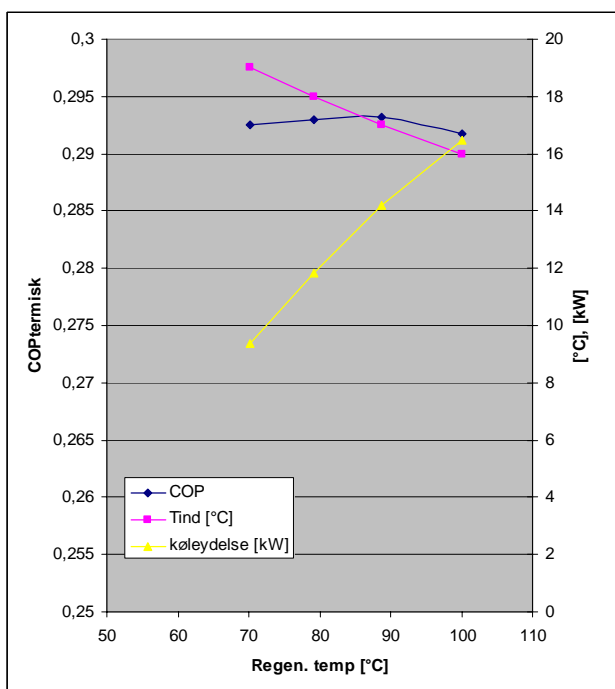
Kurverne i det følgende viser systemets reaktion på de tre reguleringsmåder. Der er ikke foretaget en optimering af anlægsdesignet, og der er kun undersøgt for én udendørstilstand. De lave COP-værdier skal altså ikke overføres til et egentligt anlæg...

### *1. Kapacitetsregulering gennem sorptionsvæskens koncentration*

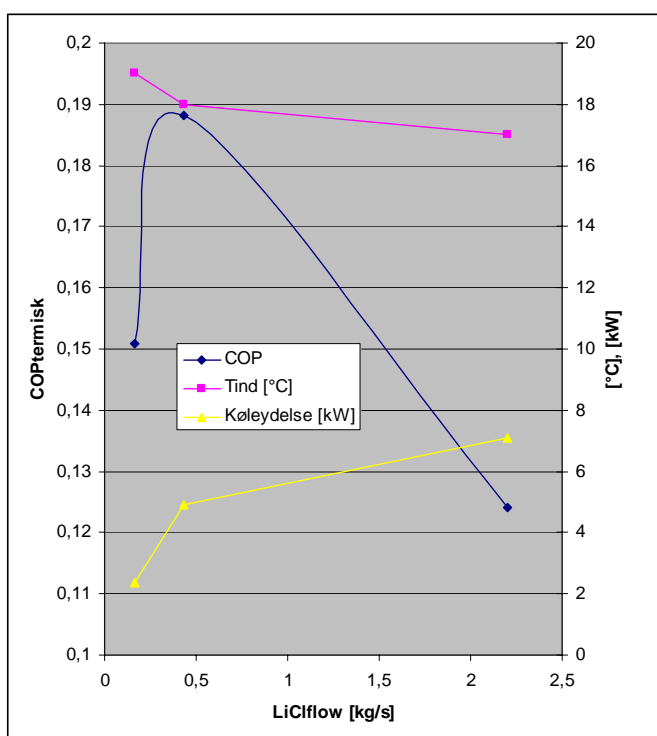
Som det fremgår af figur 39, påvirkes COP<sub>termisk</sub> kun ubetydeligt ved kapacitetsregulering gennem ændring af LiCl-opløsningens koncentration. Koncentrationen styres gennem ændring af regenereringstemperaturen.

### *2. Kapacitetsregulering gennem sorptionsvæskeflowet*

Af figur 40 fremgår, at COP er meget afhængig af sorptionsvæskeflowet, hvorfor denne reguleringsmåde, hvor regenereringstemperaturen holdes konstant (70°C i dette eksempel), ikke kan anbefales.



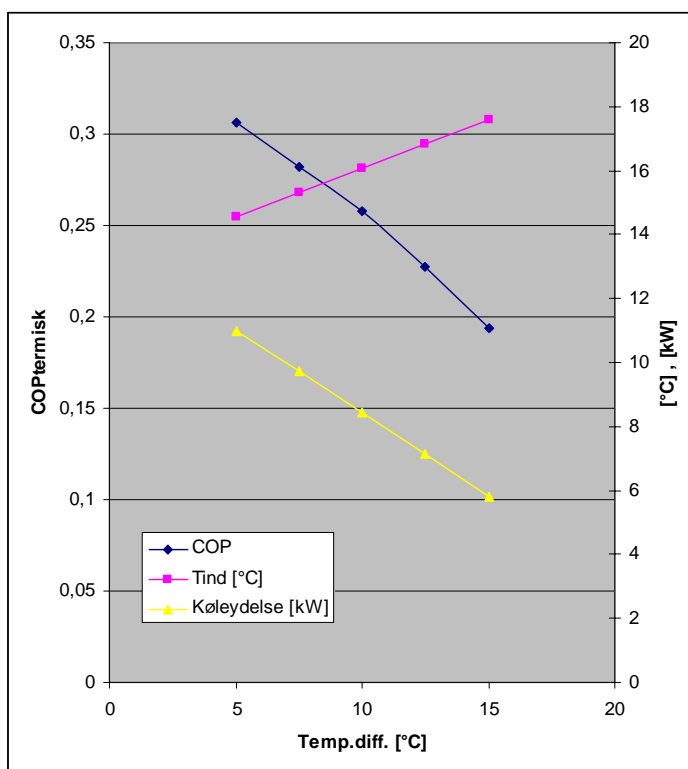
Figur 39: Kapacitetsregulering gennem regenereringstemperaturen og dermed koncentrationen af LiCl-opløsningen.



Figur 40: Kapacitetsregulering gennem ændring af sorptionsvæskeflowet.

### 3. Kapacitetsregulering gennem sorptionsvæskens temperatur ved indløbet til affugtertårnet

Af figur 41 fremgår, at COP afhænger stærkt af sorptionsvæskens afkøling før indløbet til affugtertårnet. Ved at tillade en højere temperaturdifferens til omgivelserne kan der opnås en driftsbesparelse på køletårnet/tørkøleren. Om denne reguleringsmåde er god, vil derfor afhænge af prisforskellen mellem el og varme.



Figur 41: Kapacitetsregulering gennem sorptionsvæskens temperatur før affugtertårnet.

Af ovenstående kan det konkluderes, at sorptionsprocessen bedst styres ved regulering af regenereringstemperaturen.

## 15 Rapportering

Projektet er blevet præsenteret på Danske Køledage flere gange gennem forløbet samt i projektsamarbejdet IEA SHC task 38 under det Internationale Energiagentur (<http://www.iea-shc.org/task38/index.html>), der arbejder med soldrevet køling og luftkonditionering. Herigennem er der knyttet kontakt til Universiteter i Tyskland (Kassel Universitet) og Canada (Queen's University, Kingston), hvor der foregår forskning i den våde sorptionsteknologi.

På grund af de udfordringer, der var forbundet med udviklingen af sorptionsprocessen og udstyret hertil, er der endnu ikke udarbejdet artikler omkring projektet. Dette vil blive gennemført efterfølgende. Især vil der blive gjort en indsats for at udbrede viden omkring mulighederne i adiabatisk køling.



## Samlede forbrug & CO<sub>2</sub>-emission

### Sammenligningsgrundlag

De to anlægstyper (kompressionskøling og væskebaseret sorptionskøling) sammenlignes på energiforbrug (el & varme) og vandforbrug. Der medtages ikke udgifter til evt. vandbehandling.

Der regnes på en luftstrøm på 2.000 m<sup>3</sup>/h (~ 0,66 kg luft pr. s), der skal konditioneres til 17°C. Der regnes med 1°C stigning af lufttemperatur ved passage af indblæsningsventilatoren, så indblæsningstemperaturen bliver 18°C. Anlægget tænkes at være i drift hele døgnet.

### CO<sub>2</sub>-emissioner

Der anvendes følgende CO<sub>2</sub>-emissionstal:

Energiform	g/kWh
El	547
Fjernvarme	133

Emissionstallet for el er det gennemsnitlige tal for Østdanmark i 2007. For fjernvarme er det officielle tal fra Energistyrelsen 2001. Man kan diskutere, om der er emission fra fjernvarme om sommeren, hvis der er tale om kraft-varme produktion. Varmen skal dog pumpes rundt til forbrugerne, hvilket medfører et elforbrug.

### Forbrug til kompressionskøleanlæg

Elforbruget til et kompressionskøleanlæg vil afhænge af anlæggets opbygning og driftskonditionerne. Anlæg i størrelser til at konditionere 2.000 m<sup>3</sup>/h vil typisk ikke have en hensigtsmæssig kapacitetsregulering, når der ses på energiforbruget.

Anlæg i denne størrelse vil typisk have en COP på 2-3. Der regnes med en COP på 2,5.

Anvendes referenceåret DRY til at beregne, hvor meget energi, der anvendes til at nedkøle udeluften til 17°C, fås 1.820 kWh/år. Der er her ikke taget hensyn til den vandmængde, der slås af luften ved nedkølingen. Energiforbruget til at slå fugten udgør typisk 50% af den sensible energi. Det samlede energiforbrug til at nedkøle luften til 17°C bliver derfor ca. 2.750 kWh/år.

Ved en COP på 2,5 bliver det årlige elforbrug ca. 1.100 kWh (=2.750/2,5) til at nedkøle 2.000 m<sup>3</sup>/h til 18°C indblæsningstemperatur, når der regnes med 1°C temperaturstigning over indblæsningsventilatoren.

