



## Udvikling af værktøj til implementering af energiøkonomiske køleanlæg med naturlige kølemidler

Del 1: Opstilling og beregning af årsenergiforbrug

**Elfor PSO 2002**

**Forskning og Udvikling indenfor effektiv elanvendelse. Projektnummer: 334-02**

Februar 2006

P R O J E K T E T E R U D A R B E J D E T A F :

Seas EnergiService A/S

Danfoss & Danfoss Solutions A/S

SuperKøl A/S

COOP Danmark

AKB

KKO

Instituttet for Produktudvikling / Køle- og energiteknik

Teknologisk Institut / Køle- og varmepumpeteknik

Birch & Krogboe A/S





## Udvikling af værktøj til implementering af energiøkonomiske køleanlæg med naturlige kølemidler

Del 1: Opstilling og beregning af årsenergiforbrug

**Elfor PSO 2002**

**Forskning og Udvikling indenfor effektiv elanvendelse. Projektnummer: 334-02**

Februar 2006

Revision : E  
Revisionsdato: 17. februar 2006  
Sagsnr. : 17955/001  
Projektleder : Martin L. Jensen  
Udarbejdet af : MLJ/mlj  
Godkendt af : -

## Indholdsfortegnelse

<b>RESUME.....</b>	<b>4</b>
<b>1 INDLEDNING.....</b>	<b>7</b>
1.1 PROJEKTFORMÅL.....	7
1.2 BAGGRUND FOR PROJEKTET.....	7
1.3 PROJEKTINDHOLD.....	9
1.3.1 Opfølgning på og evaluering af installerede ”test”-anlæg.....	9
1.3.2 Analyse af energiforhold for disse anlægstyper.....	9
1.3.3 Rapportering om projektresultat.....	9
<b>2 ANLÆGSTYPER OG FORVENTET UDBREDELSE PÅ MARKEDET.....</b>	<b>10</b>
2.1 FREMTIDENS ANLÆGSTYPER OG UDBREDELSE.....	10
2.2 ANLÆGSTYPER DER PÅTÆNKES ANVENDT I KØLEVÆRKTØJET.....	11
<b>3 BESKRIVELSE AF UNDERSØGTE ANLÆG.....</b>	<b>14</b>
3.1 SUPERMARKEDSANLÆG.....	14
3.1.1 Beskrivelse af parallelanlæg med R404A som kølemiddel.....	14
3.1.2 Beskrivelse af kaskadeanlæg.....	18
3.2 LUFTKONDITIONERINGSANLÆG.....	19
3.2.1 Beskrivelse af anlæg.....	19
3.2.2 Beskrivelse af matematisk model.....	20
<b>4 MÅLT ENERGIFORBRUG.....</b>	<b>23</b>
4.1 MÅLEDATA PÅ PARALLELANLÆG.....	23
4.2 MÅLEDATA PÅ KASKADEANLÆG 1+2.....	23
4.3 MÅLEDATA PÅ LUFTKONDITIONERINGSANLÆG.....	24
<b>5 SIMULERET ENERGIFORBRUG.....</b>	<b>26</b>
5.1 SIMULERET ÅRSENERGIFORBRUG PÅ PARALLELANLÆGGET.....	26
5.2 SIMULERET ÅRSENERGIFORBRUG PÅ KASKADEANLÆGGENE.....	27
5.3 SIMULERET ÅRSENERGIFORBRUG PÅ LUFTKONDITIONERINGSANLÆG.....	29
<b>6 ANALYSE AF KOMPRESSOREFFEKTIVITETER.....</b>	<b>32</b>
6.1 FORMÅL OG METODE.....	32
6.2 KOMPRESSORTYPER.....	32
6.3 DATA OG DATABEHANDLING.....	34
6.4 KOMPRESSORRESULTATER.....	35
<b>7 ANBEFALINGER TIL EVENTUELT VIDERE ARBEJDE MED DEL 2 I PROJEKTET.....</b>	<b>38</b>

7.1	SIMULERINGER PÅ SUPERMARKEDSANLÆG.....	38
7.2	SIMULERINGER PÅ LUFTKONDITIONERINGSANLÆG.....	39
7.3	ESTIMERING AF KOMPRESSORERS YDEEVNE OG EFFEKTIVITET .....	40
7.4	ANVENDELSE AF PROGRAMMET EES .....	40
<b>8</b>	<b>KONKLUSION .....</b>	<b>41</b>
<b>9</b>	<b>REFERENCER .....</b>	<b>43</b>
<b>BILAG 1: SPECIFIKATION AF PC-BASERET-VÆRKTØJ.....</b>		<b>44</b>
B.1.1	GENERELT OM VÆRKTØJET .....	44
<i>B.1.1.1</i>	<i>Medie .....</i>	<i>44</i>
<i>B.1.1.2</i>	<i>Programmeringssprog, mm .....</i>	<i>44</i>
<i>B.1.1.3</i>	<i>Brugerflade .....</i>	<i>44</i>
<i>B.1.1.3</i>	<i>Udskrift .....</i>	<i>45</i>
B.1.2	OVERORDNET OPBYGNING AF PC-VÆRKTØJ .....	45
<i>B.1.2.1</i>	<i>Kuldeydelse med døgn- og årsprofiler.....</i>	<i>45</i>
<i>B.1.2.2</i>	<i>Det varmeoptagende medies årsprofil .....</i>	<i>45</i>
<i>B.1.2.3</i>	<i>Kølesystemets udformning .....</i>	<i>45</i>
<i>B.1.2.4</i>	<i>Beregning af årsenergiforbrug .....</i>	<i>46</i>
<i>B.1.2.5</i>	<i>Beregning af årsøkonomi.....</i>	<i>46</i>
B.1.3	DATABASER, DEFAULT-VÆRDIER .....	46
<i>B.1.3.1</i>	<i>Typiske døgn- og årsprofiler for kuldebelastninger.....</i>	<i>46</i>
<i>B.1.3.2</i>	<i>Det varmeoptagende medies årsprofil .....</i>	<i>47</i>
<i>B.1.3.3</i>	<i>Kølesystemets udformning .....</i>	<i>47</i>
B.1.4	PROGRAMSTRUKTUR.....	48
<i>B.1.4.1</i>	<i>Trin 1: Valg af anlægsgrundtype .....</i>	<i>48</i>
<i>B.1.4.2</i>	<i>Trin 2: Fastlæggelse af hovedlayout.....</i>	<i>49</i>
<i>B.1.4.3</i>	<i>Trin 3: Data for enkeltkomponenter .....</i>	<i>51</i>
 <b>BILAG 2: EKSEMPLER PÅ BRUGERFLADER PÅ PC-VÆRKTØJ.....</b>		<b>56</b>
BILAG 2.1. BRUGERFLADEN FRA ÉT AF KKO-PROGRAMMERNE .....		56
BILAG 2.2. FORSLAG TIL OUTPUT-BILLEDE 1 FOR PC-VÆRKTØJ.....		57
BILAG 2.3. FORSLAG TIL OUTPUT-BILLEDE 2 FOR PC-VÆRKTØJ.....		58
BILAG 2.4. FORSLAG TIL INPUT-BILLEDE 1 FOR PC-VÆRKTØJ .....		59
BILAG 2.5. FORSLAG TIL INPUT-BILLEDE 2 FOR PC-VÆRKTØJ .....		60
 <b>BILAG 3: REGRESSIONSPLOT FOR KOMPRESSORER.....</b>		<b>61</b>

## Resume

Denne rapport dokumenterer de resultater der er opnået gennem projektet "Udvikling af værktøj til implementering af energiøkonomiske køleanlæg med naturlige kølemidler. Del 1: Opstilling og beregning af årsenergiforbrug". Projektet er gennemført under Elfor PSO ordningen i 2002, hvor en stor del af projektf finansieringen er opnået. Den resterende andel er sket gennem egenfinansiering fra samtlige af de medvirkende projektparter.

Rapporten henvender sig primært til bevillingsgiverne, da resultaterne af denne undersøgelse alene lægger op til en anbefaling omkring det videre arbejde.

Formålet med udarbejdelse af et værktøj er, på simpel vis, at sammenligne økonomien for alternative udformninger af køleanlæg med hinanden, når både investerings- og driftsomkostningerne over anlæggets levetid tages med i betragtning. Værktøjet skal således anvendes til at give en køber af et køleanlæg en mulighed for at vælge det mest energiøkonomiske anlæg, og dermed udbrede de mest energiøkonomiske anlæg i forbindelse med udskiftningen af anlæg der vil ske grundet udfasningen af CFC/HCFC/HFC kølemidler.

Projektet er blevet opdelt i 2 faser, hvor den første fase - denne fase - indeholder udviklings-elementerne til værktøjet, mens fase 2 indeholder selve udviklingen af værktøjet.

Rapportens kapitel 1 er en indledning til projektet. Heri indgår såvel baggrunden for projektet samt projektets indhold.

Kapitel 2 indeholder en beskrivelse af, hvilke forventninger der foreligger p.t. til fremtidens køleanlæg. Forventningerne bygger dels på nuværende og kommende lovgivning, dels på den aktuelle udvikling samt viden om udviklingen på kort sigt og dels erfaringer høstet i Sverige, hvor anvendelsen af indirekte anlæg har langt større udbredelse end i Danmark. På basis af disse forventninger er der opstillet en række overordnede krav til, hvilke funktionaliteter et PC baseret værktøj bør indeholde. Dette er suppleret med eksempler på designbeskrivelse og skærbilleder i hhv. bilag 1 og 2. Disse beskrivelser er lagt til grund for udviklingen af prototypeværktøjet der er anvendt til at simulere årsenergiforbrug på supermarkeder.

Kapitel 3 indeholder en kort beskrivelse af de anlægstyper der er foretaget målinger og simuleringer på, mens kapitel 4 indeholder en kort oversigt over måleresultaterne.

I kapitel 5 gennemgås resultaterne af simuleringerne sammenholdt med målingerne hhv. på supermarkedsanlæggene og luftkonditioneringsanlægget. Resultaterne viser en meget god overensstemmelse mellem simuleringer og målinger på supermarkedsanlæg, og en relativ dårlig overensstemmelse på luftkonditioneringsanlæg.

Kapitel 6 indeholder en redegørelse over modeller for kompressoreffektiviteter som funktion af en række forskellige parametre. Konklusionen er, at det er relativt simpelt at opstille korrelationer for kompressorernes effektivitet ved fuldlast, mens det i et fremtidigt værktøj vil være nødvendigt også at opstille eller opnå korrelationer for kompressorernes effektivitet ved delast.

Kapitel 7 er anbefalingerne omkring det videre arbejde. Disse anbefalinger kan kort gengives i følgende punkter:

- Det anbefales, på basis af de opnåede erfaringer, at der arbejdes videre med et nyt projekt, der har til formål at lave et simuleringsprogram til beregning af årsenergiforbrug, besparelser ved energimæssige tiltag, tilbagebetalingstider, anlæggets levetidsomkostninger, mv.
- En prototype til et sådanne værktøj er udviklet i dette arbejde til supermarkeder, og der kan relativt simpelt bygges videre på disse tankegange i et nyt projekt.
- En prototype er ligeledes lavet til luftkonditioneringsanlæg, men det kræver en del videreudvikling for at kunne anvendes af en typisk bruger. Dette vil dog relativt enkelt kunne foretages, med en række begrænsninger.
- Prototypeværktøjet er udarbejdet i programmeringssproget EES. Dette har givet en række problemer, der ikke umiddelbart synes at kunne løses gennem anvendelse af EES alene. Et fremtidigt værktøj vil derfor, sandsynligvis med fordel, bestå af en kombination af edb-programmer, hvor selve beregningerne foretages i EES, mens brugerflader og øvrige visuelle I/O-grænseflader opbygges i et databasebaseret programmel.

Kapitel 8 er konklusionen på projektet. Disse konklusioner er opdelt i emner. De overordnede konklusioner omkring fremtidige anlægstyper er følgende:

- Anvendelsen af anlæg med HFC kølemidler er i Danmark på vej ud – dels grundet lovgivning og dels grundet udvikling af anlæg med naturlige kølemidler. På mindre anlæg, vil man dog stadig se anvendelsen af HFC, men fyldningen i anlæggene vil være begrænset.
- Systemer bestående af en "primær køleunit" med en begrænset kølemiddelmængde (evt. HC'er eller HFC'ere), hvor der varmeveksles til "den varme og den kolde side". I disse anlæg vil varmevekslerne primært være kompakte pladevarmevekslere. Som energibærere på den varme side, vil (frostsikret) vand i forbindelse med en tørkøler være dominerende. Energibæreren på den kolde side kan både være traditionelt frostsikret vand som propylenglykol og faseskiftende medier som binær is og CO<sub>2</sub>. Sidstnævntes udbredelse er stærkt stigende indenfor køleanlæg til supermarkeder. Der syntes ikke at være noget gennembrud på vej for anvendelse af binær is i den nærmeste fremtid i Danmark.
- For lavtemperatursystemer (frost  $\approx$  - 30 °C) vil kaskadesystemer, hvor der er CO<sub>2</sub> på lavtryksdelen få stigende udbredelse.

- Anvendelsen af elektroniske komponenter vil øges, typisk ved fjernovervågning af anlæg, frekvensomformerstyring af komponenter. Anvendelsen af systemer til intelligent styring af køleanlæggene vil øges.

De overordnede konklusioner omkring målinger og simuleringer er følgende:

- Der er foretaget målinger på 3 køleanlæg til supermarkeder. Køleanlæggene er udvalgt således, at de dækker over forskellige anlægstyper og størrelser som man forventeligvis vil se i fremtiden.
- Der er reelt foretaget målinger på 1 luftkonditioneringsanlæg, idet de målinger på det andet anlæg var desværre begrænset af fejl i loggeudstyret.
- Det er muligt, på relativ simpel vis, at beregne årsenergiforbruget på et køleanlæg til supermarkeder med en rimelig grad af nøjagtighed. Nøjagtigheden af beregningen afhænger primært af brugerens input – og dermed tidsforbrug. I de fleste tilfælde vil en meget nøjagtig beregning ikke være nødvendig, og tidsforbruget til at angive det ønskede input derfor ikke så stort. Den relative nøjagtighed af konsekvenserne ved at foretage forskellige besparelsetiltag er langt større – og sandsynligvis mere interessant.
- Den største beregningsmæssige usikkerhed ved beregning på supermarkeder består i beregning af kompressorens eller kompressorernes effektivitet ved forskellige delast-situationer, hvilket der bør arbejdes videre med at få minimeret.
- Det er relativt simpelt at opbygge en generel model for luftkonditioneringsanlæg. Simuleringsresultaterne viste imidlertid, at være ekstremt følsomme overfor selv mindre ændringer i temperatur og fugt SAMT belastningsdata fra kontoret. Reelle belastningsdata er i øvrigt næppe tilgængeligt for særlig mange kontorer, og simuleringsværktøjet vil derfor primært have nytte i forbindelse med optimering af styrestrategi, eksempelvis anvendelse af den mest optimale luftmængde.
- En metode til at minimere ovenstående forhold kunne være at definere en slags "gradkøledage", hvor et energiforbrug til luftkonditionering blev korrigeret for forskelle i temperatur i årets timer.
- Typisk er forbruget til aktiv køling til luftkonditionering i øvrigt langt mindre end forbruget til nedkøling af serverrum, også selvom muligheden for frikøling er til stede. Det faktum, at elforbruget til ventilation er langt større end elforbruget til luftkonditionering forstærkes blot behovet for at anvende et simuleringsværktøj til at optimere forholdet mellem ventilation og køling.