## Forbrug for væskebaseret sorptionsanlæg

Det væskebaserede sorptionsanlæg styres på følgende måde:

1. Ved udetemperaturer under indblæsningstemperaturen (varmebidraget fra ventilatoren skal medtages) gøres intet.
2. Ved for høj indblæsningstemperatur startes med adiabatisk køling ved befugtning af indblæsningsluften.
3. Som 2, med befugtning af udsugningsluften (adiabatisk køling) og varmeveksling med indsugningsluften før denne befugtes.
4. Som 3, med affugtning af indsugningsluften før varmeveksling.

Ønskes der en indblæsningstemperatur på 18°C (inkl. 1°C stigning over indblæsningsventilator), er det beregnet ved brug af referenceåret DRY, at der skal anvendes befugtning alene i 632 timer pr. år. Sorptionsmodul skal anvendes i 299 timer pr. år.

Bemærk, at der ikke sættes grænser for indblæsningsluftens relative fugtighed. Der regnes med, at luften føres uden om tårnene i tiden, hvor sorptionsmodul ikke anvendes. Ventilationsanlægget er i drift hele året.

	<b>Driftstid</b>	<b>Elforbrug ekstra tryktab i kanal</b>	<b>Elforbrug Pumper + blæser i LiCl-kreds</b>	<b>Vandforbrug inkl. bleedning</b>	<b>Varmeforbrug</b>
	<b>[h/år]</b>	<b>[kWh/år]</b>	<b>[kWh/år]</b>	<b>[m<sup>3</sup>/år]</b>	<b>[kWh/år]</b>
Ingen køling	7.829	931	-	-	-
Befugtning alene	632	78	-	4,6	-
Sorptionsmodul	299	139	270	3,3	3.718
Total	8.760	1.148	270	7,9	3.718

Tabel 4: Forbrug for sorptionskøleanlæg.  $T_{indblæsning} = 18^{\circ}\text{C}$ , luftmgd. = 2.000 m<sup>3</sup>/h.

Tryktabet for en køleflade i et konventionelt køleanlæg er typisk 100 Pa svarende til, at der skal anvendes ca. 800 kWh pr. år for at drive luften gennem fladen. I tabel 4 ses det årlige elforbrug til at drive luften gennem de ekstra modstande i et sorptionskøleanlæg. Elforbruget ses at være 1.148 kWh/år eller ca. 350 kWh/år højere end elforbruget til at drive luften gennem et konventionelt systems køleflade.

## Sammenligning

	Elforbrug [kWh/år]	Varmeforbrug [kWh/år]	Vandforbrug [m <sup>3</sup> /år]
Kompressorkøl	1.900	-	-
Væskebaseret sorption	1.418	3.718	7,9

Tabel 5: Årligt energi- og vandforbrug til at konditionere indblæsningsluften til 18°C. Elforbrug til at drive luften gennem ekstramodstande er medregnet.

I den økonomiske sammenligning anvendes følgende priser:

Elpris:	1 kr./kWh
Fjernvarmepris:	0,45 kr./kWh
Vandpris:	20 kr./m <sup>3</sup>

	Elforbrug [kr./år]	Varmeforbrug [kr./år]	Vandforbrug [kr./år]	Samlet [kr./år]	%
Kompressorkøling	1.900	-	-	1.900	100
Væskebaseret sorption	1.418	1.675	158	3.251	171

Tabel 6: Sammenligning af økonomi for de 2 anlægstyper.

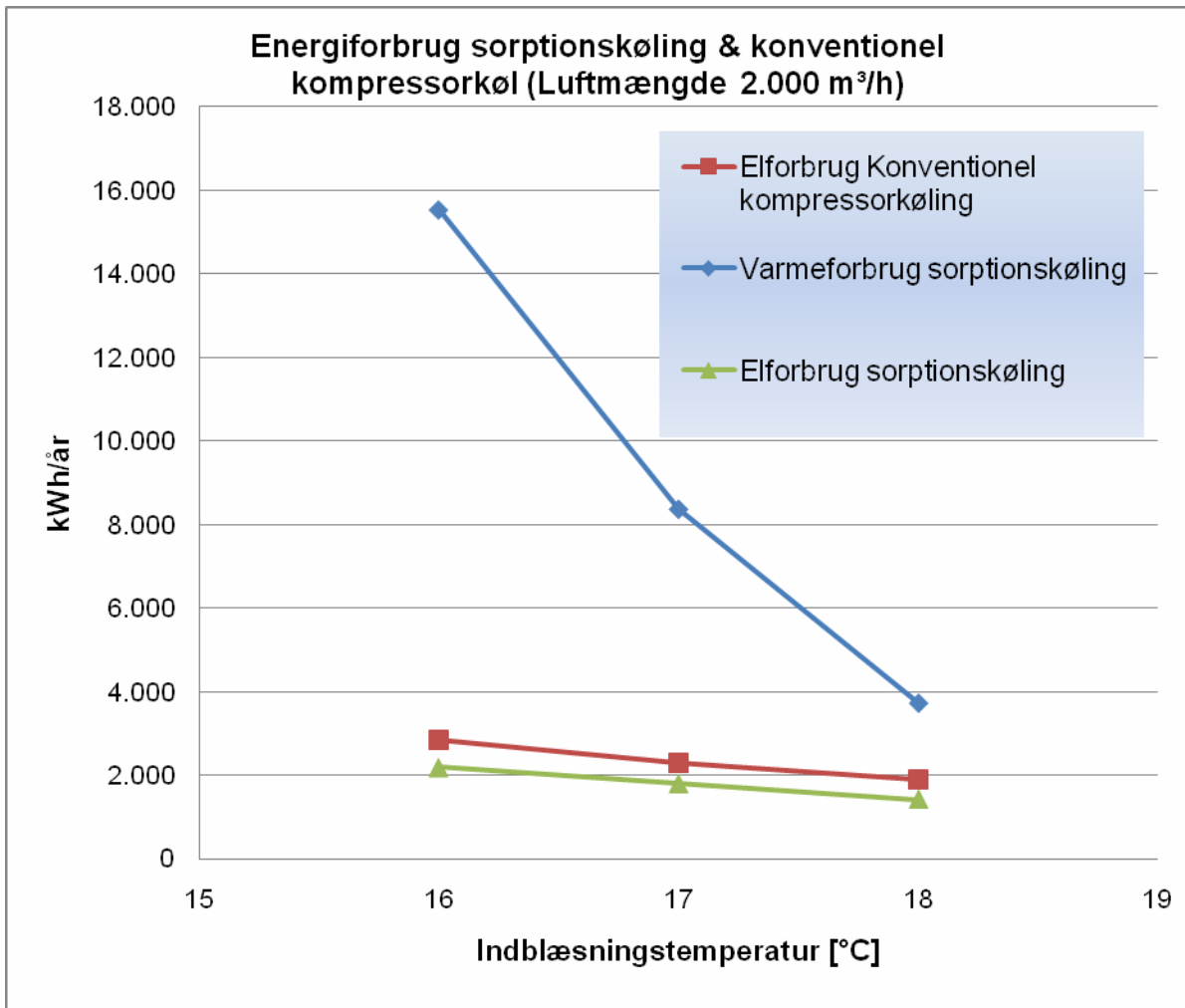
Ved de anvendte priser ses der, at være 70 % højere udgift til at drive et væskebaseret sorptionskøleanlæg. Det kan dog diskuteres, om prisen på fjernvarme er for høj, da varmen primært er et spildprodukt i sommerhalvåret.

Er varmen gratis, bliver økonomien for sorptionskøleanlægget bedst. Den økonomiske besparelse vil da være ca. 17% for et sorptionskøleanlæg ved en indblæsningstemperatur på 18°C.

Elforbruget for sorptionsanlægget har også stor betydning for den årlige udgift. Ved en indblæsningstemperatur på 18°C går ca. 65% af elforbruget til at trække luften gennem befugterne.

## Energiforbrug ved lavere indblæsningstemperaturer

Man bør have for øje, at skal der køles til en lavere indblæsningstemperatur end de 18°C, vil varmekonsumet til sorptionsprocessen blive forholdsvis større end elforbruget til kompressorkøling. Det bliver derfor forholdsvis dyrere at anvende sorptionsprocessen, jo lavere indblæsningstemperatur der ønskes, hvis varmen ikke er gratis.



*Figur 42: Energiforbrug til sorptionskøleanlæg og konventionelt kompressorkøleanlæg. Der er regnet med 1°C temperaturstigning over indblæsningsventilator.*

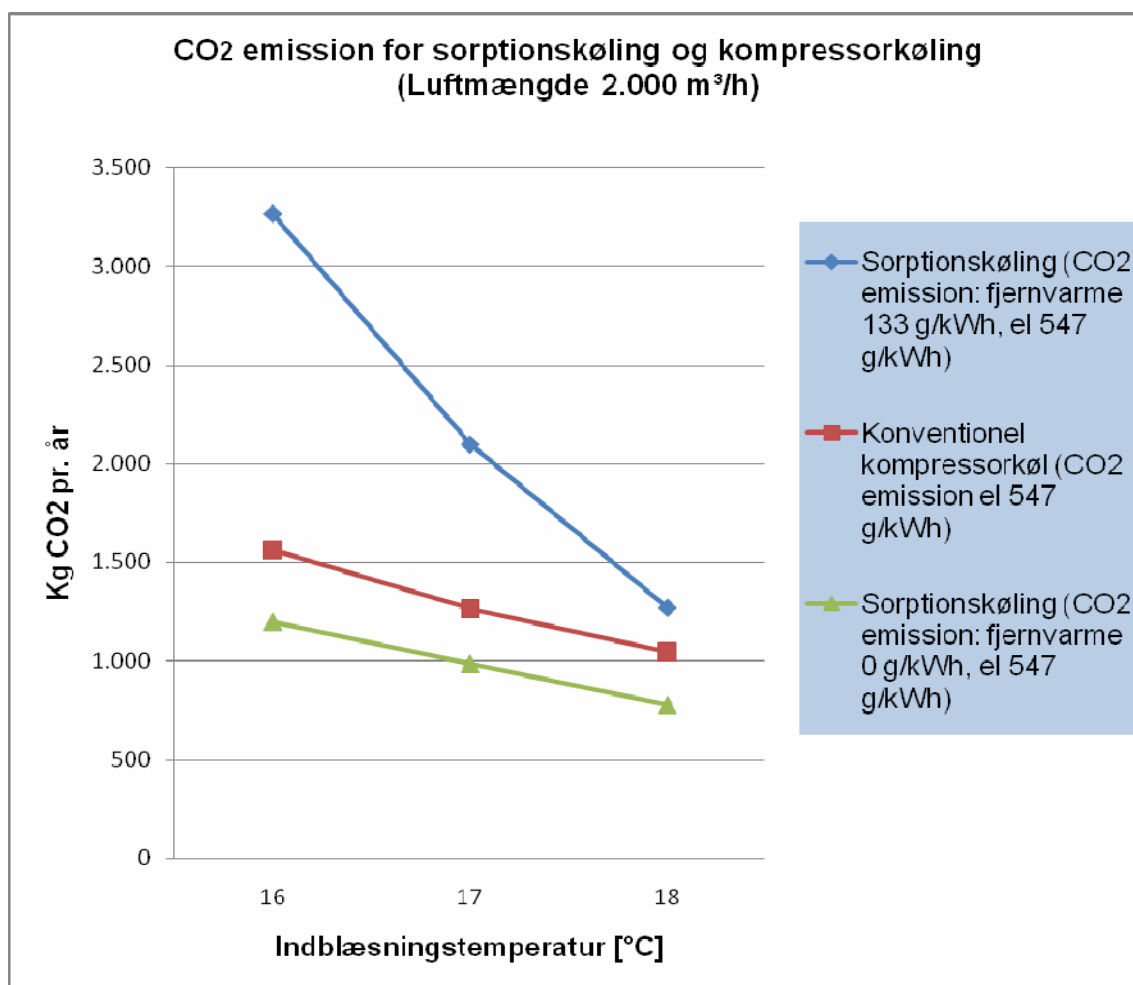
I figur 42 ses, at elforbruget ved konventionel kompressorkøling stiger med ca. 50 %, hvis der ønskes en indblæsningstemperatur på 16°C i stedet for 18°C. For sorptionskøleanlægget stiger varmekøleforbruget med ca. 400 %, hvis der ønskes en indblæsningstemperatur på 16°C i stedet for 18°C.

## CO<sub>2</sub>-emission

	Årlig CO <sub>2</sub> -emission med varmebidrag for sorptionskøling [kg]	% Med varmebidrag	Årlig CO <sub>2</sub> -emission ekskl. varmebidrag for sorptionskøling [kg]	% Ekskl. varmebidrag
Kompressorkøling	1.045	100	1.045	100
Væskebaseret sorption	1.270	122	776	74

Tabel 7: Sammenligning af CO<sub>2</sub>-emissioner ved 18°C indblæsningstemperatur.

Det ses, at der er en reduktion på 26% af CO<sub>2</sub>-udslippet, hvis fjernvarmen regnes CO<sub>2</sub>-neutralt. Tildes fjernvarmen en emission på 133 g/kWh, bliver CO<sub>2</sub>-emissionen 22% højere ved sorptionskøling.



Figur 43: CO<sub>2</sub>-emission med og uden bidrag fra fjernvarme. Der regnes med 1°C stigning over indblæsningsventilator.

I figur 43 ses CO<sub>2</sub>-emissionen ved forskellige indblæsningstemperaturer for sorptions- og kompressorkøling. Det ses, at CO<sub>2</sub>-emissionen stiger markant, jo lavere indblæsningstemperatur der ønskes, hvis fjernvarmen tildeles et bidrag på 133 g/kWh. Tildeles fjernvarmen ikke et CO<sub>2</sub>-bidrag, reduceres CO<sub>2</sub>-udslippet med 22-26% ved sorptionskøling.

Som det fremgår af 13.3 ”Specifikke forbrug på sorptionskøleanlæg på el-siden”, udgør komponenter i sorptionsdelen af anlægget ca. 80% af elforbruget. Ved en videreudvikling af sorptionskredsen og affugter- og regenereringstårnene samt valg af mere hensigtsmæssige komponenter kan elforbruget med sikkerhed reduceres betydeligt.

### **Generelle betragtninger**

Ved sammenligning af en termisk drevet sorptionskøleproces med en konventionel køleløsning kan følgende generelle udtryk opstilles ved samme køleydelse.

#### *Energimæssig sammenligning*

$$\frac{COP_{konventionel}}{COP_{sorption}} \leq \frac{driftstimet_{konventionel}}{driftstimet_{sorption}}$$

Hvis dette udtryk er opfyldt, vil kWh-forbruget være det samme eller mindre for en sorptionsløsning.

Antages de årsmidlede COP-værdier til henholdsvis COP<sub>kommerciel</sub> = 2,5 og COP<sub>sorption</sub> = 0,5, skal antallet af driftstimer med den konventionelle løsning være mindst 5 gange større end behovet for affugtning, før *energiforbruget* ved sorptionsløsningen bliver mindre.

#### *Driftøkonomisk sammenligning*

$$\frac{COP_{konventionel}}{COP_{sorption}} \leq \frac{driftstimet_{konventionel} \times pris_{kWh,el}}{driftstimet_{sorption} \times pris_{kWh,varme}}$$

Hvis dette udtryk er opfyldt vil der være en økonomisk gevinst ved *driften* af en sorptionsløsning. Elforbruget for sorptionsdelen af anlægget (samt etableringsudgifter) er dog ikke medregnet.

#### *CO<sub>2</sub>-emissionsmæssig sammenligning*

$$\frac{COP_{konventionel}}{COP_{sorption}} \leq \frac{driftstimet_{konventionel} \times CO_2emmission_{kWh,el}}{driftstimet_{sorption} \times CO_2emmission_{kWh,varme}}$$

Hvis dette udtryk er opfyldt, vil der være mindre CO<sub>2</sub>-udslip forbundet med driften af et sorptionsanlæg sammenlignet med en konventionel løsning. Emissionen, forbundet med el- og vandforbruget, er dog ikke medregnet.

## 16 Konklusion

Et luftkonditioneringsystem baseret på affugtning med en termisk drevet, våd sorptionproces og adiabatisk køling er udviklet og demonstreret.

Der er udviklet to simuleringsmodeller for henholdsvis ren adiabatisk køling og adiabatisk køling kombineret med sorption.

Gennemregning af det danske DRY-referenceår viser, at adiabatisk køling vil være tilstrækkelig til at opfylde et behov for køling ved luftkonditionering i hele eller næsten hele året. Med andre ord kan kølebehovet dække helt eller delvist, alene ved fordampning af vand.

Adiabatisk køleløsninger kan opbygges af standardkomponenter, der allerede anvendes i ventilationsindustrien, og de vil sikkert kunne eftermonteres på mange eksisterende ventilationsanlæg.

Indførelsen af adiabatisk køling i eksisterende anlæg vil også kunne sænke driftstiden for en traditionel køleløsning betydeligt.

Det anbefales på det kraftigste, at der igangsættes et udrednings- og demonstrationsprojekt med henblik på at klarlægge de hindringer, der er for udnyttelsen af adiabatisk køling. Af disse kan nævnes:

- Frygten for fugtproblemer i bygningen og ventilationskanalsystemet
- Frygten for legionellaforurening af indblæsningsluften
- Frygten for dårligt indeklima på grund af høj luftfugtighed
- Krav om (for) lav indblæsningstemperatur.

Udviklingen af den våde sorptionsproces, baseret på LiCl, afdækkede behov for yderligere udvikling, før en arkitektonisk, driftssikker og billig løsning er fundet. Af udfordringer kan nævnes:

- Billige, korrosionsbestandige varmevekslere og (tør-)kølere
- Billige, korrosionsbestandige og effektive pumper
- Kompakte luftvaskere (affugter- og regenereringstårne).

En af baggrundene for projektet var sammenfaldet om sommeren mellem overskud af fjernvarme og behovet for køling. Selvom driftstiden for den fjernvarmedrevne sorptionsproces er betydelig mindre end en konventionel køleløsning, viser det sig, at det vil være meget vanskeligt at få en sorptionsløsning til at hænge sammen rent driftsøkonomisk. Især hvis det ikke lykkes at billiggøre anlæggene i forholdt til traditionelle køleløsninger. Der er opstillet nogle simple udtryk for en overordnet vurdering af, om en sorptionsløsning vil være attraktiv.

## 17 Kilder

- /1/ Thermodynamic analysis of solar thermally driven cold production, H-M Henning oa. Conference paper, 2nd Int. Conference Solar Air-Conditioning, Tarragona, Spain, October 2007
- /2/ Solar Cooling, An overview of European Applications & Design Guidelines, C.A. Balas, ASHRAE Journal juni 2006
- /3/ Properties of a new liquid desiccant solution – Lithium Chloride and Calcium Chloride mixture, A. Ertas oa. Solar Energy, Vol. 49, Nr. 3 1992
- /4/ ASHRAE Handbook, System and Equipment
- /5/ Fundamentals of Heat and Mass Transfer, Incropera Frank P.; DeWitt David P. fifth edition, John Wiley & Sons, 2002
- /6/ Properties of aqueous solutions of lithium and calcium chlorides: Formulations for use in air conditioning equipment design, M. R. Conde, Int. Jour. Thermal Sciences, Vol. 43 p. 367-382, 2004



## Bilag A - Lithiumklorid

I det følgende er vist nogle af egenskaberne for LiCl.