## 1 Indledning

### 1.1 Projektformål

Dette projekt er det ene af to projekter der blev bevilliget af Elfor's F&U midler år 2002, omhandlende "Fremtidens Energirigtige Køleanlæg". Nærværende rapportering omhandler projektet "Udvikling af værktøj til implementering af energioekonomiske køleanlæg med naturlige kølemidler", mens det andet projekt omhandler energirigtigt design af indirekte kølesystemer – i daglig tale benævnt DESIK.

Projektets formål er, at forsøge at opstille et værktøj til, på simpel vis, at sammenligne omkostningerne for alternative anlægs løsninger med hinanden, når både anlægs- og driftsomkostninger medtages. Målet er således at skabe et virkningsfuldt redskab til køber, installatør og rådgiver i tilbuds-, design- og beslutningsfasen.

Der findes imidlertid ingen standardiseret metode til at foretage beregninger af energiforbruget på et køleanlæg på et givent tidspunkt, og derefter opskalere dette forbrug til et års energiforbrug. Dette er ikke nogen triviell proces, og udfaldet af dette kunne på ansøgningstidspunktet ikke umiddelbart fastslås.

Projektet er derfor opdelt i to dele, hvoraf denne rapportering indeholder resultatet af første del, som består i udviklingsarbejdet med at opstille og beregne årsenergiforbruget. På baggrund af resultaterne af dette arbejde, foretages en anbefaling af det videre arbejde med del 2, dvs. udvikling af selve værktøjet, kurser, etc.

### 1.2 Baggrund for projektet

Ved energibesparende tiltag på eksisterende installationer stiller kunden ofte krav om simple tilbagebetalingstider på 1-2-3 år.

Denne problematik er for nærværende specielt relevant, idet antallet af nyanlæg vil stige grundet de lovmæssige tiltag omkring anvendelse af naturlige kølemidler. Herunder vil specielt anvendelsen af anlæg med sekundær kredse blive anvendt grundet lovgivningen om, at anlæg med begrænset fyldning af HFC stadig må anvendes. Det forventes dog, at udfasningen af ældre anlæg med CFC/HCFC/HFC kølemidler fremmes af følgende elementer:

- Den adfærdsregulerende afgift på kølemidler (130,- kr./kg R134a og 326,- kr./kg R404A) vil fremme anvendelsen af de afgiftsfrie naturlige kølemidler.
- Der er opnået gode resultater med HC kølemidler i husholdningsunits.
- Stor miljøbevidsthed i kølebranchen.
- Udlandets stigende forståelse og interesse for naturlige kølemidler.



På trods af, at der gennem lang tid har været talt og skrevet om anlæg med kulbrinter, er der på nuværende tidspunkt kun høstet ganske få driftserfaringer med anvendelsen af de "nye" naturlige kølemidler, idet der endnu ikke er installeret ret mange af disse anlæg.

Det er vigtigt for fremtidige anlæg med naturlige kølemidler, at der foretages en opfølgning på og evaluering af de installerede "test"-anlægs driftsproblemer og energieffektivitet, og at man deraf uddrager relevante konklusioner og erfaringer for derigennem sikre at viden udvides om mest energioekonomiske anlægsdesign.

Udbredelsen af energirigtig teknologi og energirigtige anlægs løsninger afhænger dog i meget høj grad af, om kunden kan overbevises om, at økonomien ved at anvende en energirigtig løsning er fornuftig. Der eksisterer i dag ikke et simpelt værktøj, der hurtigt og enkelt kan sammenligne alternative anlægs løsninger med hinanden, når både investerings- og driftsomkostningerne over anlæggets levetid tages med i betragtning.

Den største kendte barriere for gennemførelse af energioekonomisk optimering på såvel eksisterende som nye køleinstallationer er at kunderne i næsten alle tilfælde udvælger det tilbud på anlæg, der har den laveste anskaffelsespris uden hensyntagen eller kendskab til konsekvenserne mht. driftsomkostningerne, herunder energiforbruget. Således lyder den samstemmende melding fra medlemmer af Kølebranchens Kvalitetssikringsordning, udførende kølefirmaer og energirådgivere.

Den vigtigste årsag til dette er, efter alt at dømme, at kunden oftest ikke har nogen køleteknisk indsigt og derfor kun kan forholde sig til tilbuddenes anskaffelsespris – i forventning om at tilbuddene køleteknisk er i orden og ligeværdige. Det gælder især mindre køleinstallationer, hvor der kun i sjældne tilfælde er rådgivere involveret, fordi omkostningerne herved er uforholdsmæssig store, men det gælder også for store installationer.

I langt de fleste tilfælde er tilbuddene ikke forsynet med oplysninger om energiforbrug og de dermed forbundne driftsomkostninger. Typisk oplyses kun om anlæggets kuldeydelse og optagne kompressoreffekt i et valgt dimensioneringspunkt.

Det er vanskeligt og tidsmæssigt krævende for en rådgiver eller et udførende kølefirma at foretage en beregning af et absolut niveau for køleanlæggs årsenergiforbrug som man kan "garantere" overfor en kunde, bl.a. fordi belastningsprofil og årsvariationer i udelufttemperaturer varierer meget fra år til år. Dette er således hidtil blevet gjort på hver sin forsimplede metode.

Der er derfor stort behov for udvikling af et beregningsværktøj til hurtig og enkel energioekonomisk dimensionering og optimering af køleinstallationer, hvor resultatet umiddelbart kan forstås af en køleteknisk ukyndig person.

### 1.3 Projektindhold

Nærværende projekt har indeholdt følgende 3 hovedelementer:

1. Opfølgning på- og evaluering af installerede "test"-anlæg.
2. Analyse af energiforhold for disse anlægstyper.
3. Rapportering om projektresultat.

#### 1.3.1 Opfølgning på og evaluering af installerede "test"-anlæg

Denne fase er gennemført dels med henblik på at fastlægge, hvilke anlægstyper som beregningsværktøjet skal kunne håndtere og dels for at opnå erfaring for, hvorledes energiforbruget fordeler sig og varierer med last og årstidsvariation. Det sidste skal anvendes således, at det bliver muligt at opskalere energiforbrug for et givent anlæg.

Kortlægningen af driftsforhold og energiforhold foretages gennem målinger på anlæggene. Der var planlagt foretaget målinger på 5 forskellige typer af anlæg, 3 supermarkedsanlæg og 2 luftkonditioneringsanlæg. Af flere forskellige årsager blev der dog kun målt på 1 luftkonditioneringsanlæg. Resultatet af denne fase er gennemgået i kapitel 2 og kapitel 3.

#### 1.3.2 Analyse af energiforhold for disse anlægstyper

I denne fase er de foretagne simuleringer sammenholdt med måledata. Formålet med denne øvelse er, at sammenholde de teoretiske betragtninger med de praktiske erfaringer. Resultaterne af dette arbejde fremgår af kapitel 4 og kapitel 5.

#### 1.3.3 Rapportering om projektresultat

Resultatet af denne fase er denne rapport. Rapportens hovedelementer er:

- Valg af anlægstyper og deres forventede udbredelse på markedet.
- Måledata samt analyse heraf.
- Angivelse af formler til beregning af årsenergiforbrug.
- Beregnet årsenergiforbrug kontra reelt årsenergiforbrug.
- Anbefalinger til eventuelt videre arbejde med fase 2 i projektet.

Rapporteringen har dels til formål at vise resultaterne af udviklingsarbejdet og dels at danne beslutningsgrundlag for om projektets dels 2 anbefales iværksat.

## 2 Anlægstyper og forventet udbredelse på markedet

### 2.1 Fremtidens anlægstyper og udbredelse

De seneste ca. 15 år har været præget af store ændringer indenfor traditionel køleteknologi. Følgende omstændigheder har drevet denne udvikling:

- CFC<sup>1</sup> kølemidler (eksempelvis R12) er blevet forbudt at anvende pga. dets evne til nedbrydning af ozonlaget i stratosfæren
- HFC<sup>2</sup> kølemidler (eksempelvis R134a), som i hvert tilfælde delvist og midlertidigt erstatter CFC'er, er i Danmark og andre lande "på vej ud" dels pga. dets drivhuseffekt dels fordi her er tale om et nyt syntetisk fremstillet stof, som måske på lang sigt har andre uheldige virkninger på miljøet
- Naturligt forekommende kølemidler særligt Kulbrinter (HC'er, eksempel R290 Propan) og Kuldioxid (CO<sub>2</sub>) benyttes i stigende omfang, dels pga. problemerne med CFC'er og HFC'er og dels fordi disse stoffer faktisk er gode kølemidler. De har dog nogle egenskaber, som giver tekniske udfordringer (brandfare for HC'er og det relativt høje tryk for CO<sub>2</sub>)
- Der er fastholdt fokus på energieffektivisering, dels fordi det er samfundsmæssigt nødvendigt og dels fordi den tekniske udvikling giver nye muligheder herunder anvendelse af mere avancerede systemstyring og overvågning.

De nævnte forhold gør, at de anlægstyper som der i dag er gængse, ikke nødvendigvis også er dem, der anvendes i en overskuelig fremtid (indenfor næste 0-20 år) ved nyanlæg.

Som følge af lovgivningsændringer – ikke mindst i EU - vil fremtidens anlæg i Danmark primært benytte naturlige kølemidler. Dette har været tilfældet i Sverige i en række år, og skal man tro på, at den samme udvikling finder sted i Danmark, vil følgende anlægstyper sandsynligvis få en dominerende udbredelse ved nyanlæg:

1. Systemer bestående af en "primær køleunit" med en begrænset kølemiddelmængde (evt. HC'er), hvor der varmeveksles til "den varme og den kolde side". I disse anlæg vil varmevekslerne primært være kompakte pladevarmevekslere. Som energibærer på den varme side, vil (frostsikret) vand i forbindelse med en tørkøler være dominerende. Åbne vandsystemer (køletårne etc.) får mindre udbredelse dels fordi vand ikke længere er så billigt, dels pga. stigende krav til vedligehold
2. Energibæreren på den kolde side kan både være traditionelt frostsikret vand som propylenglykol og faseskiftende medier som binær is og CO<sub>2</sub>. Sidstnævntes udbredelse er stærkt stigende indenfor køleanlæg til supermarkeder. Der syntes ikke at være noget gennembrud på vej for anvendelse af binær is i den nærmeste fremtid i Danmark

---

<sup>1</sup> Indeholder Klor, Fluor og Kulstof. Det er Klor som bevirker nedbrydning af Ozon.

<sup>2</sup> Indeholder Brint, Fluor og Kulstof.

3. For lavtemperatursystemer (frost  $\approx -30$  °C) vil kaskadesystemer, hvor der er CO<sub>2</sub> på lavtryksdelen få stigende udbredelse
4. Til industrielle formål vil anlæg med direkte ekspansion af ammoniak (NH<sub>3</sub>) stadig spille en vis rolle, men tidligere tiders systemer med meget store fyldninger (mange tons) forventes ikke at blive benyttet ved nyanlæg. Dvs. de kølesteder som kræver lange rørtræk vil formentlig blive kølet vha. et indirekte system
5. Direkte systemer med CO<sub>2</sub> anvendt i en såkaldt transkritisk proces syntes at komme frem indenfor udvalgte anvendelsesområder. Mindre systemer som flaskekølere syntes at være på vej, men større systemer kan følge i takt med der udvikles komponenter, som kan håndtere det store tryk ( $\approx 100$  bar)
6. A/C systemer vil i stigende grad have mulighed for frikøling
7. Mht. styring vil variabel hastighedsstyring af kompressorer, blæsere og pumper få en større udbredelse
8. Intelligent computerbaseret fjernovervågning vil også få større udbredelse.

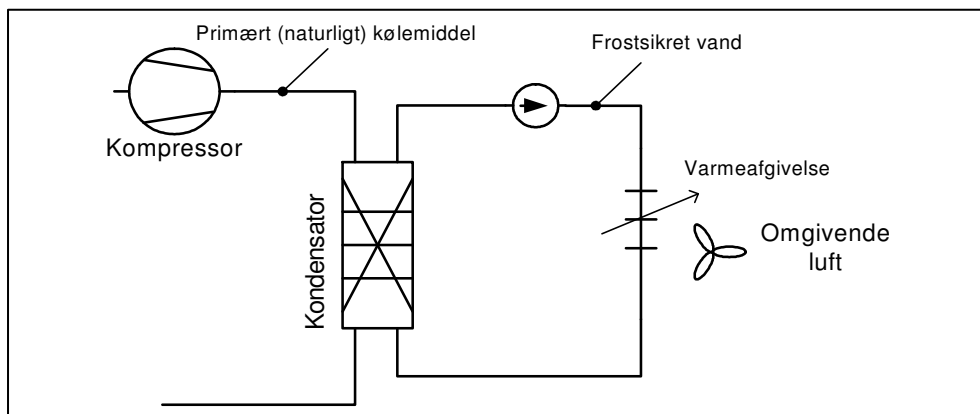
Et alternativ til centrale køleanlæg kunne være mange små effektive decentrale anlæg, hvor blot den varme side er central, dvs. hvor kondensatorvarme fjernes af en "koldtvandsledning", som står i forbindelse med en central tørkøler. Hermed vil det enkelte kølested kunne operere med individuelt fordampningstryk. Selvom en sådan anlægsofbygning syntes at have sine energimæssige fordele, er der dog ikke tegn på nogen større udbredelse i den nærmeste fremtid.

## 2.2 Anlægstyper der påtænkes anvendt i køleværktøjet

Som nævnt vil fremtidens anlægstyper i højere grad være differentierede og bestå af forskellige anlægsofbygninger. Erfaringerne fra specielt Sverige er, at indirekte systemer vil finde en højere grad af anvendelse i fremtiden. I et køleprogram skal man derfor kunne vælge blandt typiske systemofbygninger med forvalg af hovedkomponenter, der giver mulighed for på enkel vis at tilpasse til andre anlægskoncepter;

- Etrinssystem
- Totrinssystem
- Kaskadesystem
- Indirekte system på både kold og varm side

Figur 2.1 er en skitse af et vigtigt anlægselement, nemlig indirekte varmeafgivelse til den omgivende luft.