De fysiske egenskaber<sup>1</sup>

Farve: Hvidt

Udseende: krystallinsk faststof

Smeltepunkt: 610 °C

Kogepunkt: 1360 °C, 1383 °C

Densitet: 2070 kg/m<sup>3</sup>

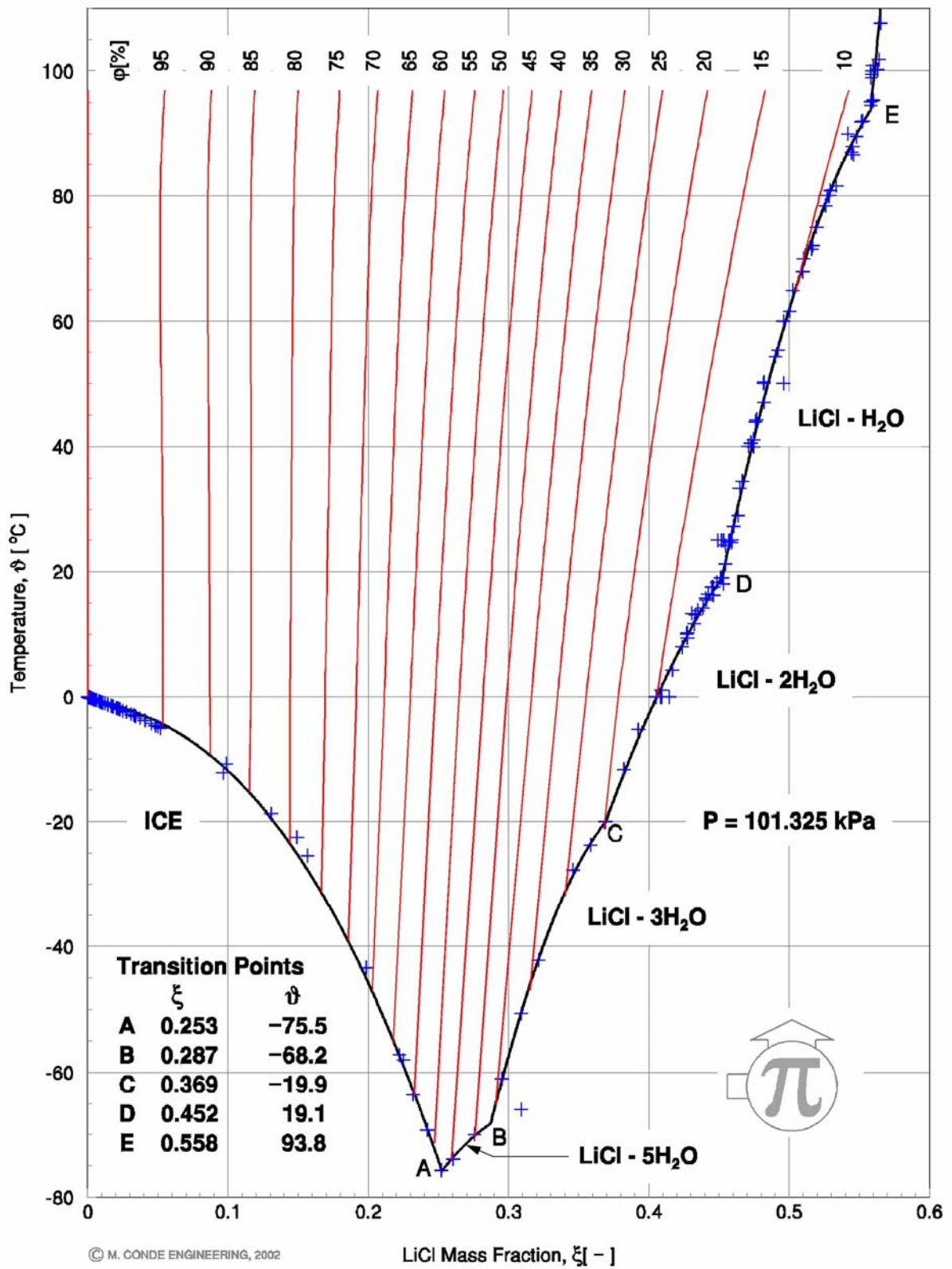
Sammensætningen af LiCl

Element	%
Li	83,63 %
CL	16,37 %

I figur A1 ses et ligevægtsdiagram for LiCl-vand-fugtig luft vist som funktion af koncentration og temperatur. Heraf kan findes koncentrationsgrænser samt ligevægtsfugtigheden af fugtig luft i kontakt med en LiCl-opløsning ved en given koncentration og temperatur.

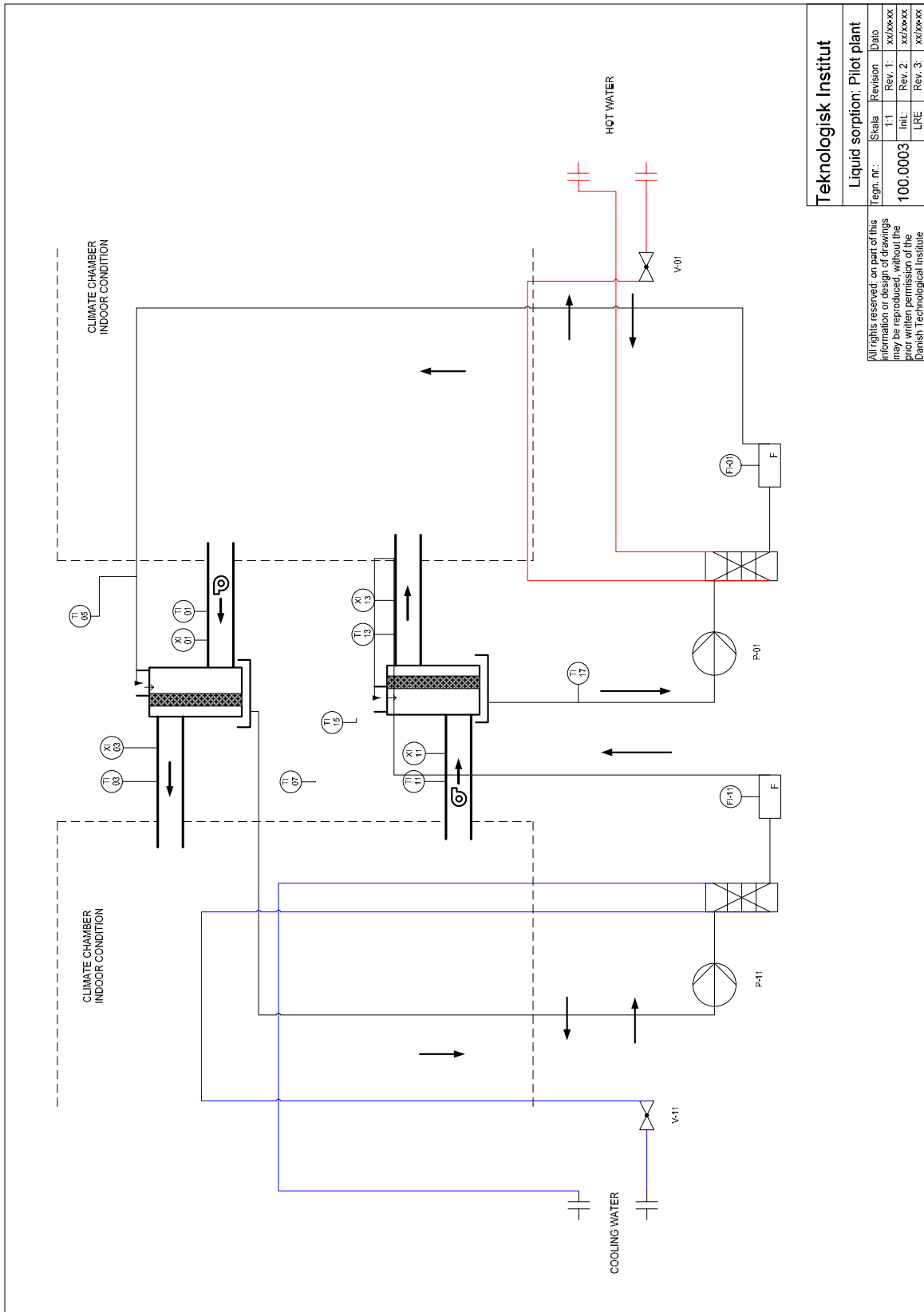
---

<sup>1</sup> [www.webelements.com/webelements/compounds/text/Li/Cl1Li1-7447418.html](http://www.webelements.com/webelements/compounds/text/Li/Cl1Li1-7447418.html) (d.31.05.05).



Figur A1: Ligevægtsdiagram for vandig LiCl-opløsning  $\varphi$  udtrykker den relative fugtighed for luft med samme temperatur som opløsningen. I områderne uden de røde  $\varphi$  linier forefindes hhv. is (området til venstre) og udfældede saltkrystaller (området til højre) /6/.

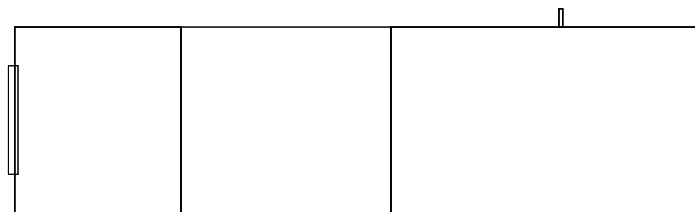
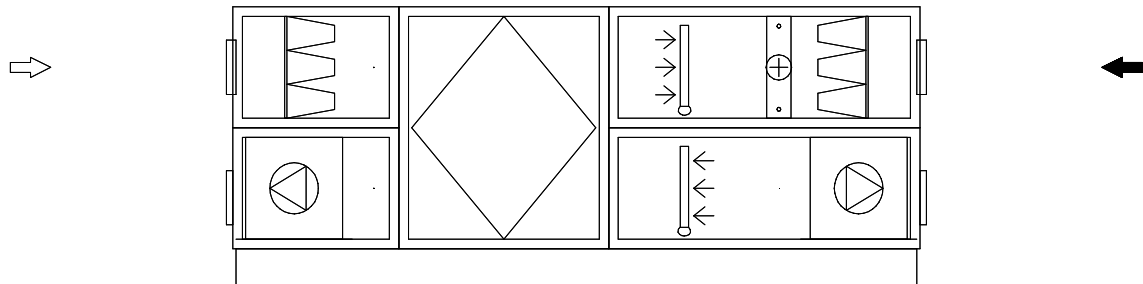
# Bilag B - Diagram over første pilotanlæg



## **Bilag C - Luftkonditioneringsunit NOVENCO ClimasterZCN 9/6**

Kunde  
Reference  
ProduktTeknologisk - Århus  
**Climaster ZCN 9/6**Projekt  
Tilbud/ordre  
Anlæg.  
Vor reference

Sorption fieldtest rev 2

**Climaster Data**

Total højde	1534	mm
Total længde	3791	mm
Bredde	1027	mm
Casing materiale AluZinc		
Uden tag		
Aggregat leveres samlet på bundramme		
Montage og Vedligeholdelsesvejledning på	UK- Engelsk	
Totalvægt for aggregat	947	kg
Udeluft flow retning	Højre	
Forsyningsspænding	3x400	Volt
Forsyningsf frekvens	50	Hz

**Udeluft:****Sektion 5**

IN Indløb  
FG FG Grovfilter  
DA Tomfunktion

**Sektion 2**

EK Krydsvarmevekslerfunktion

**Sektion 3**

HB Befugter  
DA Tomfunktion  
CL pos C Ventilatorfunktion

Luftstrøm 0.55 m3/s  
Ekstern total tryktab, indløb 100 Pa  
Ekstern total tryktab, udløb 100 Pa

**Afkastluft:****Sektion 4**

IN Indløb  
FG FG Grovfilter  
LA Varmefunktion  
HB Befugter

**Sektion 1**

DA Tomfunktion  
CL pos C Ventilatorfunktion

Luftstrøm 0.55 m3/s  
Ekstern total tryktab, indløb 100 Pa  
Ekstern total tryktab, udløb 100 Pa

**Specifik EI forbrug (SEL) for hele aggregatet**

2140 W/m3/s

**Bruger tekst**

Denne er revideret af Bjarne Sørensen - York Novenco  
Revidere 29-05-06



**Sektion 5 Længde 917 mm Højde 667 mm Vægt 94.4 kg Pos Højre**

**Indløb**

**IN**

Udeluft		Luftmængde	0.55 m3/s
Position	Indløb, ende	Lufthastighed	3.1 m/s
		Tryktab	4 Pa
Panel	For kanaltilslutning		
Spjæld	Ikke inkluderet		
Regulering	Ikke inkluderet		
Flexible forbindelse	Ikke inkluderet		
Indløbsbox	Ikke inkluderet		
LS flanger for kanal tilslutning	Ikke inkluderet		
Længde	160 mm	Vægt	23.2 kg

**FG Grovfilter**

**FG**

Udeluft		Luftmængde	0.55 m3/s
Filtertype	F5 Lommefilter		
Ekstrafilter typr	Ingen		
Ekstra filtersæt	0 sæt	Lufthastighed over filter	0.18 m/s
Drypbakke	Ikke inkluderet	Lufthastighed over filter front areal	1.18 m/s
Vandlås	Ikke inkluderet	Tryktab	68 Pa
Inspektionsvindue	Ikke inkluderet	Begyndelsestryktab	25 Pa
Lys, inkl. afbryder (230V)	Ikke inkluderet	Anbefalet sluttryktab	111 Pa
Filtervagt	Ikke inkluderet		
Længde	480 mm	Vægt	38.4 kg

**Tomfunktion**

**DA**

Udeluft		Luftmængde	0.55 m3/s
Inspektionsdør	Ikke inkluderet	Lufthastighed	1.1 m/s
Inspektionsvindue	Ikke inkluderet	Tryktab	1 Pa
Lys, inkl. afbryder (230V)	Ikke inkluderet		
Længde	240 mm	Vægt	13.7 kg

**Sektion 2 Længde 1157 mm Højde 1334 mm Vægt 224.7 kg Pos Højre**

**Krydsvarmevekslerfunktion**

**EK**

Krydsvarmevekslerfunktion EK-Stor, med 2 spjæld og bypass.  
 Forberedt for montage af 2 spjældmotor. Spjældmotor er ekskl.  
 Varmevekslertype HA0600/4.5/E  
 Med aluminiumslameller  
 Med 2 vandlåse  
 Uden dråbeafslagsplade

Specifikation	Udeluft		Afkastluft	
Luftmængde	0.55	m3/s	0.55	m3/s
Tryktab	72	Pa	71	Pa
Virkningsgrad	60	%		
Temp., ind	28.0	°C	21.0	°C
Temp., ud	23.8	°C	25.2	°C
Relativ fugtighed, indløb	10	%	50	%
Relativ fugtighed, udløb	13	%	39	%
Kondensat			0.00	l/h
Kondensattemperatur			-99.0	°C
Overført energi			2.8	kW
Længde	1120 mm	Vægt	186.5 kg	



**Sektion 3 Længde 1717 mm Højde 667 mm Vægt 188.2 kg Pos Højre**

**Befugter**

**HB**

Udeluft		Luftmængde	0.55 m3/s
Direkte vandforsyning		Tryktab	166 Pa
1-trins regulering		Temp., ind	24.0 °C
Befugtertype	FA6-95-090-055-D1-1-R	Temp., ud	11.9 °C
Vandlås	Inkluderet	Relativ fugtighed, indløb	17 %
Dråbeafslagsplade	Inkluderet	Relativ fugtighed, udløb	91 %
Forbundet fra betjeningsside		Lufthastighed	2.3 m/s
		Fugtvirkningsgrad	94 %
		Væskestrøm	7.00 l/min

Længde 800 mm Vægt 61.6 kg

**Tomfunktion**

**DA**

Udeluft		Luftmængde	0.55 m3/s
Inspektionsdør	Ikke inkluderet	Lufthastighed	1.1 m/s
Inspektionsvindue	Ikke inkluderet	Tryktab	1 Pa
Lys, inkl. afbryder (230V)	Ikke inkluderet		

Længde 240 mm Vægt 13.7 kg



**Ventilatorfunktion**

**CL pos C**

Udeluft  
 Luftmængde 0.55 m<sup>3</sup>/s  
 Statisk tryk 547 Pa  
 Totaltryk 577 Pa  
 Ventilator afkastposition Pos C  
 Frit udløb  
 Ventilator type: Bagudkrummede skovle C2LB-225  
 Omdrejningstal 2941 r.p.m  
 Max ventilator omdrejningstal 4500 r.p.m  
 Ventilatorvirkningsgrad 70 %  
 Temp., ind 20.0 °C  
 Temp., ud 20.9 °C  
 Akseleffekt 0.5 kW  
 Totalt lydeffektniveau for afkast Lwt 80.9 dB(A)  
**Motorfabrikat** Leroy Somer

**Motor**  
 Motortype 2P LS 80 L 0.75 kW IM B3 220-240/380-420 V 50 Hz  
 Mærkeeffekt 0.8 kW  
 Motor o/min 2810 r.p.m  
 Drifteffekt motor 0.6 kW  
 Spænding 3x400 Volt  
 Frekvens 50 Hz  
 Strøm 2.9/1.7 amp  
 Virkningsgrad 76 %

Direkte start 1 hastighed  
 Kapslingsklasse  
 Termisk beskyttelse Termistor  
 Vægt, motor 8.2 kg

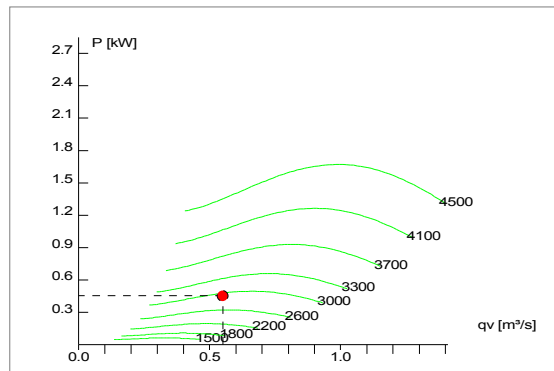
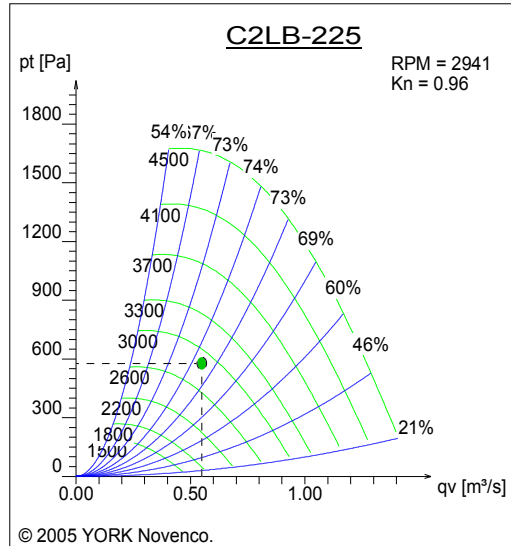
**Remtræk**  
 Remtræk referer til Optibelt produkter  
 Remskive, ventilator -90-1  
 Remskive, motor -95-1  
 Bøsning, ventilator 1210-20  
 Bøsning, motor 1210-19  
 V-rem XPZ 662  
 Antal ekstra remme sæt 0  
 P/Q Specifik Ventilator Effekt, (denne) 1.11 kW/m<sup>3</sup>/s  
 Total virkningsgrad 51.8 %

**Tilbehør**  
 Inspektionsvindue Ikke inkluderet  
 Lys, inkl. afbryder (230V) Ikke inkluderet  
 Sikkerhedsafbryder Ikke inkluderet  
 Luftmængdemåler Ikke inkluderet  
 Beskyttelsesnet i dør Ikke inkluderet  
 Flex-forbindelse Ikke inkluderet  
 Afkasthætte Ikke inkluderet