Figur 2.1. Varmen fra kølesystemet afgives indirekte til omgivelserne via en tørkøler.

Eksempler på anvendelse af værktøjet kunne være:

- Køle- og frostrum.
- Supermarkedsanlæg.
- Luftkonditioneringsanlæg (A/C).
- Proceskølesystem.

Hovedkomponenterne ved valg af system skal kunne specificeres simpelt og omfatte følgende:

- Kølere til luft, væske eller fast stof.
- Pumper.
- Sekundært rørsystem på kold side med frem- og returløb.
- Fordampere til tørt eller vådt system til luft, væske eller fast stof.
- Kompressorer af stempel-, scroll- og skruetype.
- Primært rørsystem med sugeside, trykside og væskeside.
- Mellemkølere af åben og lukket type.
- Kaskadevekslere.
- Kondensatorer til luft, væske, luft/væske og fast stof.
- Sekundært rørsystem på varm side med frem- og returløb.
- Varmeafgivere som luft, væske, luft/væske og fast stof.

Til designet af kølesystemer skal man kunne indgive hovedkomponenternes karakteristika, samt designparametre som  $\Delta t$ , tryktab i rørstrækninger osv. Hertil kommer, styrings- og reguleringsforholdene skal indarbejdes. Eksempler er:

- ON/OFF-drift og dertil hørende driftstimetale.
- Hastighedsregulering.
- Mest belastede kølested.
- Trykreguleringsventiler til fordampetryk, kondensatortryk, hotgas-bypass, m.fl.

Hensigten med projektet har ikke været at opstille en komplet designmanual for et fremtidigt køleværktøj, men bilag 1 er et forslag til specifikation af et køleværktøj, mens bilag 2 indeholder eksempler på forslag til skærbilleder. Det er ud fra denne specifikation at det udarbejdede prototypeværktøj for simulering af energiforbrug på supermarkedsanlæg er fremstillet.

Hensigten med at udarbejde et prototypeværktøj er, at der alligevel skulle opstilles modeller for beregning af årsenergiforbruget for køleanlæg. I stedet for at lave en model i regneark eller lignende og derefter dokumentere dette på skrift, er det valgt at opbygge en model i EES og lade denne virke som dokumentation for modellerne.

### 3 Beskrivelse af undersøgte anlæg

#### 3.1 Supermarkedsanlæg

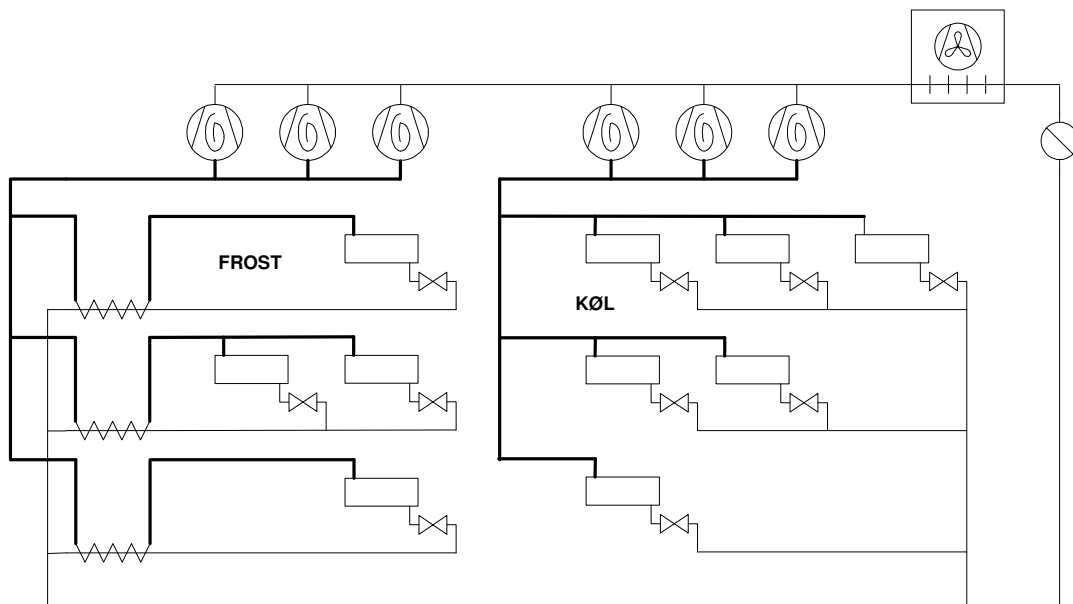
I projektet er årsenergiforbruget simuleret for følgende 3 supermarkedsanlæg:

1. Parallelanlæg med R404A som kølemiddel
2. Kaskadeanlæg med CO<sub>2</sub> på frost og kølekreds samt R404A på den varme side
3. Kaskadeanlæg med CO<sub>2</sub> på frost og kølekreds samt R404A på den varme side

Anlæggene finder meget typisk anvendelse i supermarkeder, når der er tale om nye eller nyere anlæg. I det følgende beskrives disse anlæg mere indgående.

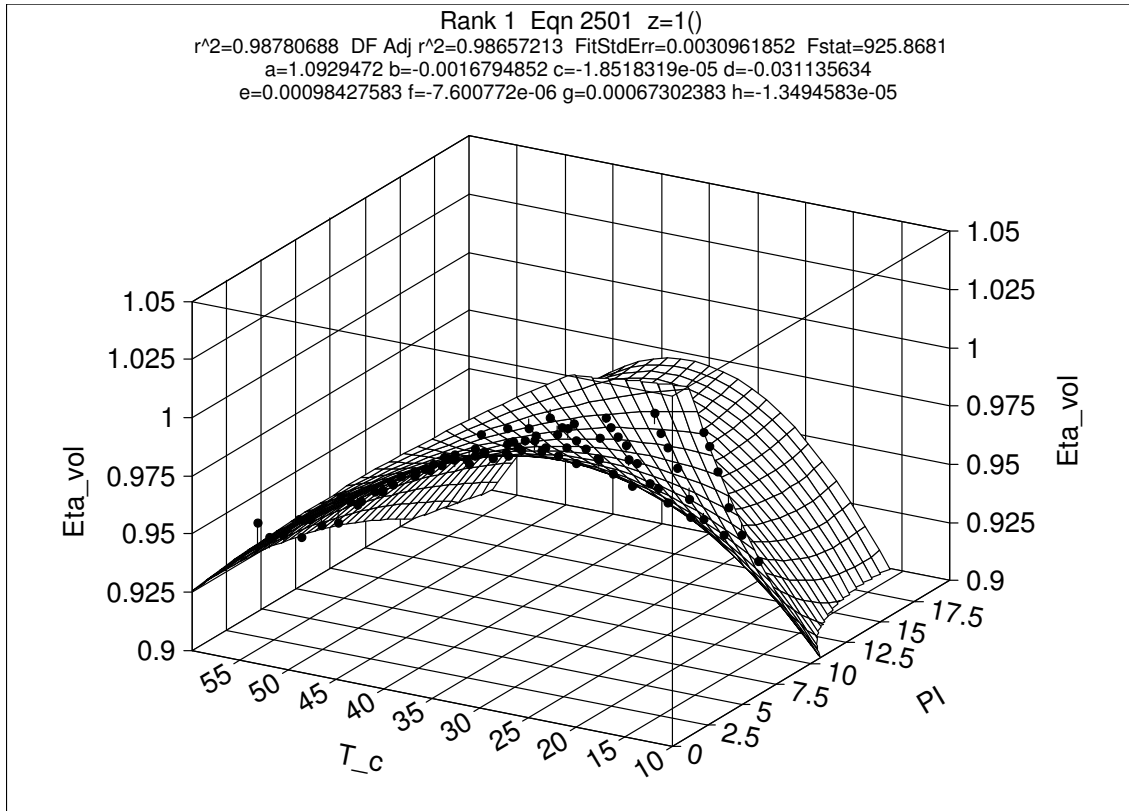
##### 3.1.1 Beskrivelse af parallelanlæg med R404A som kølemiddel

Denne anlægsopbygning anvendes meget hyppigt, specielt i mindre og mellemstore butikker. Figur 3.1 viser et typisk parallelanlæg med to separate kredse til henholdsvis frost og køl samt en fælles kondensator. Ekspansionen af kølemiddel foregår som direkte ekspansion i møblerne. På frostsiden sidder, idet aktuelle tilfælde, en sugegasveksler, der giver yderligere underkøling til væsken inden ekspansionsventilerne. Dette ses ikke altid. I det aktuelle tilfælde består kompressoropbygningen af Copeland Scrollkompressorer henholdsvis 3 stk. på frost og køl (modellerne ZF18 K4E samt ZS30 K4E). Anvendelsen af Scrollkompressorer ses mere og mere hyppigt, dels pga. den lave pris for kompressorerne og dels fordi Scrollkompressorer erfaringsmæssigt har vist sig at være meget stabile. Som alternativ til Scrollkompressorer ses også hyppigt anvendelse af små stempelkompressorer.



Figur 3.1. Skitse af parallelanlæg til supermarked med R404A som kølemiddel.

For at kunne simulere elforbruget og kuldeydelsen fra kompressorerne er det nødvendigt at kende kompressorernes virkningsgrad ved forskellige lastsituationer. Figur 3.2 viser en visuel fremstilling af den volumetriske virkningsgrad for Scrollkompressoren Copeland ZF18 K4E som funktion af kondenseringstemperaturen og trykforholdet



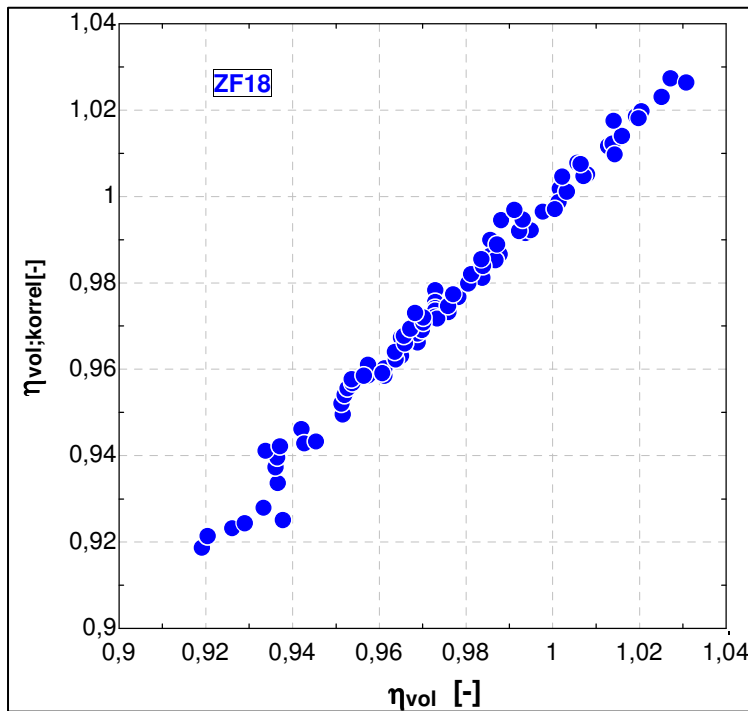
Figur 3.2. Volumetrisk virkningsgrad for scrollkompressor ZF18 K4E

Målepunkterne er forsøgt gengivet med følgende ligningsudtryk:

$$\eta_{\text{vol}} = (A + B * Y + C * T_c^2) + (D + E * T_c + F * T_c^2) * \phi + (G + H * T_c) * \phi^2$$

hvor A, B, ..., H er konstanter,  $T_c$  er kondenseringstemperaturen og  $\phi$  er trykforholdet. Figur 3.3 viser samhørende værdier mellem beregnet volumetrisk virkningsgrad og opgivet volumetrisk virkningsgrad. Af figuren ses en rigtig god overensstemmelse.

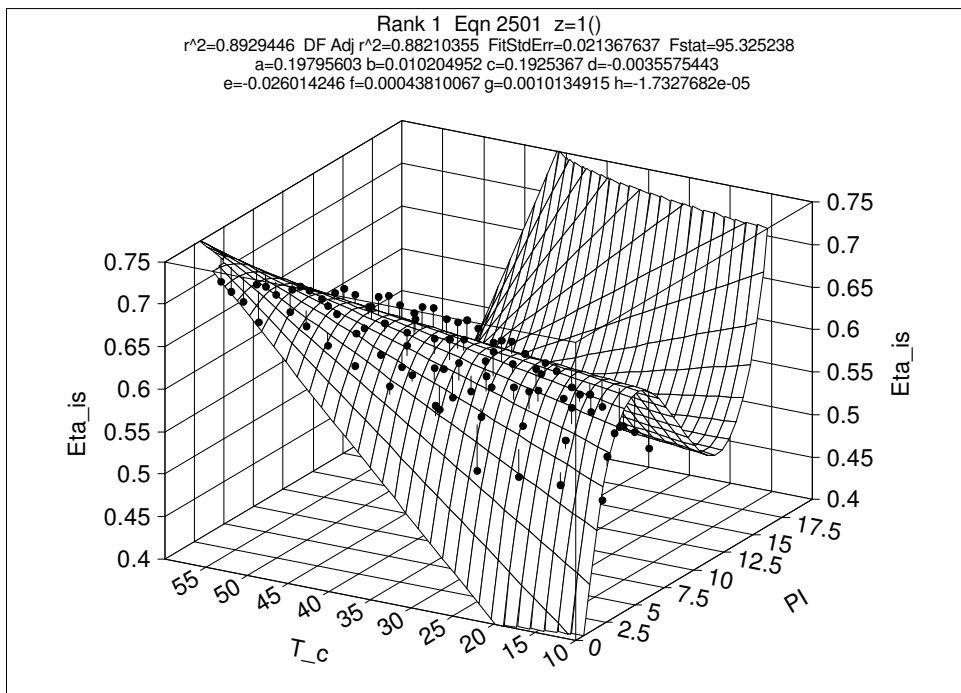




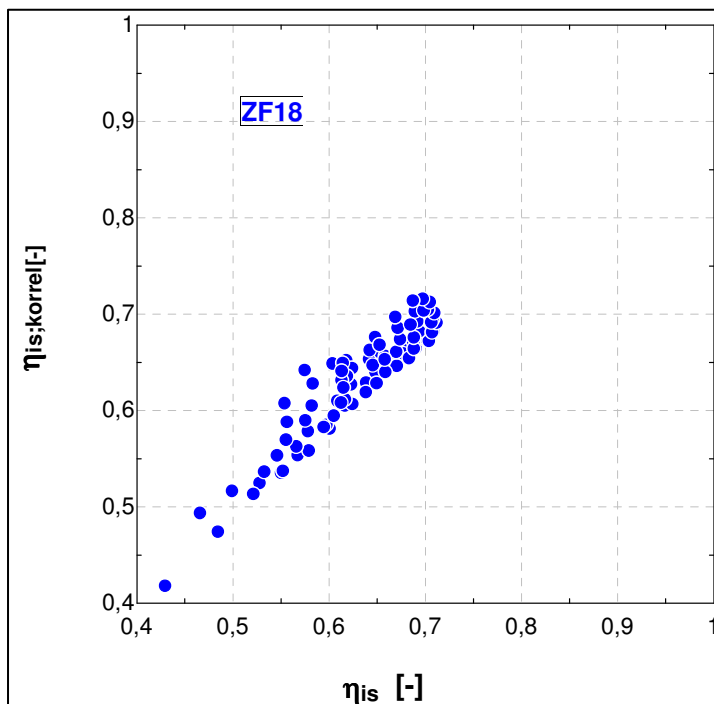
Figur 3.3. Sammenligning mellem korreleret og beregnet volumetrisk virkningsgrad