Middelfrekvens i Hz og lydeffektniveau i dB

	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz	
Indløb	76	79	79	85	79	74	69	61	dB
Udløb	85	80	77	81	73	73	69	63	dB

Længde 640 mm Vægt 93.8 kg



**Sektion 4 Længde 1717 mm Højde 667 mm Vægt 175.2 kg Pos Venstre**

**Indløb**

**IN**

Afkastluft Luftmængde 0.55 m<sup>3</sup>/s  
 Position Indløb, ende Lufthastighed 3.1 m/s  
 Tryktab 4 Pa  
 Panel For kanaltilslutning  
 Spjæld Ikke inkluderet  
 Regulering Ikke inkluderet  
 Flexible forbindelse Ikke inkluderet  
 Indløbsbox Ikke inkluderet  
 LS flanger for kanal tilslutning Ikke inkluderet

Længde 160 mm Vægt 23.2 kg





**FG Grovfilter**

**FG**

Afkastluft		Luftmængde	0.55 m3/s
Filtertype	F5 Lommefilter		
Ekstrafilter typr	Ingen		
Ekstra filtersæt	0 sæt	Lufthastighed over filter	0.18 m/s
Drypbakke	Ikke inkluderet	Lufthastighed over filter front areal	1.18 m/s
Vandlås	Ikke inkluderet	Tryktab	68 Pa
Inspektionsvindue	Ikke inkluderet	Begyndelsestryktab	25 Pa
Lys, inkl. afbryder (230V)	Ikke inkluderet	Anbefalet sluttryktab	111 Pa
Filtervagt	Ikke inkluderet		
Længde	480 mm	Vægt	38.4 kg

**Varmefunktion**

**LA**

Varmeblade	Monteret		
Afkastluft		Luftmængde	0.55 m3/s
Størrelse af varmfunktion	Lille	Temp., ind	10.0 °C
Type		Temp., ud	28.0 °C
HW-EC-2.5-700-480-1R-2-V2-Cu 0.35/Al 0.20		Lufthastighed	1.6 m/s
Lamelafstand	2.5	Tryktab	8 Pa
Antal rørrækker	1 stk	Væsketemp., ind	80.0 °c
Rørtilslutninger i indløb	1/2"	Væsketemp., ud	60.0 °c
Rørtilslutninger i udløb	1/2"	Væsketryktab	5 kPa
Forbundet fra betjeningside		Væskestrøm	0.15 l/s
Studs for dyrkrørsføler(ex.term)	Ikke inkluderet	Væskehastighed	0.61 m/s
KP61 termostat	Ikke inkluderet	Fladens væskevolumen	1.62 l
Vægt coil	13.25 Kg.	Udgangseffekt	12.2 kW
		Væsketype	vand
Længde	240 mm	Vægt	32.9 kg

**Befugter**

**HB**

Afkastluft		Luftmængde	0.55 m3/s
Direkte vandforsyning		Tryktab	166 Pa
1-trins regulering		Temp., ind	28.0 °C
Befugtertype	FA6-95-090-055-D1-1-L	Temp., ud	20.7 °C
Vandlås	Inkluderet	Relativ fugtighed, indløb	50 %
Dråbeafslagsplade	Inkluderet	Relativ fugtighed, udløb	96 %
Forbundet fra betjeningside		Lufthastighed	2.3 m/s
		Fugtvirkningsgrad	94 %
		Væskestrøm	7.00 l/min
Længde	800 mm	Vægt	61.6 kg

**Sektion 1 Længde 917 mm Højde 667 mm Vægt 127.8 kg Pos Venstre**

**Tomfunktion**

**DA**

Afkastluft		Luftmængde	0.55 m3/s
		Lufthastighed	1.1 m/s
Inspektionsdør	Ikke inkluderet	Tryktab	1 Pa
Inspektionsvindue	Ikke inkluderet		
Lys, inkl. afbryder (230V)	Ikke inkluderet		
Længde	240 mm	Vægt	13.7 kg



**Ventilatorfunktion**

**CL pos C**

Afkastluft  
 Luftmængde 0.55 m<sup>3</sup>/s  
 Statisk tryk 518 Pa  
 Totaltryk 548 Pa  
 Ventilator afkastposition Pos C  
 Afkast til kanal  
 Ventilator type: Bagudkrummede skovle C2LB-225  
 Omdrejningstal 2889 r.p.m  
 Max ventilator omdrejningstal 4500 r.p.m  
 Ventilatorvirkningsgrad 70 %  
 Temp., ind 20.0 °C  
 Temp., ud 21.1 °C  
 Akseffekt 0.4 kW  
 Total lydeffektniveau for afkast Lwt 80.6 dB(A)  
**Motorfabrikat** Leroy Somer

**Motor**  
 Motortype 4P LS 80 L 0.55 kW IM B3 230/400 V 50 Hz  
 Mærkeeffekt 0.6 kW  
 Motor o/min 1400 r.p.m  
 Drifteffekt motor 0.7 kW  
 Spænding 3x400 Volt  
 Frekvens 50 Hz  
 Strøm 2.8/1.6 amp  
 Virkningsgrad 67 %

Direkte start 1 hastighed  
 Kapslingsklasse  
 Termisk beskyttelse Termistor  
 Vægt, motor 8.2 kg

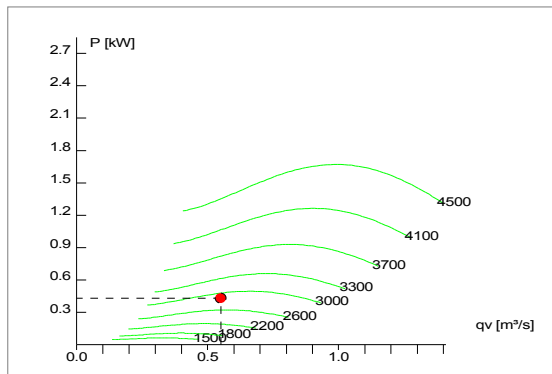
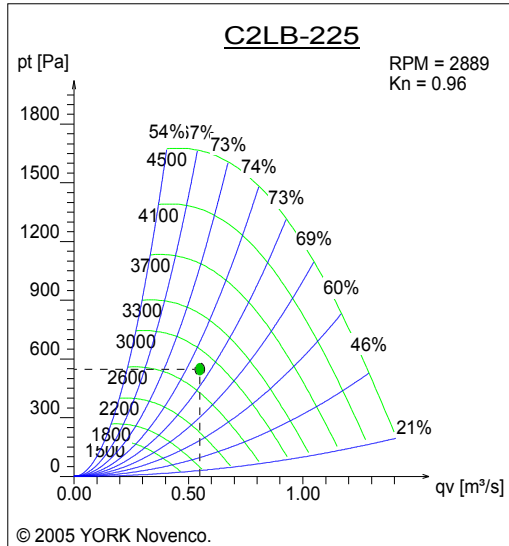
**Remtræk**  
 Remtræk referer til Optibelt produkter  
 Remskive, ventilator -80-1  
 Remskive, motor 160-1  
 Bøsning, ventilator 1210-20  
 Bøsning, motor 1610-19  
 V-rem XPZ 737  
 Antal ekstra remme sæt 0  
 P/Q Specifik Ventilator Effekt,(denne) 1.20 kW/m<sup>3</sup>/s  
 Total virkningsgrad 45.5 %

**Tilbehør**  
 Inspektionsvindue Ikke inkluderet  
 Lys, inkl. afbryder (230V) Ikke inkluderet  
 Sikkerhedsafbryder Ikke inkluderet  
 Luftmængdemåler Ikke inkluderet  
 Beskyttelsesnet i dør Ikke inkluderet  
 Flex-forbindelse Ikke inkluderet  
 Afkasthætte Ikke inkluderet

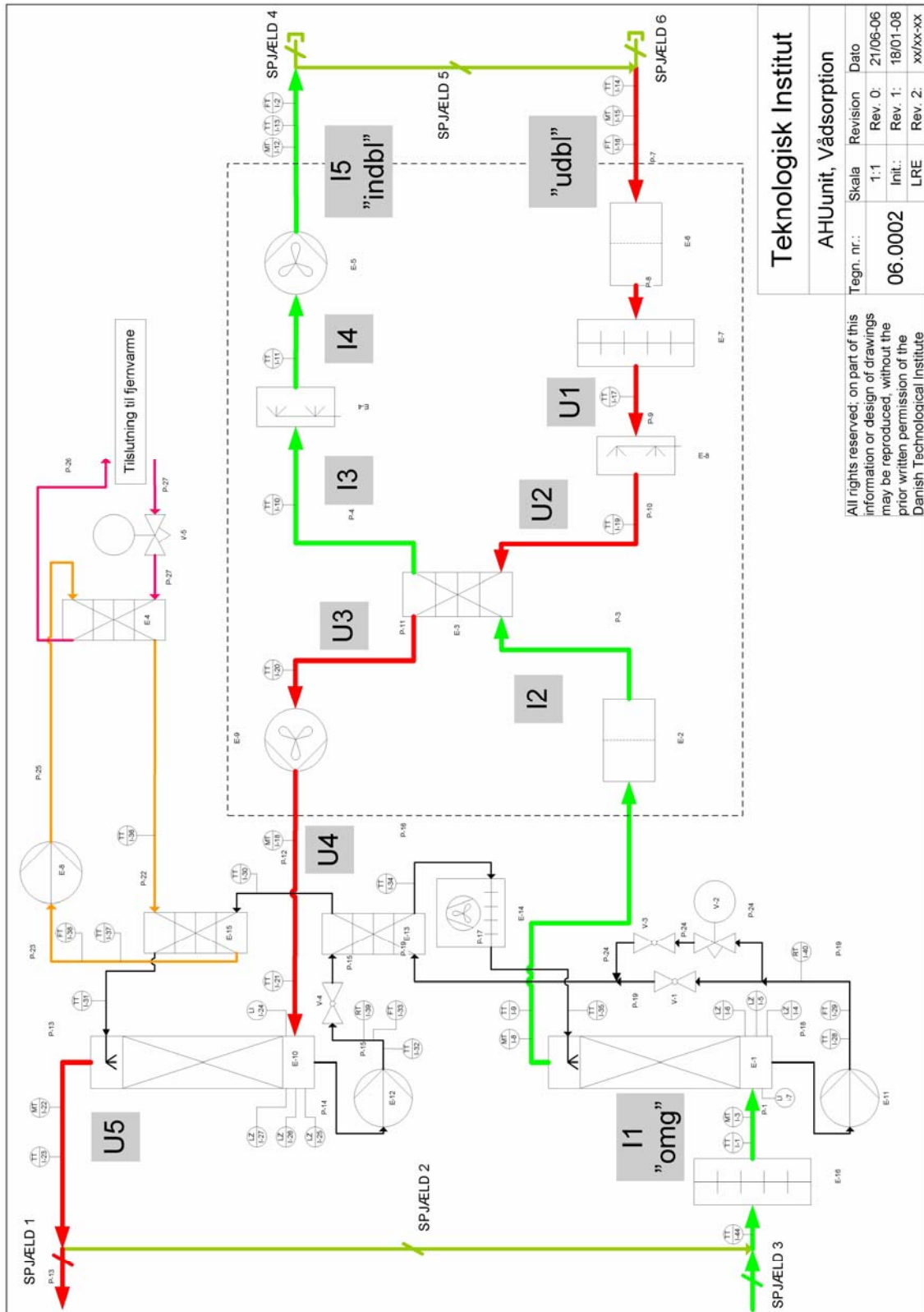
Middelfrekvens i Hz og lydeffektniveau i dB