Figureerne 3.4 og 3.5 viser samme øvelse for den isentropiske virkningsgrad. Her er det anvendte ligningsudtryk følgende:

$$\eta_{is} = A + B \cdot T_c + (C + D \cdot T_c) \cdot \varphi + (E + F \cdot T_c) \cdot \varphi^2 + (G + H \cdot T_c) \cdot \varphi^3$$



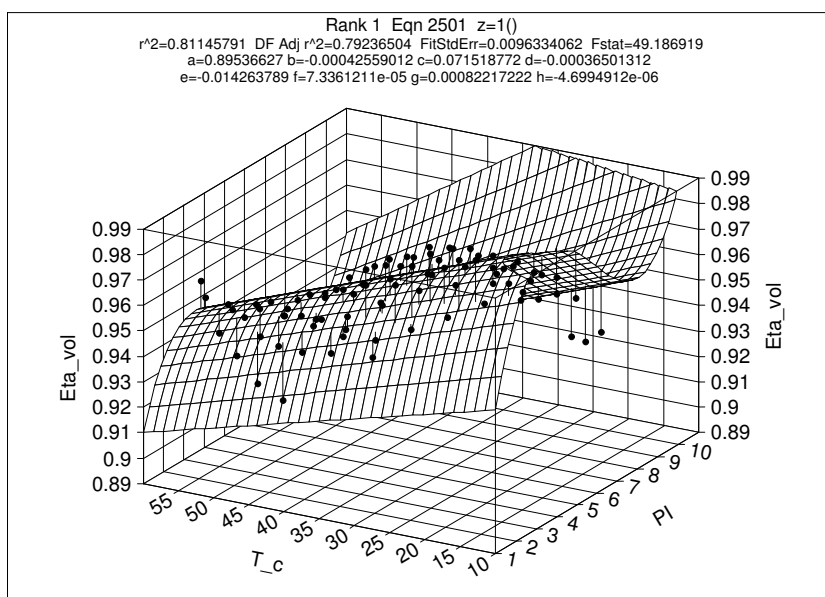
Figur 3.4. Isentropisk virkningsgrad for scrollkompressor ZF18 K4E



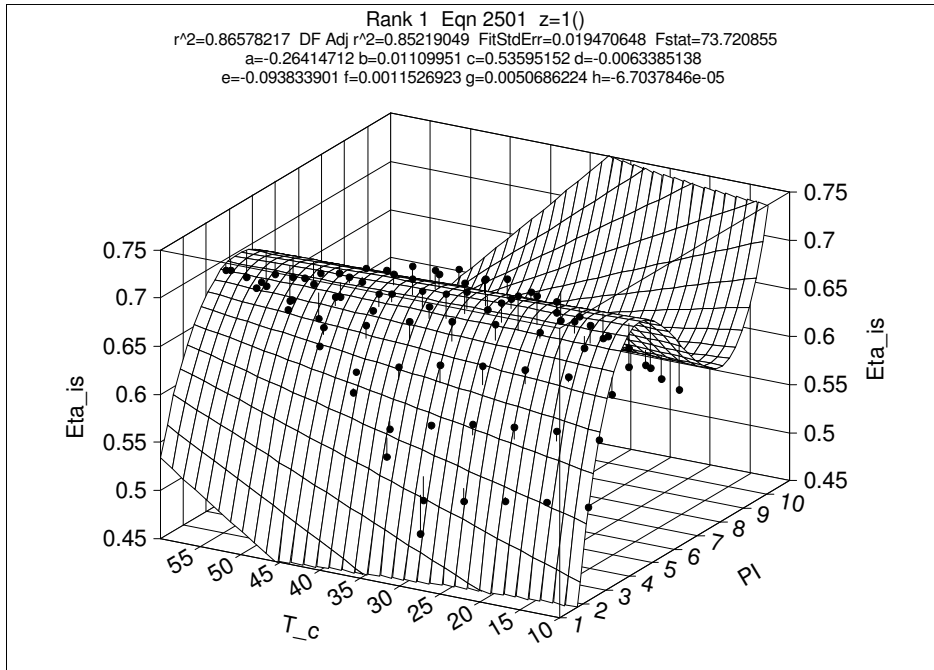
Figur 3.5. Sammenligning mellem korreleret og beregnet isentropisk virkningsgrad

Ligningsudtrykket for den isentropiske virkningsgrad giver ikke helt så nøjagtige værdier som for den volumetriske virkningsgrad, men stadig ganske godt.

Lignende sammenligninger er lavet for kompressoren ZS30 K4E, idet det er samme matematiske udtryk der er anvendt for den isentropiske og volumetriske virkningsgrad. Dette er vist af figur 3.6 og 3.7. Igen ses en god overensstemmelse, specielt for den volumetriske virkningsgrad.



Figur 3.6. Volumetrisk virkningsgrad for scrollkompressor ZS30 K4E



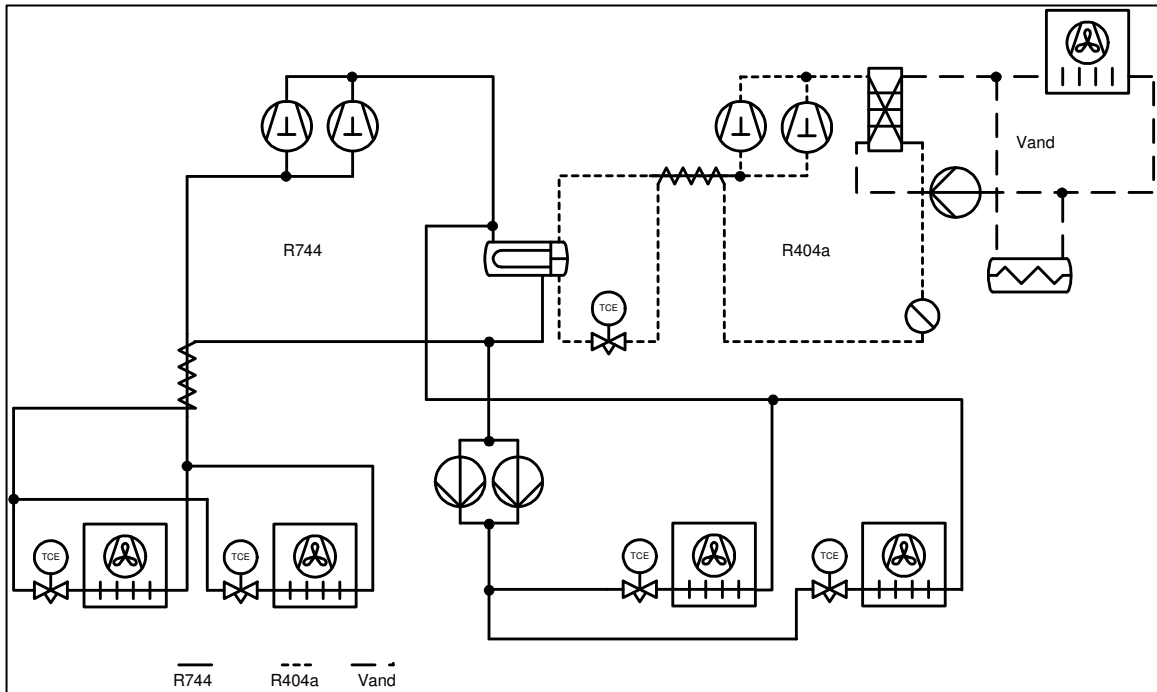
Figur 3.7. Isentropisk virkningsgrad for scrollkompressor ZS30 K4E

### 3.1.2 Beskrivelse af kaskadeanlæg

Figur 3.8 viser et relativt nyudviklet kaskadeanlæg, hvor  $\text{CO}_2$  anvendes til både køl- og frostmøblerne. På frostmøblerne anvendes der direkte ekspansion ind i møblerne. Før kompressorerne sidder en sugegasveksler der underkøler  $\text{CO}_2$  væsken inden ekspansionsventilerne til frostmøblerne.  $\text{CO}_2$  kompressorerne komprimerer gassen op mod kaskadeveksleren, der virker som kondensator for  $\text{CO}_2$  kredsen og fordamper for R404A kredsen.

Kølemøblerne virker som oversvømmede fordampere med pumpecirkulation. Gas/væskeblandingen efter kølemøblerne ledes til bage og blandes med trykgassen fra  $\text{CO}_2$  kompressorerne inden det ledes ind i kaskadeveksleren. R404A kredsen komprimerer gassen op mod en væskekølet kondensator. Kølevandet afgiver sin varme til en tørkøler, der afgiver sin varme til udeluften. Der er ligeledes mulighed for varmegenvinding. For  $\text{CO}_2$  kredsen anvendes 3 stk. stempelkompressorer i parallel og på R404A kredsen 5 stk. stempelkompressorer i parallel. En mere udførlig beskrivelse af anlæggene kan findes hos Høgaard-Knudsen /3/.

I simuleringen af årsenergiforbruget er ligningsudtrykkene for volumetrisk og isentropisk virkningsgrad anvendt fra Høgaard-Knudsen /3/.



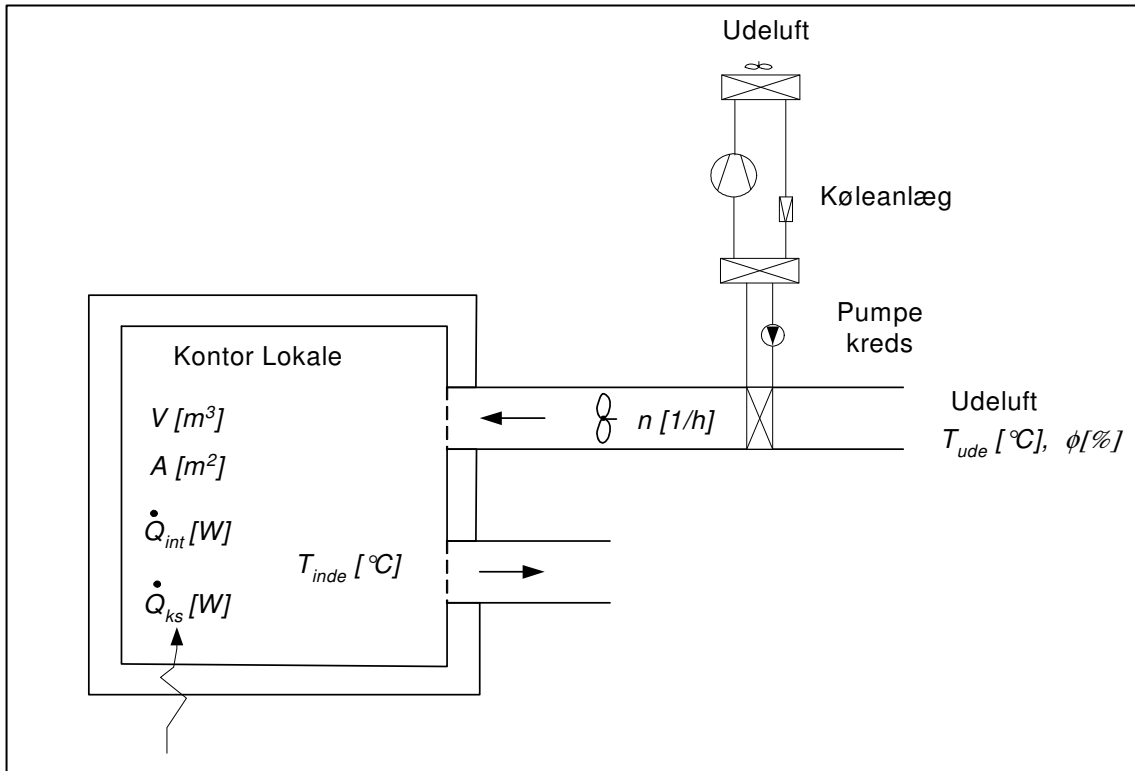
Figur 3.8. Skitse af kaskadeanlæg til supermarked med  $\text{CO}_2$  på køl og frost samt R404a på toppen /3/.

## 3.2 Luftkonditioneringsanlæg

### 3.2.1 Beskrivelse af anlæg

Der blev foretaget målinger på 2 luftkonditioneringsanlæg. Målingerne på det ene af anlæggene viste sig dog at være fejlbehæftede. Da disse fejl blev rettet, var der sket en omorganisering i kontorlokalerne, således at der ikke var noget personer tilstede, og dermed ikke noget kølebehov. På det andet anlæg foreligger der elmålinger over 1 år, dog alene for køleanlægget. Det tilhørende ventilationsanlægs ydelser er fastlagt ud fra beregninger.

Den principielle opbygning af anlæggene er vist af figur 3.9. Anlæggene er traditionelle ventilationsanlæg, der i størstedelen af året anvender udeluft til nedkøling. Såfremt udeluften ikke er tilstrækkelig til at holde den ønskede rumtemperatur, indkøbes køleanlægget. Der er tale om 100% friskluftventilering i kontorlokaler. Principperne kan nemt overføres til andre systemudformninger, som eksempelvis bidrag fra lokal fancoil køling.



Figur 3.9. Principiel opbygning af luftkonditioneringsanlæg.

### 3.2.2 Beskrivelse af matematisk model

Ved simulering af energiforbrug, skal bruger specificere en række input til modellen. De input der skal specificeres kan opdeles i lokalet specifik input, klimaspecifikt input samt styringen af klimatiseringen.

#### Lokalet specificeres ved:

Volumen	$V [m^3]$
Gulvareal	$A$
Intern belastning	$\dot{q}_{int} [W/m^2]$ som funktion af tid

#### Klimaforhold:

Udeluft	$T_{ude} [°C], \phi [%]$ som funktion af tid
Varme via klimaskærm	$\dot{q}_{ks} [W/m^2]$ som funktion af tid
Indetemperatur	$T_{inde} [°C]$ som funktion af tid

De nævnte klimaforhold vil ofte være output af simulering, eksempelvis en BSIM<sup>3</sup>-simulering eller simulering fra et andet beregningsprogram. Disse input vil typisk bestå af tabelværdier for hele året opløst på timebasis.

#### Styring af klimaanlæg:

Friskluftmængde  $n$  [1/h] (luftskifte)

I sin simple form er her tale om konstant luftskift evt. med forskel mellem indenfor kontortid og udenfor kontortid. I mere avancerede styringer vil luftmængden blive tilpasset et acceptabelt område for indblæsningstemperatur. I endnu mere avancerede regulering indgår minimering af det samlede energiforbrug til køleanlæg og ventilator.

I visse tilfælde kan det - for et givent kølebehov - betale sig at sætte luftmængden lidt ned, og opnå en besparelse på ventilatoreffekten, og i stedet benytte en lidt lavere indblæsningstemperatur, hvilket vil forøge effektforbruget af køleanlægget.

#### Delmodeller som fastlægger energiforbrug til A/C anlæg:

De effektforbrugende elementer er:

- Friskluftventilator
- Kølekompressor
- Pumpe i pumpekreds
- Kondensator blæser.

Energiforbruget til friskluftventilatoren fastlægges ved angivelse af et nominelt effektoptag til blæseren ved en nominel luftmængde. Effektforbruget ved andre luftmængder beregnes ud fra de sædvanlige affinitetsligninger:

$$\dot{W}_{vent} = K_{vent} \cdot \dot{V}_{luft\_nom} \left( \frac{\dot{V}_{luft}}{\dot{V}_{luft\_nom}} \right)^3 \quad K_{vent} \text{ vil være størrelsesorden } 2000 \text{ [J/m}^3] = 2000 \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^3/\text{s}} \right].$$

BR maksimal værdi er 2500 [J/m<sup>3</sup>]

Energiforbruget til pumpen i pumpekredsen kan fastlægges ved lignende fremgangsmåde.

$$\dot{W}_{pumpe} = K_{pumpe} \cdot \dot{V}_{vand\_nom} \left( \frac{\dot{V}_{vand}}{\dot{V}_{vand\_nom}} \right)^3 \quad K_{pumpe} \text{ vil være størrelsesorden } 0,025 \text{ [J/m}^3] = 0,025 \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^3/\text{s}} \right].$$

---

<sup>3</sup> BSIM er et program fra Statens Byggeforsknings Institut, som på basis af en specifik bygningskonstruktion kan udregne mange termiske forhold herunder de nævnte størrelser

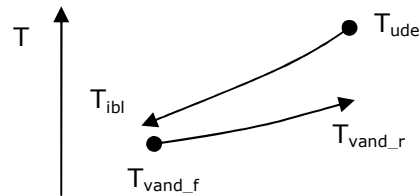
I en simpel, men beregningsmæssig nøjagtig, model kan processen herunder køleanlæggets samlede kompressor effektforbrug, beskrives som følger:

Det antages at kølingen via luften modsvarer lokalets interne varmebelastning, hidrørende fra personer, eludstyr, solindfald samt øvrig varmeindtrængning via klimaskærmen. Dette kan matematisk formuleres som:

$$A \cdot (\dot{q}_{\text{int}} + \dot{q}_{\text{ks}}) = \dot{m}_{\text{luft}} \cdot C_p \cdot (T_{\text{inde}} - T_{\text{ibl}}), \text{ hvor } T_{\text{ibl}} \text{ er indblæsningstemperaturen}$$

For given luftmængde og varmebelastning er indblæsningstemperaturen således fastlagt. Hvis udelufttemperaturen er under den ønskede indblæsningstemperatur er køleanlægget ikke aktivt. Praksis i Danmark viser, at der er relativt få aktive driftstimer for køleanlægget  $\approx$  500 timer/år.

Luftsiden og den ønskede køleydelse af luftkøleren betjent af kølevandet er nu fastlagt. For given størrelse af luftkøleren (UA-værdi) og kendt flow på vandsiden er de nødvendige vandtemperaturer bestemt af samtidig løsning af følgende to ligninger (transmissionsligning og energibalancé):



$$\dot{Q} = UA \cdot \Delta T_{\text{VV}} \quad \text{med} \quad \Delta T_{\text{VV}} = \frac{[(T_{\text{ude}} - T_{\text{vand}_r}) - (T_{\text{ibl}} - T_{\text{vand}_f})]}{\ln\left(\frac{(T_{\text{ude}} - T_{\text{vand}_r})}{(T_{\text{ibl}} - T_{\text{vand}_f})}\right)}$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_{\text{vand}} \cdot C_{p_{\text{vand}}} \cdot (T_{\text{vand}_r} - T_{\text{vand}_f})$$

Tilsvarende ligninger fastlægger den nødvendige fordampningstemperatur samt flow af kølemiddel. Effektforbruget til kompressoren bestemmes herefter ud fra dens (totale) isentropiske virkningsgrad. Denne vil være ca. 0,70. Effektforbruget til kondensatorblæseren kan med god tilnærmelse antages at være en fast andel af effektforbruget til kompressoren. Ca. 10 % vil være almindeligt. Hermed er den matematiske model i princippet fastlagt.

Der skal dog fremføres en principiel forudsætning for, at modellen rent energimæssigt vil afspejle de faktiske forhold, nemlig at timebaserede ligevægtstilstande tilnærmelsesvis i gennemsnit vil være i overensstemmelse med de samlede transiente forhold. I praksis vil temperaturer og flow variere op og ned - også indenfor en time - men erfaring viser, at disse relativt langsomme og mindre fluktuationer ikke er væsentligt betydende for de integrerede energimæssige forhold.

## 4 Målt energiforbrug

### 4.1 Måledata på parallelanlæg

Tabel 4.1 viser målinger foretaget på parallelanlægget. Der er alene foretaget målinger af det totale elforbrug samt elforbruget til køling, mens det øvrige forbrug er fremkommet ved deduktion.

Måned	Elforbrug [kWh]					
	Total	Kompressorer	Kompressorer + Kølereoler	Ventilation	Belysning	Øvrigt
Maj	15.826	3.291	6.581	1.736	5.293	2.216
Jun.	16.035	3.494	6.988	1.680	5.123	2.245
Jul	17.204	3.883	7.766	1.736	5.293	2.409
Aug.	17.106	3.841	7.682	1.736	5.293	2.395
Sep.	15.581	3.299	6.597	1.680	5.123	2.181
Okt.	15.308	3.068	6.136	1.736	5.293	2.143
Nov.	15.502	3.265	6.529	1.680	5.123	2.170
Dec.	15.061	2.962	5.923	1.736	5.293	2.109
Jan	15.036	2.951	5.902	1.736	5.293	2.105
Feb.	14.205	2.934	5.867	1.568	4.781	1.989
Mar.	15.747	3.257	6.513	1.736	5.293	2.205
Apr.	14.083	2.654	5.309	1.680	5.123	1.972
<b>Sum</b>	<b>186.694</b>	<b>38.897</b>	<b>77.793</b>	<b>20.440</b>	<b>62.324</b>	<b>26.137</b>

Tabel 4.1. Målinger af elforbrug på supermarked med parallelanlæg.

### 4.2 Måledata på kaskadeanlæg 1+2

Tabel 4.2 viser hoveddata for målingerne foretaget på supermarkederne med kaskadeanlæg. Der blev foretaget et meget stort antal målinger i projektet, og der henvises til Høgaard-Knudsen /3/ for yderligere detaljering af målingerne. Målinger er udført i perioden 01/08/2003-31/12/2003. I tabellen referer  $COP_k$  til  $COP$  for kølekredsen,  $COP_{tot}$  er det total energiforbrug til kompressorer og cirkulationspumper i forhold til køleydelsen på frost og køl.

	Kaskadeanlæg 1	Kaskadeanlæg 2
$COP_k$	3,49	4,20
$COP_{tot}$	1,87	1,81
Energiforbrug [kWh]	93.752	81.560
Heraf pumpeforbrug [kWh]	9.440	7.812

Tabel 4.2. Hoveddata for målinger foretaget på de to kaskadeanlæg.



### 4.3 Måledata på luftkonditioneringsanlæg

Tabel 4.3 viser månedlige værdier af elforbrug – dels totalt og dels til køling i 2004. Derudover vises afledte målte værdier, såsom COP, køleenergi og temperaturdifferens.

Måned	Totalt elforbrug	Elforbrug til køling	Køleenergi	Gennemsnitlig COP	Kølevand	Gennemsnitlig temperatur diff.
	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[-]	m <sup>3</sup>	[K]
Januar	35.643	763	7.820	10,2	5.780	1,2
Februar	49.743	917	7.970	8,7	5.400	1,3
Marts	51.839	1.238	8.640	7,0	5.834	1,3
April	45.079	2.073	9.190	4,4	6.003	1,3
Maj	43.968	3.251	11.360	3,5	6.817	1,4
Juni	49.941	3.733	13.020	3,5	8.074	1,4
Juli	49.488	4.306	15.920	3,7	13.242	1,0
August	61.452	7.917	32.380	4,1	11.559	2,4
Sept.	52.085	3.757	12.910	3,4	6.797	1,6
Oktober	50.419	2.750	10.200	3,7	5.499	1,6
Nov.	50.990	1.157	8.660	7,5	4.949	1,5
December	48.931	828	8.140	9,8	4.772	1,5
<b>Sum</b>	<b>589.578</b>	<b>32.690</b>	<b>146.210</b>	<b>4,5</b>	<b>84.727</b>	<b>1,5</b>

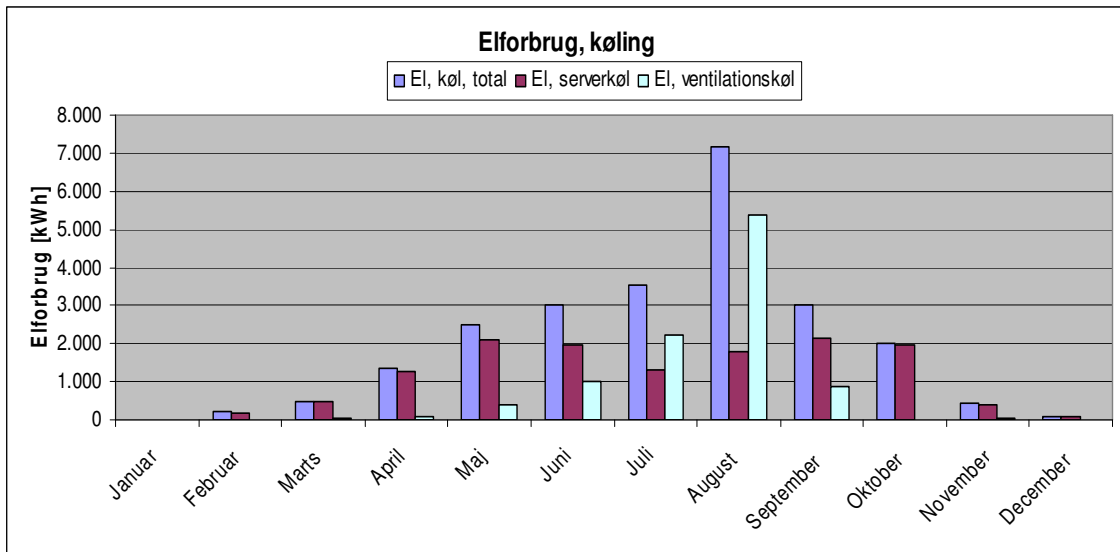
Tabel 4.3. Målinger af elforbrug og køleenergi på luftkonditioneringsanlæg i 2004.

Af tabellen ses, at forbruget til aktiv køling kun udgør en mindre del af det samlede elforbrug. I dette tilfælde ca. 6 %. Dette skyldes naturligvis tilstedeværelsen af frikøling. Således ses også, at COP i de kolde måneder er meget høj, set i forhold til, hvad der er muligt at opnå gennem aktiv køling. I de varme sommermåneder falder COP til et niveau, som ses normalt ud, set i forhold til, at det primært er aktiv køling der anvendes.

Af figuren ses også, at temperaturdifferensen er meget lav svarende til at vandmængden er meget høj. Denne kunne med fordel sættes betydeligt ned.

En del af forbruget til køling skyldes imidlertid ikke forbrug til luftkonditionering, men forbrug til vedligeholdelse af temperaturen i serverrummet. Dette forbrug ses tydeligt i december, januar og februar, hvor der ikke er behov for aktiv køling. Figur 4.1 viser månedlige forbrug hhv. totalt for køling, køling af ventilationsluft og køling af serverrum.

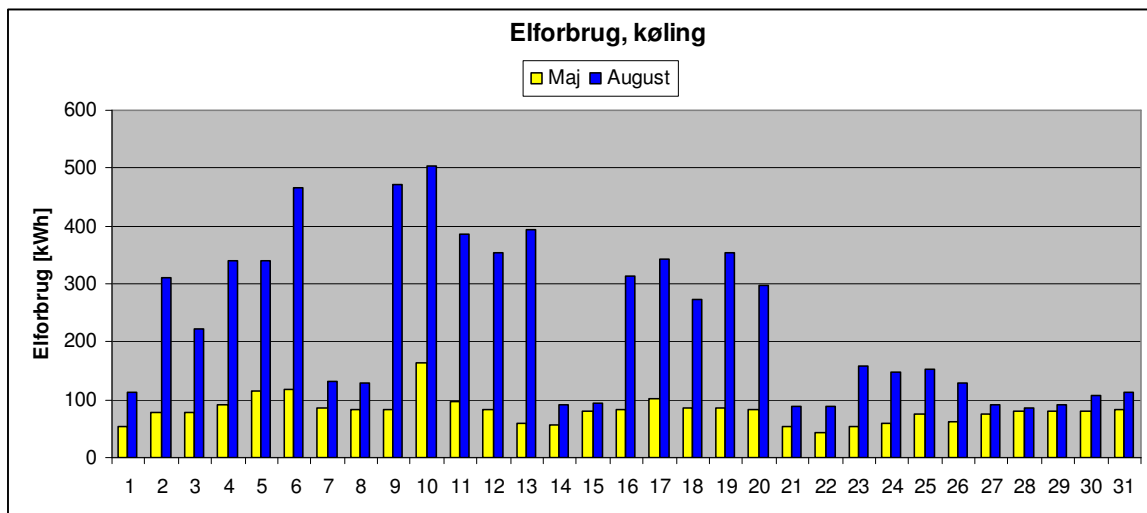
Af figuren ses, at forbruget til serverkøling udgør en betydelig andel af det samlede forbrug til køling i de mere kølige måneder, mens forbruget og sommeren primært kan tilskrives ventilationskøling. Hvis køling af serverrummet fratrækkes det samlede forbrug til aktiv køling, udgør forbruget til aktiv køling af ventilationsluften mindre end 30 %.