	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz	
Indløb	75	78	78	84	78	73	68	60	dB
Udløb	84	79	76	80	72	72	68	62	dB

Længde 640 mm Vægt 95.0 kg



# Bilag D - Diagram for demoanlæg i testopstilling



<b>Teknologisk Institut</b>			
<b>AHUunit, Vådsorption</b>			
Tegn. nr.:	Skala	Revision	Dato
<b>06.0002</b>		1:1	21/06-06
		Init.:	Rev. 1: 18/01-08
		LRE	Rev. 2: xx/xx-xx

All rights reserved; on part of this information or design of drawings may be reproduced, without the prior written permission of the Danish Technological Institute

## Bilag E - Parameterstudie

I den del af driftsperioden, hvor der er behov for, at affugterdelen (sorptionsprocessen) er i drift, kan et sorptionsalæg optimeres på tre områder:

- Elforbrug
- Varmeforbrug
- Vandforbrug.

Da el- og varmekonsum praktisk talt er uafhængige, er følgende analyse udelukkende baseret på varmekonsumet.

Hvis ikke andet er nævnt, er studierne gennemført på driftskonditionen:

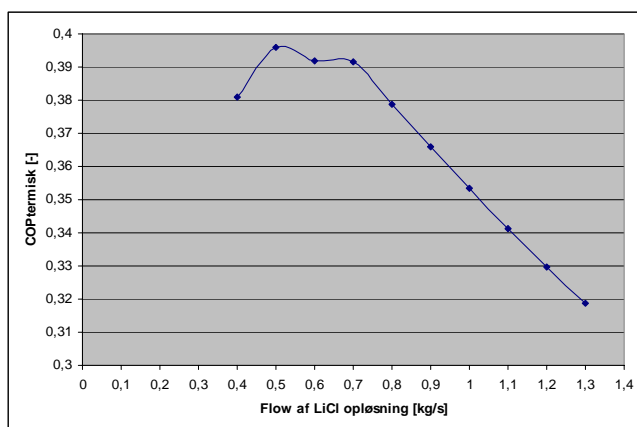
Udendørskondition	26 °C tør/21 °C våd (= 13,6 g vanddamp/kg luft)
Luftflow	2000 m <sup>3</sup> /h (balanceret)
Indblæsningstemp.	16 °C (uden ventilator og tab i kanaler)
Udsugningstemp.	23 °C / 10 g vanddamp/kg luft (= 57%RF)
Flow LiCl-opløsning	0,6 kg/s

### E-1 Sorptionsvæskeflow

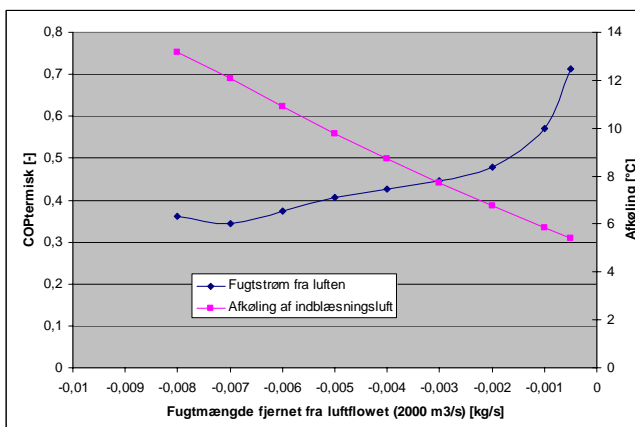
Hvis temperaturen af varmekilden (fjernvarmen) er høj nok, kan sorptionsvæskeflowet sænkes. Figur E-1 viser betydningen for den termiske COP. Det ses, at maks. COP<sub>termisk</sub> opnås ved et flow svarende til luftflowet.

### E-2 Den fjernede fugtmængde

Figur B-2 viser betydningen af den krævede affugtning. Da denne har direkte betydning for indblæsningstemperaturen, er denne også vist i form af afkøling af luften. Det ses, at COP<sub>termisk</sub> ikke afhænger særligt meget af belastningen ved lidt højere afkølinger.



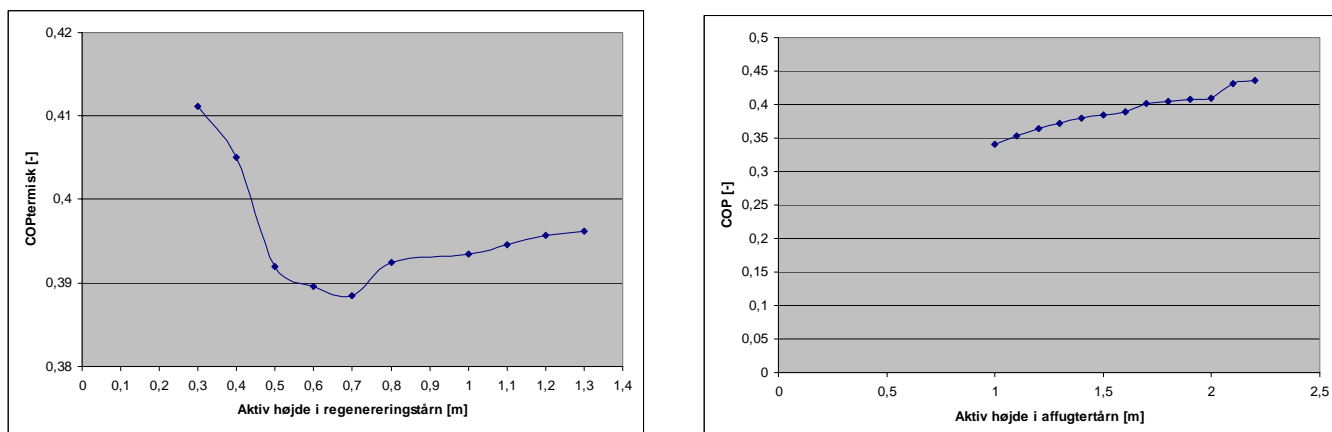
Figur E-1: LiCl-opløsningsflow



Figur E-2: Den fjernede fugtmængde

### E-3 Aktiv højde i luftvaskere (tårne)

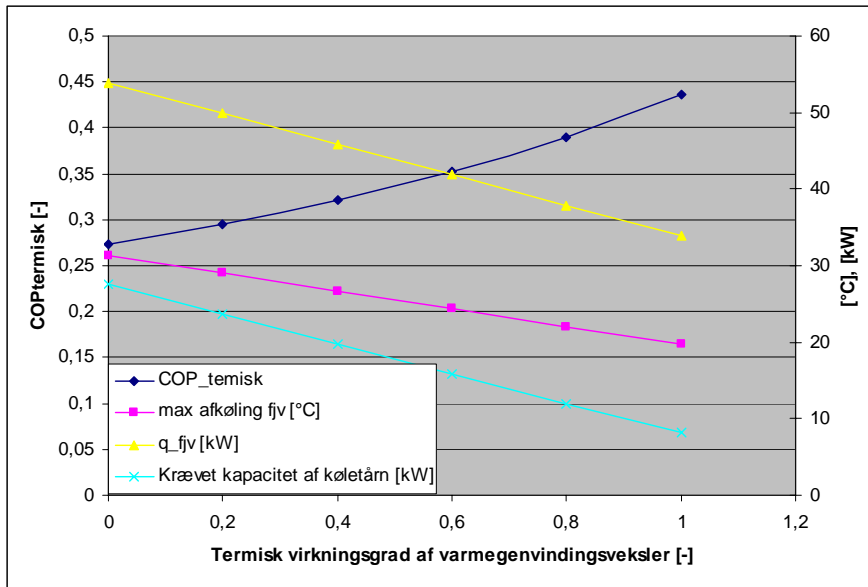
Den aktive højde i luftvaskerne, svarende til højden af laget af fyldlegemer, har betydning for effektiviteten af varme- og masseudvekslingen mellem luft og sorptionsvæske. Betydningen for  $COP_{\text{termisk}}$ , fremgår af figur E-3. Det ses, at den optimale højde ikke er den samme for de to tårne. Det er valgt at anvende 0,6 m i regenereringstårnet og 1,6 m i affugtertårnet.