Figur 4.1. Fordeling af forbrug til aktiv køling på køling af ventilationsluft og serverkøling.

Det skal i øvrigt bemærkes, at forbruget til serverkøl er nogenlunde ensartet året rundt, hvilket dog primært dækkes af frikøl i de koldeste måneder. I juli måned ses i øvrigt tydeligt, at belastningen på serverrummet er mindsket grundet sommerferie.

Med henblik på at vise dynamikken i forbruget, viser figur 4.2 forbruget til ventilationskøling og serverkøl hhv. maj måned og august måned. Af figuren ses først og fremmest indflydelsen af varme og kolde dage (august). Ligeledes ses indflydelsen af weekends, hvor ventilation og køl er stoppet, hvor der således alene er tale om serverkøl. I maj måned er fluktuationerne betydeligt mindre, svarende til, at der stort set alene er tale om serverkøl.



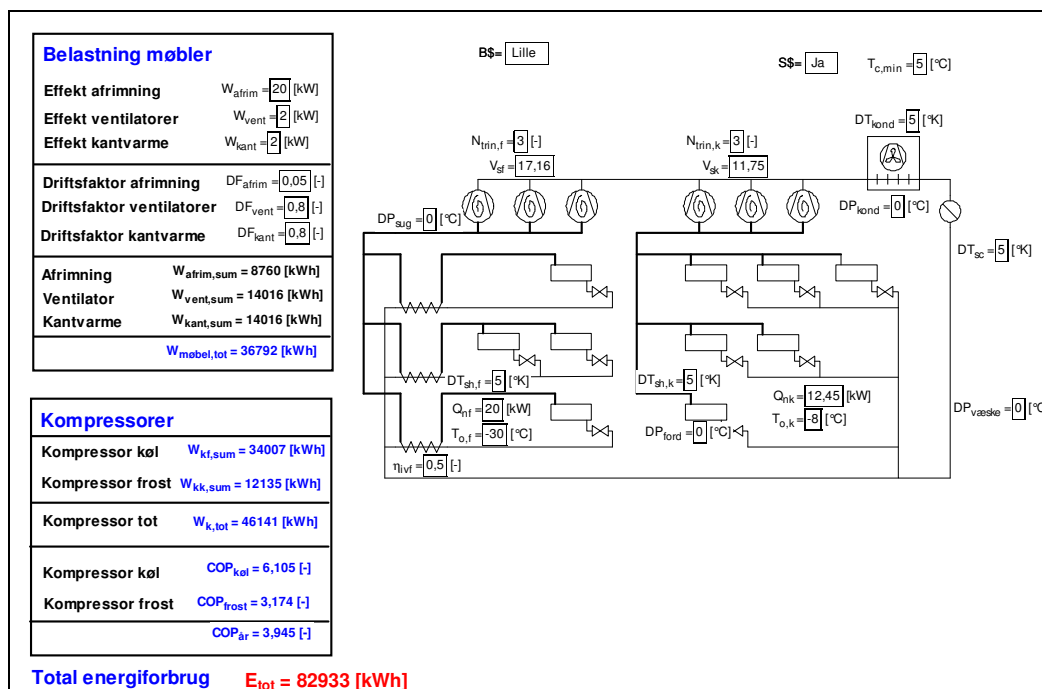
Figur 4.2. Elforbrug til køling opdelt på dage i hhv. maj og august måned.

## 5 Simuleret energiforbrug

Følgende afsnit viser diagrammer og simuleringresultater for tre simuleringprogrammer udviklet i programmet EES (Engineering Equation Solver). Der er udviklet tre simuleringprogrammer med kredsprocesserne for henholdsvis parallelanlægget med R404A samt kaskadeanlæg med R744 (CO<sub>2</sub>) på lavtemperaturdelen og R404A på højtemperaturdelen. I programmet er temperaturen for standardåret (TRY) implementeret. Temperaturen anvendes til beregning af ydelse i kredsprocessen som summeres op over årets 8760 timer. I programmet er der ligeledes angivet et belastningsprofil i forhold til nominal ydelse. Belastningsprofilen er forskellig for hverdage samt lørdag/søndag. Programmerne kan i princippet anvendes til forskellige parallelanlæg og kaskadeanlæg ved at ændre nominal ydelse og ændre på kompressortypen.

### 5.1 Simuleret årsenergiforbrug på parallelanlægget

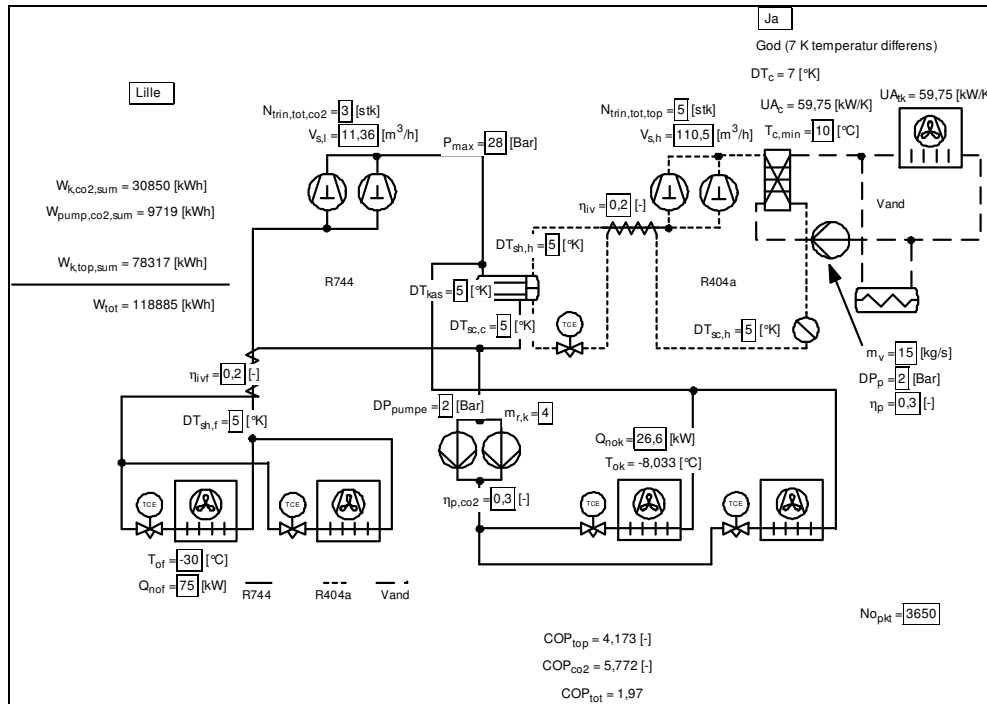
Figur 5.1 viser simuleringresultaterne på parallelanlægget. Energiforbruget til kompressorerne er simuleret til 46.141 kWh og målt til 38.886, mens energiforbruget til kølemøblerne er simuleret til 36.792 mod et målt forbrug på 38.886. De målte tal er baseret på en total måling (møbler + kompressorer) og erfaringsmæssigt er disse to lige store. Simuleringresultaterne anses derfor absolut for at være tilfredsstillende. Afvigelsen mellem målinger og simuleringer er knap 7 %. Den største afvigelse skyldes sandsynligvis anvendelse af temperaturen fra standardåret. Var simuleringen foretaget med de reelle temperaturer, ville afvigelsen formodentlig være mindre.



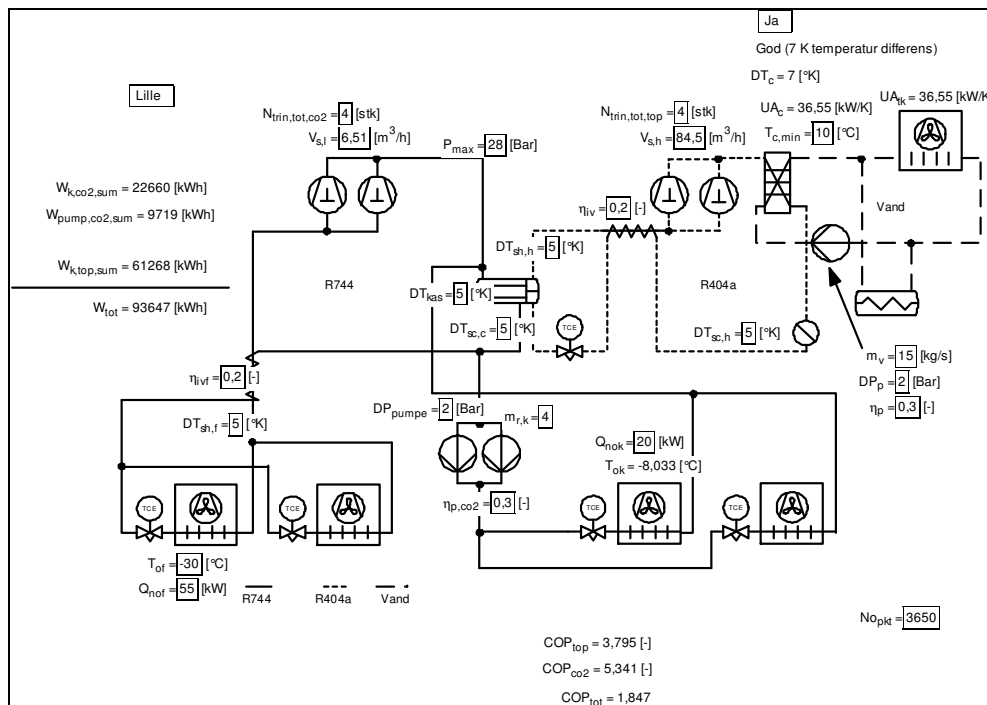
Figur 5.1. Resultater fra årssimulering af parallelanlæg.

### 5.2 Simuleret årsenergiforbrug på kaskadeanlæggene

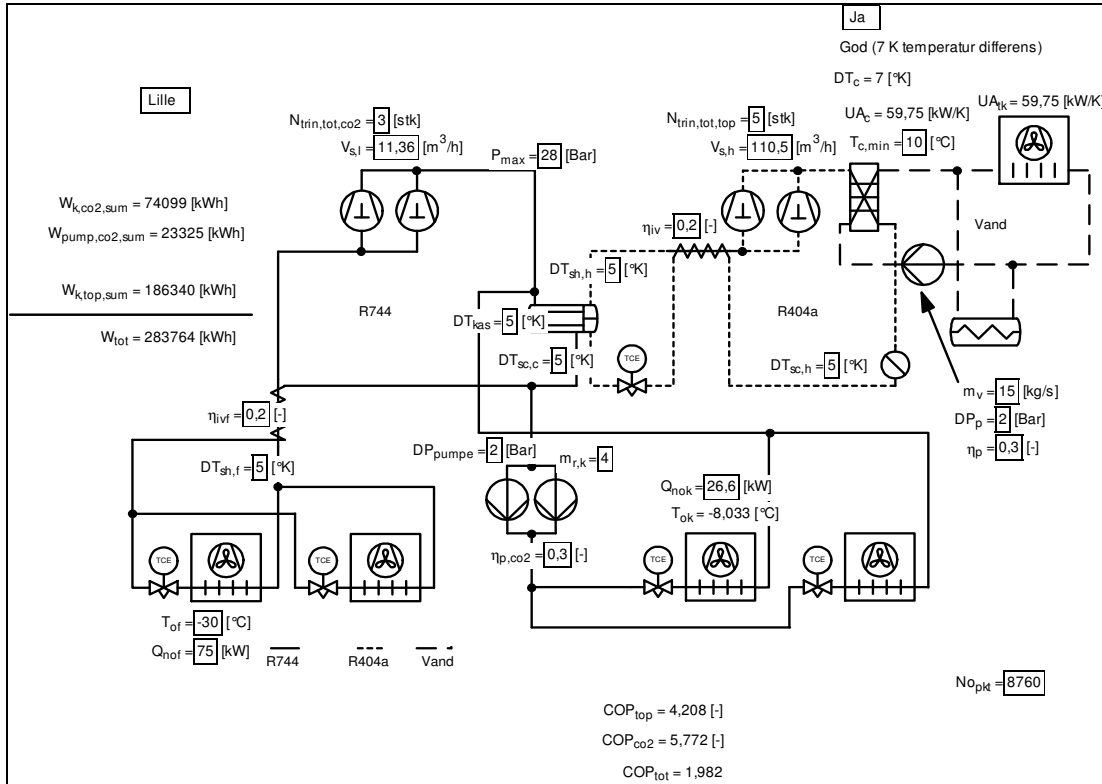
Figurerne 5.2-5.5 viser simuleringsresultaterne på kaskadeanlæggene 1 og 2. Figurerne 5.2 og 5.3 viser simuleringsresultaterne i måleperioden for hhv. kaskadeanlæg 1 og 2, mens figurerne 5.4 og 5.5 viser årssimuleringsresultaterne.



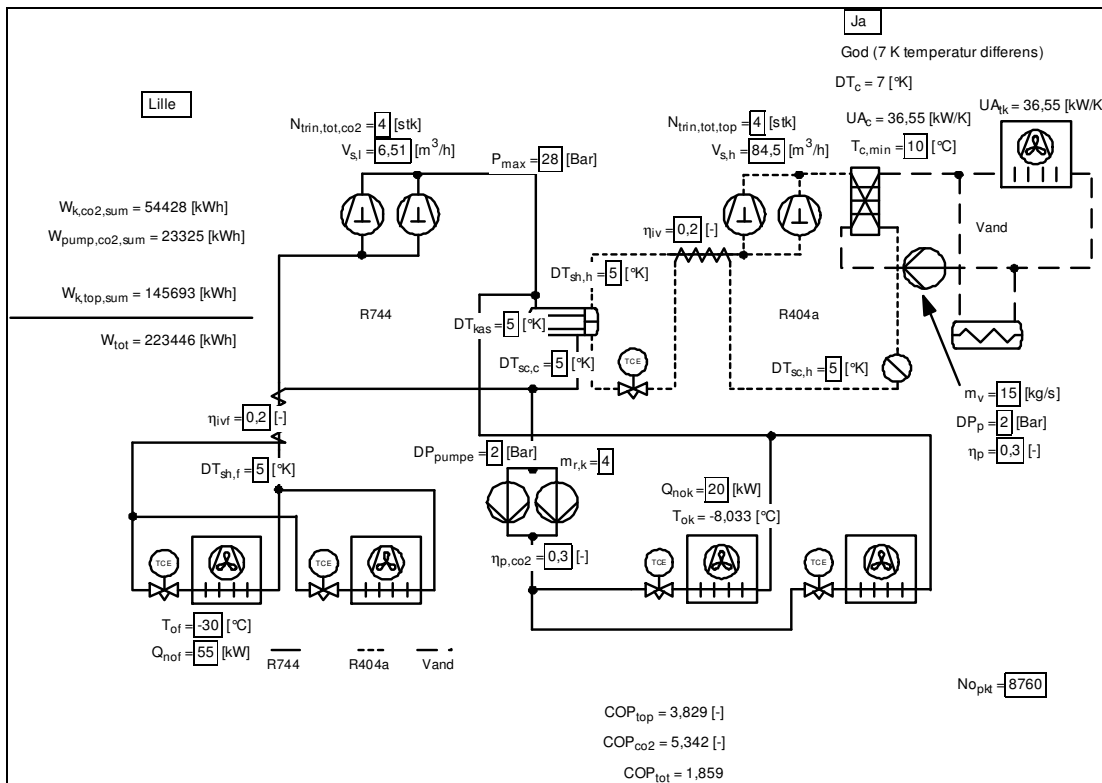
Figur 5.2. Resultater fra simulering af kaskadeanlæg 1 fra d. 01/08/2003-31/12/2003.



Figur 5.3. Resultater fra simulering af kaskadeanlæg 2 fra d. 01/08/2003-31/12/2003



Figur 5.4 Resultater fra simulering af kaskadeanlæg 1, årsenergiforbrug.



Figur 5.5 Resultater fra simulering af kaskadeanlæg 2, årsenergiforbrug.

Tabel 5.1 er en udvidelse af tabel 4.2, idet simuleringsresultaterne nu sammenholdes med måleresultaterne for hvert af kaskadeanlæggene. Af tabellen ses, at der er rimelig god overensstemmelse mellem målte og simulerede data. For kaskadeanlæg 1 er der dog en vis afvigelse mellem målt og simuleret totalt energiforbrug. Afvigelsen ligger dog stadig inden for 10%, hvilket betragtes som værende tilfredsstillende.

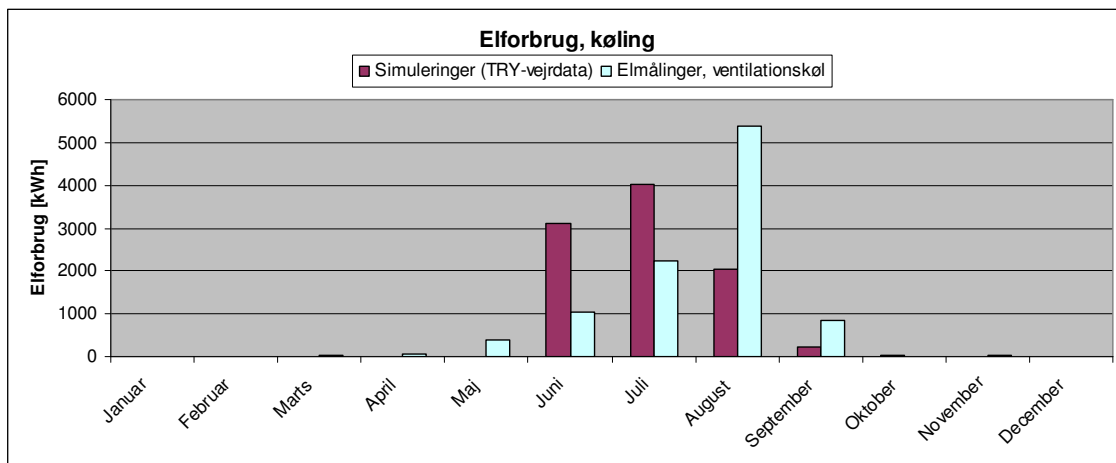
Ovenstående resultat er rimeligt, da der ikke har været det store kendskab til kompressorernes, fordampernes samt kondensatorernes styringsstrategi.

	Kaskadeanlæg 1		Kaskadeanlæg 2	
	Målt	Simuleret	Målt	Simuleret
$COP_k$	3,49	3,38	4,20	4,15
$COP_{tot}$	1,87	1,99	1,81	1,95
Energiforbrug [kWh]	93.752	84.222	85.160	88.911
Heraf pumpeforbrug [kWh]	9.440	9.777	7.812	7.908

Tabel 5.1. Hoveddata for målinger og simuleringer foretaget på de to kaskadeanlæg.

### 5.3 Simuleret årsenergiforbrug på luftkonditioneringsanlæg

Figur 5.6 viser resultater af simuleringer gennem anvendelse af modellen beskrevet i afsnit 3.2 sammenholdt med målinger af elforbruget i 2004. Som temperatur og fugtighedsdata er anvendt TRY data, der således repræsenterer et standardår. Som udtryk for den interne last, er der anvendt midlede resultater fra en BSim simulering, hhv. på den nordlige side og den sydlige side af bygningen.



Tabel 5.6. Sammenligning mellem simulering og måling af forbrug til køling, idet reference-temperatur og fugtighed stammer fra TRY-data.

Som den interne last er anvendt følgende værdier:

- Kontortid (hverdage i tidsrummet 07-18): 10,7 W/m<sup>2</sup>
- Udenfor kontortid (hverdage i tidsrummet 18-07 samt weekends): 3,2 W/m<sup>2</sup>

Intern last dækker transmission primært grundet solindfald, antallet af mennesker og det samme antal PC'ere m. skærme samt belysning.

Af figuren ses, at modellen nogenlunde beregner forbruget til køling set på årsbasis, men at modellen overestimerer forbruget i juni og juli måned samt underestimerer forbruget i august måned. Årsagen til dette kan tænkes at ligge i afvigelser mellem temperatur og fugt for standardåret i forhold til det aktuelle år 2004:

- Juni 2004, Gennemsnitlig temperatur på 13,9°C mod 14,3 i normalåret samt 189 solskinstimer mod normalt 209 timer
- Juli 2004, Gennemsnitlig temperatur på 15,1°C mod 15,5 i normalåret samt 185 solskinstimer mod normalt 196 timer
- August 2004, Gennemsnitlig temperatur på 17,9°C mod 15,7 i normalåret samt 227 solskinstimer mod normalt 186 timer.

Tendensen peger således i retning af, at modellens afvigelser skyldes vejrmæssige forhold. Tabel 5.2 viser sammenlignelige størrelser hhv. målt og simulerede

	Luftkonditionering		
	Målt	Simuleret	Afvigelse [%]
COP (inkl. frikøl)	6,1	-	-
COP**	3,7**	2,9	28%
Energiforbrug, kompressor [kWh]	10.031	9.433	3,4%
Energiforbrug, pumpe [kWh]		956	
Energiforbrug, ventilator [kWh]*	42.796*	40.339	6%
Aktiv køleenergi [kWh]	37.368**	27.225	37%

Tabel 5.2. Sammenligning mellem hoveddata for målinger og simuleringer foretaget på luftkonditioneringsanlægget. \*= Reelt er timetallet aflæst og optagen effekt beregnet. Der er således ikke tale om nøjagtige målinger. \*\*= Ikke målt præcist, da målingen indeholder såvel aktiv køling som frikøling.

Af tabellen ses således, at afvigelsen mellem målinger og simuleringer relativt lille, i de tilfælde, hvor der findes en eksakt måling. I de tilfælde, hvor der er foretaget en vægtning mellem graden af frikøl og graden af aktiv køl er afvigelsen betydeligt større.

Alt i alt synes modellen at gengive målingerne relativt godt. Med henblik på at fastsætte, i hvor høj grad nøjagtigheden ville øges, hvis der blev anvendt reelle temperatur og fugtdata,

blev modellen anvendt med reelle data for 2004. Her gav modellen imidlertid et meget afvigende resultat, hvilket er gengivet på nøgletalsform i tabel 5.3.

	Luftkonditionering		
	Målt	Simuleret	Afvigelse [%]
COP (inkl. frikøl)	6,1	-	-
COP**	3,7**	6,3	41%
Energiforbrug, kompressor [kWh]	10.031	2.685	258%
Energiforbrug, pumpe [kWh]		116	
Energiforbrug, ventilator [kWh]	42.796*	42.507	0,6%
Aktiv køleenergi [kWh]	37.368**	16.808	122%

Tabel 5.3. Sammenligning mellem hoveddata for målinger og simuleringer foretaget på luftkonditioneringsanlægget. \*= Reelt er timetallet aflæst og optagen effekt beregnet. Der er således ikke tale om nøjagtige målinger. \*\*= Ikke målt præcist, da målingen indeholder såvel aktiv køling som frikøling.

Resultatet blev således, et markant mindre forbrug af el til kompressoren, på trods af en meget varmere august måned (samtlige øvrige måneder i kølesæsonen var dog koldere end normalen). Konklusionen på ovenstående er således:

- De foretagne simuleringer viser et meget stor grad af betydning overfor temperaturen i de enkelte timer. Udskiftning af TRY-standardtemperaturdata med reelle 2004-temperaturdata, gav en markant ændring i simuleringresultaterne.
- Ovenstående fænomen udspringer fra, at behovet for aktiv køling i MEGET høj grad er afhængigt af korrekte belastningsdata. En forudsætning for valide simuleringresultater er således, at der haves et meget nøjagtigt "billede" af belastningen i bygningen – et billede der rent faktisk kun sjældent kan opnås.
- Simuleringerne kan i praksis nok primært anvendes som sammenligning af energiforbrug gennem anvendelse af forskellige reguleringsformer, eksempelvis optimalt forhold mellem luftsifte og brug af aktiv køling.
- Den meget store grad af temperaturafhængighed i modellen (og givet også i virkeligheden) kunne indikere, at der kunne være behov for at definere end slags kølegraddage, dvs. at man graddagekorrigerer behovet for køling på samme måde, som varmeforbruget graddagekorrigeres.



## 6 Analyse af kompressoreffektiviteter

### 6.1 Formål og metode

Som beskrevet i indledningen, er ét af de væsentlige problematikker at bestemme et generelt udtryk for kompressorernes effektivitet ved forskellige belastninger. Såfremt et kommende simuleringsprogram skal bestå af specifikke kompressordata fra leverandører, vil det dels være omkostningsfuldt at vedligeholde denne database, ligesom omkostningerne til fremskaffelse og programmering af data vil være omkostningsfuldt.

Med henblik på at undersøge, hvorvidt dette arbejde kunne simplificeres blev der foretaget en analyse af effektiviteten af de hyppigst anvendte kompressorer til køle- og frostformål. Herunder hører også en sammenligning af effektiviteten på tværs af kompressortyper samt i afhængighed af kompressorernes kapacitet.

Metoden til dette bygger på metoden anvendt i et tidligere projekt finansieret af Energistyrelsen /4/, ligesom data fra dette projekt er medtaget i denne undersøgelse. Disse data er desuden indgået i grundlaget for Kølebranchens Kvalitetssikringsordning (KKO).

Metoden består i, at der - for et større antal kompressorer af forskellig type og kapacitet - er indsamlet ydelsesdata og effektbehov i forskellige driftstilstande fra leverandørernes datablade. På baggrund af disse data beregnes effektivitet i standardiserede driftstilstande. Effektiviteten formuleres som regressionsudtryk pr kompressortype, pr. kølemiddel og kapacitet som uafhængige variable. Herved kan resultaterne udnyttes bekvemt ved efterfølgende simuleringer af køleanlægs ydeevne.

### 6.2 Kompressortyper

Tabel 6.1 viser de kompressortyper der er medtaget i undersøgelsen, samt hvorledes de er kategoriseret.

Type	Kategori	Titel
Køl	K.01	Hermetiske stempelkompressorer til køl, 1-trins
	K.02	Semihhermetiske stempelkompressorer til køl, 1-trins
	K.03	Åbne stempelkompressorer til køl, 1-trins
	K.04	Hermetiske scrollkompressorer til køl, 1-trins
Frost	K.05	Hermetiske stempelkompressorer til frost, 1-trins
	K.06	Semihhermetiske stempelkompressorer til frost, 1-trins
	K.07	Åbne stempelkompressorer til frost, 1-trins
	K.08	Semihhermetiske stempelkompressorer til frost, 2-trins
	K.09	Semihhermetiske booster stempelkompressorer til frost, 1-trins
	K.10	Åbne booster stempelkompressorer til frost, 1-trins
	K.11	Hermetiske scrollkompressorer til frost, 1-trins

Tabel 6.1. Kategorisering af kompressortyper.

Tidligere undersøgelser af kompressorernes effektivitet har vist, at der er behov for en yderligere inddeling i underkategorier i afhængighed af kompressorernes størrelse. Der anvendes derfor følgende underkategorier vist af tabel 6.2 for kompressorer til køl og frost.

Kategori	Underkategori	Titel
K.01	K.01.01	Slagvolumenstrøm $\leq 5 \text{ m}^3/\text{h}$ , driftspunkt CECOMAF-køl
	K.01.02	$5 \text{ m}^3/\text{h} < \text{Slagvolumenstrøm} \leq 25 \text{ m}^3/\text{h}$
	K.01.03	Slagvolumenstrøm $> 25 \text{ m}^3/\text{h}$
K.02	K.02.01	Slagvolumenstrøm $\leq 25 \text{ m}^3/\text{h}$
	K.02.02	Slagvolumenstrøm $> 25 \text{ m}^3/\text{h}$
K.03	K.03.01	Slagvolumenstrøm $\leq 25 \text{ m}^3/\text{h}$
	K.03.02	Slagvolumenstrøm $> 25 \text{ m}^3/\text{h}$
K.04	-	Alle
Kategori	Underkategori	Titel
K.05	K.05.01	Slagvolumenstrøm $\leq 5 \text{ m}^3/\text{h}$ , driftspunkt CECOMAF-køl
	K.05.02	Slagvolumenstrøm $> 5 \text{ m}^3/\text{h}$
K.06	K.06.01	Slagvolumenstrøm $\leq 25 \text{ m}^3/\text{h}$
	K.06.02	Slagvolumenstrøm $> 25 \text{ m}^3/\text{h}$
K.07	K.07.01	Slagvolumenstrøm $\leq 25 \text{ m}^3/\text{h}$
	K.07.02	Slagvolumenstrøm $> 25 \text{ m}^3/\text{h}$
K.08	-	Alle
K.09	K.09.01	Slagvolumenstrøm $\leq 25 \text{ m}^3/\text{h}$
	K.09.02	Slagvolumenstrøm $> 25 \text{ m}^3/\text{h}$
K.10	-	Alle
K.11	-	Alle

Tabel 6.2. Inddeling af kompressorer til køl og frost i underkategorier.