Figur E-3: Betydningen af en aktiv højde i vandvaskerne for  $COP_{\text{termisk}}$ .

### E-4 Effektivitet af genvindingsvarmeveksler i sorptionskredsen

Varmeveksleren E-13 i diagrammet i bilag D har stor betydning for  $COP_{\text{termisk}}$ , og den effekt, der skal bortskaffes i køleren E-17. Figuren viser også afkølingen af den drivende (fjern-)varme, der stiger fra 10°C ved 100% (teoretisk) veksler-effektivitet til 30°C ved ingen veksler installeret. Effektiviteten af veksleren kan altså anvendes ved optimering af det samlede varmesystem til bedst totalvirkningsgrad: Ved drift med fjernvarme kan der være krav om minimum afkøling af fjernvarmevandet for at opnå god virkningsgrad på (kraft-)varmeanlægget, som kun kan opnås ved at anvende en mindre effektiv varmegenvinding. Det fremgår dog også tydeligt, at varmemængde, der skal fjernes i køletårnet, stiger kraftigt med faldende varmegenvinding.



Figur E-4: Betydning af effektivitet af varmegenvindingsveksleren i sorptionskredsen.

# Bilag F - Datablad over fyldlegemer



Home

**VEREINIGTE FÜLLKÖRPER-FABRIKEN  
GmbH & Co. KG**  
Ihr Spezialist für Füllkörper - Technologie  
und Einbauten



<b>Wir stellen uns vor:</b>	<b>Produkte:</b>	<b>VFF-weltweit:</b>	<b>Kontakt:</b>	<b>Software:</b>	<b>Impressum</b>
-----------------------------	------------------	----------------------	-----------------	------------------	------------------






## FÜLLKÖRPER AUS KUNSTSTOFF

Mit unserem umfassenden Lieferprogramm an Füllkörpertypen und Werkstoffen sowie unserer Erfahrung in thermischen Stofftrennprozessen - wie Absorption, Desorption, Rektifikation u. a. - können wir für nahezu alle Betriebsbedingungen bzw. Gas- / Flüssigkeitszusammensetzungen eine Lösung anbieten.

Auf Wunsch wählen wir für Sie den jeweiligen Aufgabenstellung entsprechenden Füllkörper aus, in einem geeigneten Werkstoff und einer geeigneter Größe.

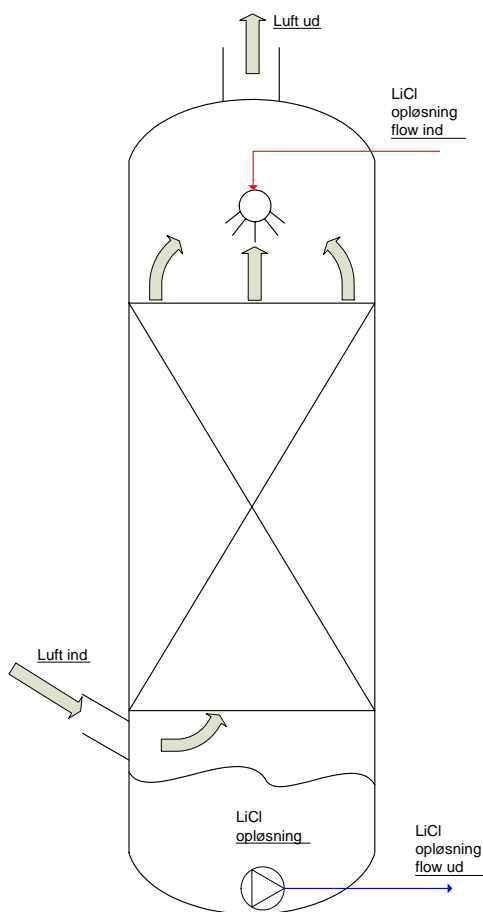
(PE, PP, PVDF u. a.)

Technische Änderungen vorbehalten. Alle Angaben dienen zur Vorinformation. Ansprüche können hieraus nicht abgeleitet werden

Produktbezeichnung		Größe	Gewicht* kg/m <sup>3</sup> (*PP)	Oberfläche m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	Freies Volumen %
<b>Pall®-Ringe</b>		15	80	350	91
		25	80	220	91
		38	60	145	93
		50	45	110	95
		90	60	78	93
<b>VSP</b> (Patent VFF)		25	60	185	93
		50	45	100	95
		90	30	78	97
<b>Hacketten®</b> (Patent)		45	58	135	94
		90	48	128	94
<b>Novalox®-Sattelkörper</b>		1 ½"	80	170	91
		2"	75	120	92
<b>Igel®-Füllkörper</b> (Patent Ciba-Geigy)		40 mm	120	300	87

## Bilag G - Sorptionskreds tårndesign

Tårnene er opbygget således, at luft- og sorptionsvæskeflowet løber i modstrøm. Som det fremgår af Figur G-1 er sorptionspumpen monteret i væskeresservoiret nederst i tårnet. Fyldlegemerne ligger på en glasfiberrist, således at luften frit kan strømme ind under hele arealet.



Figur G-1: Skitse af tårnoprbygning.

For at undgå dannelsen af små dråber ved væsketilførslen blev der fremstillet en for-deler, der blev lagt direkte oven på fyldlegemerne. Som ekstra sikkerhed blev der lagt ca. 10 cm fyldlegemer oven på fordeleren. Systemet er vist i figur G-2.



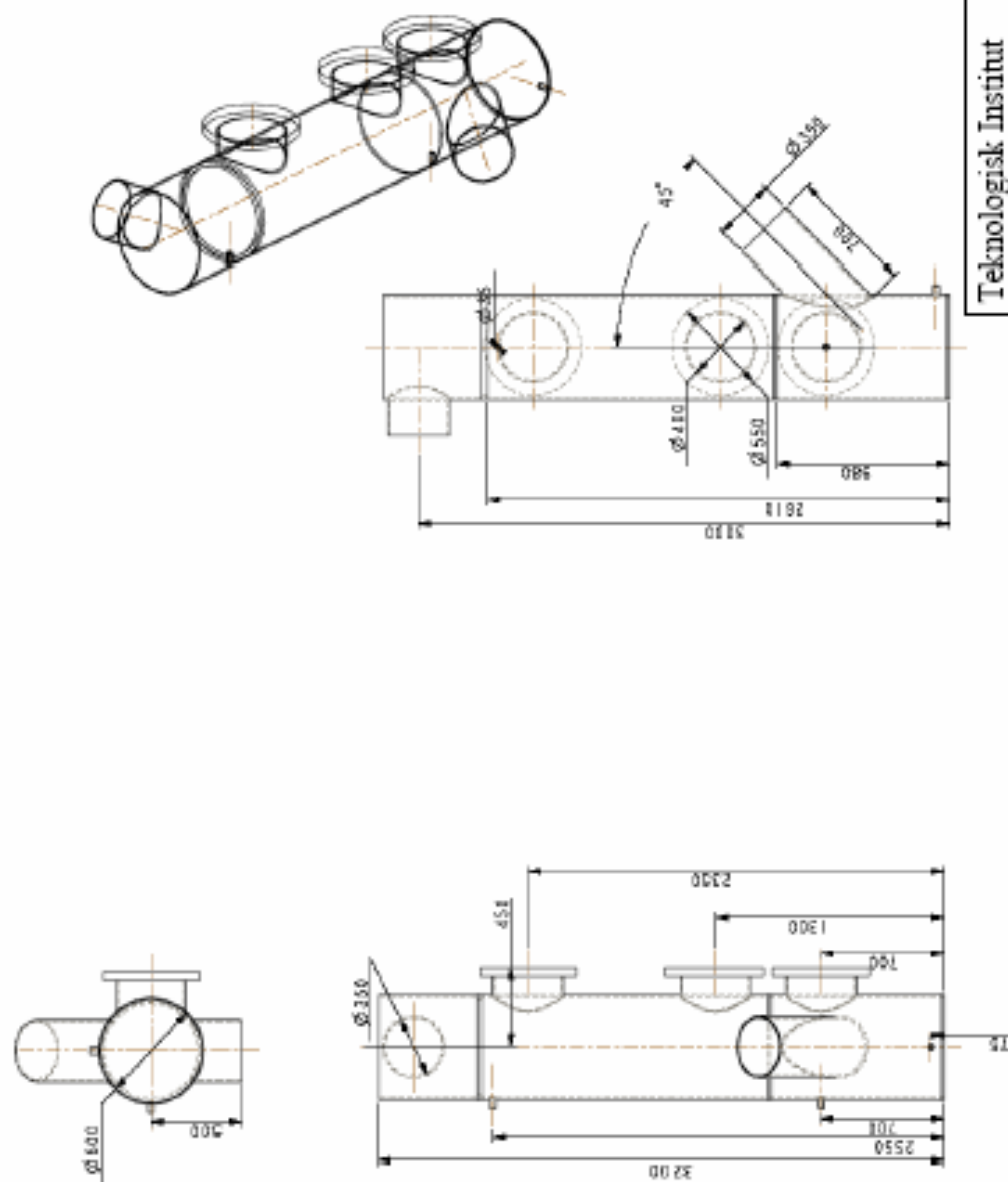


*Figur G-2: Væskefordeler monteret i toppen af tårn, delvist dækket af fyldlegemer.*

Selve tårnet fremgår af figur G-3 og tegningen i figur G-4. Hele tårnet er fremstillet af PP (polypropylen). De to tårne er identiske på nær tilgangsstuds for luft (45° studs nederst), der af opstillingsmæssige årsager er spejlvendt. Som det ses af figur G-3, er toppen ændret i forhold til tegningen i figur G-4.



*Figur G-3: Luftvaskertårnene.*



Teknologisk Institut  
Affugteråm  
SKITSE

Lars Reinholdt  
15. juni 2006

Figur G-4: Tårntegning.