### 6.3 Data og databehandling

Behandlingen af data sker i en database, hvor leverandørernes input for kompressordata er indlagt. Strukturen af databasen for input er vist som eksempel af figur 6.1

<b>ITEM K.02.01.02</b>							
Fabrikat:		NN (eksempel)					
Type:		Semihæretisk stempelkompressor, 1-trins					
Driftspunkt:		-10°C/+30°C					
Overhedning:		25°C					
Underkøling:		0 K					
Kølemiddel:		R134a					
Nummer	Model	$Q_0$	$W_k$	$V_s$	COP	$\epsilon_c$	$\eta_c$
		[kW]	[kW]	[m <sup>3</sup> /h]	[-]	[-]	[-]
12	Kompressor #1	2,31	0,77	6,6	3,00	6,58	0,456
13	Kompressor #2	2,66	0,88	7,6	3,02	6,58	0,459
14	Kompressor #3	3,33	1,11	9,5	3,00	6,58	0,456
15	Kompressor #4	3,85	1,33	11,3	2,89	6,58	0,440
16	Kompressor #5	3,85	1,29	11,3	2,98	6,58	0,454

Figur 6.1. Eksempel på struktur af input i databasen.

I figuren refererer de viste størrelser som:

- $Q_0$  er kuldeydelse iht. ISO 9303 [kW].
- $W_k$  er optagen eleffekt iht. ISO 9303 [kW].
- $V_s$  er slagvolumenstrøm [m<sup>3</sup>/h].
- COP er Coefficient Of Performance ( $COP = Q_0/W_k$ ) [-].
- $\epsilon_c$  er effektfaktoren for en Carnot proces [-].
- $\eta_c$  er carnotvirkningsgraden ( $\eta_c = COP/\epsilon_c$ ) [-].

Figur 6.2 viser et eksempel strukturen for databasen, idet der er tale om output.

Nummer	$\eta_{C,KORR}$	$\eta_{C,NORM}$	Afvigelse	Opfylder normkrav?
	[-]	[-]	[-]	[ja/nej]
12	0,495	0,482	0,013	ja
13	0,499	0,486	0,013	ja
14	0,495	0,495	0,000	ja
15	0,478	0,497	-0,019	nej
16	0,493	0,497	-0,004	nej

Figur 6.2. Eksempel på struktur af output i databasen.

hvor:

- $\eta_{C,KORR}$  er den korrigerede Carnotvirkningsgrad [-].
- $\eta_{C,NORM}$  er den minimalt tilladelig Carnotvirkningsgrad iht. normkrav [-].
- Afvigelse er afvigelsen mellem  $\eta_{C,KORR}$  og  $\eta_{C,NORM}$  [-].

Databasen indeholder oplysninger om i alt 791 kompressorer. Fordelingen af kompressorer mellem hovedkategorierne fremgår af tabel 6.3.

Kategori	K.01	K.02	K.03	K.04	K.05	K.06	K.07	K.08	K.09	K.10	K.11
Antal	152	208	44	35	54	178	42	25	37	7	9

Tabel 6.3. Fordeling af kompressorer på hovedkategorier i database.

#### 6.4 Kompressorresultater

Som beskrevet ovenfor, har tidligere undersøgelser af kompressorernes effektivitet vist, at effektiviteten ofte er stærkt afhængig af kompressorernes størrelse. Det er derfor valgt generelt at formulere kravet om effektivitet på følgende måde:

Carnotvirkningsgraden for kompressoren skal for alle nye kompressorer være lig med eller større end normkravet til kompressorernes Carnot-effektivitet.

Carnot virkningsgraden udregnes som:

$$\eta_c = \frac{COP}{\varepsilon_c}$$

hvor

- $\eta_c$  er Carnotvirkningsgraden [-].
- COP er Coefficient Of Performance (effektfaktor) [-].
- $\varepsilon_c$  er effekt faktoren for en Carnot-kredsproces [-].

Normkravet til effektfaktoren beregnes som:

$$\eta_{C,NORM} = C + D \cdot \dot{V}_S \quad [6.2]$$

hvor:

- $\eta_{C,NORM}$  er normkravet til kompressorernes Carnot-effektivitet [-].
- $\dot{V}_S$  er kompressorens slagvolumenstrøm [ $\text{m}^3/\text{h}$ ].
- C er en regressionskonstant [-].
- D er en vægtningsfaktor for slagvolumenstrøm [ $\text{h}/\text{m}^3$ ].

De følgende tabeller 6.4-6-6 viser resultaterne af konstanterne til beregning af normkravet. Endvidere er vist en værdi for faktoren N. Denne værdi korrigerer faktorerne for, at forskellige kølemidler har forskellige fysiske egenskaber, der medfører at de som udgangspunkt er bedre- eller dårligere kølemidler.

K.01/02/- 03/04	KOMPRESSORKATEGORIER								
	KONSTANTER	K.01.01	K.01.02	K.01.03	K.02.01	K.02.02	K.03.01	K.03.02	K.04.01
<b>C</b>	0,285	0,384	0,499	0,455	0,535	0,380	0,600	0,507	
<b>D</b>	0,0256	0,0026	0,0000	0,0032	0,0000	0,0088	0,0000	0,0000	0,0000
<b>KØLEMIDDEL</b>	<b>VÆRDI FOR FAKTOREN "N" VED FORSKELLIGE KØLEMIDLER</b>								
<b>R22</b>	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
<b>R134a</b>	1,030	1,025	1,005	1,086	1,067	1,000	1,000	1,123	
<b>R404A</b>	1,000	1,024	1,036	1,020	1,035	1,000	1,000	0,923	

Tabel 6.4. Konstanter og korrektionsfaktorer for kompressorer i kategori K.01 - K.04.

K.05/06/07/08	KOMPRESSORKATEGORIER							
	KONSTANTER	K.05.01	K.05.02	K.06.01	K.06.02	K.07.01	K.07.02	K.08.01
<b>C</b>	0,220	0,334	0,379	0,500	0,300	0,540	0,373	
<b>D</b>	0,0224	0,0000	0,0049	0,0001	0,0096	0,0000	0,0010	
<b>KØLEMIDDEL</b>	<b>VÆRDI FOR FAKTOREN "N" VED FORSKELLIGE KØLEMIDLER</b>							
<b>R22</b>	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	
<b>R134a</b>	1,000	1,000	1,122	1,170	1,000	1,000	1,000	
<b>R404A</b>	0,995	1,000	0,920	0,975	1,000	1,000	1,000	

Tabel 6.5. Konstanter og korrektionsfaktorer for kompressorer i kategori K.05 - K.08.

<b>K.09/10/11</b>	<b>KOMPRESSORKATEGORIER</b>			
<b>KONSTANTER</b>	<b>K.09.01</b>	<b>K.09.02</b>	<b>K.10.01</b>	<b>K.11.01</b>
<b>C</b>	0,325	0,393	0,479	0,439
<b>D</b>	0,0031	0,0001	0,0000	0,0027
<b>KØLEMIDDEL</b>	<b>VÆRDI FOR FAKTOREN "N" VED FORSKELLIGE KØLEMIDLER</b>			
<b>R22</b>	1,000	1,000	1,000	1,000
<b>R134a</b>	1,000	1,000	1,000	1,000
<b>R404A</b>	1,000	1,000	1,000	1,000

Tabel 6.6. Konstanter og korrektionsfaktorer for kompressorer i kategori K.09 - K.11.

Bilag 3 viser regressionslinjerne for Carnotvirkningsgraderne indtegnet sammen med de reelle værdier af Carnotvirkningsgraden som funktion af slagvolumenstrømmen.

Som konklusion kan det siges, at det er muligt at opstille nogle generelle udtryk for Carnotvirkningsgraden som funktion af kølemiddel og størrelse – defineret ved slagvolumenstrømmen – der i rimelig grad gengiver reelle værdier for Carnotvirkningsgraden.

I teorien er det derfor muligt, at anvende de opstillede regressionsudtryk til beregning af effektoptag ved et givent kuldebehov. Disse forhold er imidlertid ikke undersøgt, og specielt kompressorernes ydeevne og effektoptag ved delast kan give problemer at estimere. Der lægges derfor op til, at der indgår en undersøgelse af dette forhold i forbindelse med udvikling af et værktøj.

## 7 anbefalinger til eventuelt videre arbejde med del 2 i projektet

### 7.1 Simuleringer på supermarkedsanlæg

Simuleringer på køleanlæg til supermarkeder har vist sig at være noget omfattende i den forstand, at antallet af input stiger i takt med antallet af kølesteder. Dette betyder, at en simulering på et mindre køleanlæg til supermarkeder kan foretages indenfor en meget kort tidshorisont, mens simuleringer på køleanlæg til store supermarkeder kræver væsentligt flere input.

I demo-programmet der er udviklet til simuleringer på køleanlæg er der indlagt en mulighed for en defineret kølebelastning, således at bruger kan "slippe" for at indtaste data, der på forhånd ikke er kendt. Dette giver naturligvis en absolut afvigelse i forhold til et eventuelt registreret forbrug, men de relative afvigelser ved beregninger via forskellige anlægskonstruktioner og ved forskellige besparelsetiltag er markant mindre.

Det vil derfor være simpelt, og ikke særligt tidskrævende, at foretage konsekvensberegninger af årsenergiforbruget gennem anvendelse af forskellige anlægsdesign eller ved forskellige besparelsetiltag – så længe kravet til absolut nøjagtighed ikke er et meget rigidt krav. Med dette forstås en nøjagtighed ved beregning af energiforbruget der er bedre end  $\pm 10\%$ .

Så snart nøjagtigheden ønskes større, kræver det er noget større tidsforbrug – men absolut et tidsforbrug der er acceptabelt set i forhold til tidsforbrug der normalt anvendes til dokumentation indenfor KKO-ordningen.

De foretagne simuleringer viser en simuleringsnøjagtighed indenfor 10% - bedre for de mindre anlæg. Det vil forventeligvis også være i dette leje af nøjagtigheden af fremtidige simuleringer må forventes at ligge. De største unøjagtigheder ved simuleringen er identificeret som følgende:

- Afvigelser fra et standardår til det aktuelle simuleringsår (2003).
- "Unøjagtig" angivelse af butikkens driftsprofil og dermed den ønskede kuldeydelse.
- Unøjagtigheder ved beregning af kompressorernes ydelse og effektoptag ved dellast.

Den "unøjagtige" angivelse af butikkens driftsprofil er primært et spørgsmål om, at en meget nøjagtig angivelse af driften på de enkelte kølesteder vil tidsmæssigt være betydelig. Den ønskede nøjagtighed her er således en brugermæssig afvejning af den ønskede nøjagtighed kontra det tidsforbrug der ønskes investeret. Det er imidlertid muligt at opnå en – stort set – vilkårlig nøjagtighed, såfremt dette tidsmæssigt kan forsvares.

Anbefalingerne på basis af de opnåede erfaringer med simuleringer på supermarkedsanlæg er derfor følgende:

- Det er muligt, på relativ simpel vis, at beregne årsenergiforbruget på et køleanlæg til supermarketter med en rimelig grad af nøjagtighed.
- Nøjagtigheden af beregningen afhænger primært af brugerens input – og dermed tidsforbrug. I de fleste tilfælde vil en meget nøjagtig beregning ikke være nødvendig, og tidsforbruget til at angive det ønskede input derfor ikke så stort.
- Den relative nøjagtighed af konsekvenserne ved at foretage forskellige besparelsetiltag er langt større – og sandsynligvis mere interessant.
- Den største beregningsmæssige usikkerhed består i beregning af kompressorens eller kompressorernes effektivitet ved forskellige delastssituationer, hvilket der bør arbejdes videre med at få minimeret.
- Det anbefales på basis af erfaringerne at der arbejdes videre med et nyt projekt, der har til formål at lave et simuleringsprogram til beregning af årsenergiforbrug, besparelser ved energimæssige tiltag, tilbagebetalingstider, anlæggets levetidsomkostninger, mv.
- En prototype til et sådanne værktøj er udviklet i dette arbejde, og der kan relativt simpelt bygges videre på disse tankegange i et nyt projekt.

## 7.2 Simuleringer på luftkonditioneringsanlæg

Rent modelmæssigt er der en vis mængde "logik" der skal fastsættes for, hvornår køleanlægget er aktivt, hvorledes reguleringen af indblæsningstemperaturen foregår samt hvorledes ændring i luftmængden påvirker dette. Disse problemer har imidlertid vist sig overkommelige, og den opstillede model giver en lang række informationer omkring fordelingen af energiforbruget i henhold til den valgte styringsstrategi.

Ved sammenligning af simuleringsresultater med målinger, kan der ikke siges noget afgørende om nøjagtigheden. Der var god overensstemmelse mellem målinger og simuleringer med TRY-data, mens overensstemmelsen mellem målinger og simuleringer med reelle temperatur og fugtighedsdata var dårlig. Forventningen var, at det ville forholde sig helt modsat.

Årsagen er, at det beregnede behov for aktiv køling i MEGET høj grad er afhængigt af korrekte belastningsdata. En forudsætning for valide simuleringsresultater er således, at der haves et meget nøjagtigt "billede" af belastningen i bygningen – et billede der rent faktisk kun sjældent haves eller kan opnås.

Simuleringerne kan i praksis nok primært anvendes som sammenligning af energiforbrug gennem anvendelse af forskellige reguleringsformer, eksempelvis optimalt forhold mellem luftskifte og brug af aktiv køling, i stedet for at forsøge at opnå en så høj grad af overensstemmelse mellem model og virkelighed.



Den meget store grad af temperaturafhængighed i modellen (og givet også i virkeligheden) indikerer, at der er behov for at definere en slags kølegraddage, dvs. at man graddagekorrigerer behovet for køling på samme måde, som varmekonsumet graddagekorrigeres.

### **7.3 Estimering af kompressorers ydeevne og effektivitet**

For at opnå rimelig nøjagtighed på simuleringen skal der være et godt kendskab til kompressorernes isentropiske virkningsgrad samt volumetriske virkningsgrad. Dette kan blive et problem, hvis man f.eks. skal sammenligne en scrollkompressor med en stempel kompressor i samme kredsløb. Virkningsgradskurverne for scrollkompressorerne er meget specielle, og det er næppe muligt at opstille et simpelt udtryk for dette.

Af samme årsag blev der, i dette projekt, iværksat en mindre undersøgelse med henblik på at estimere, hvor let en opgave dette vil være. Resultatet af dette arbejde viser, at det er muligt at opstille nogle generelle udtryk for Carnotvirkningsgraden som funktion af kølemiddel og størrelse – defineret ved slagvolumenstrømmen – der i rimelig grad gengiver reelle værdier for Carnotvirkningsgraden. I teorien er det derfor muligt, at anvende de opstillede regressionsudtryk til beregning af effektoptag ved et givent kuldebehov. Disse forhold er imidlertid ikke undersøgt, og specielt kompressorernes ydeevne og effektoptag ved delast kan give problemer at estimere. Der lægges derfor op til, at der indgår en undersøgelse af dette forhold i forbindelse med udvikling af et værktøj.

### **7.4 Anvendelse af programmet EES**

Prototypeværktøjet er udarbejdet i programmeringssproget EES. Dette har givet en række problemer, der ikke umiddelbart synes at kunne løses gennem anvendelse af EES alene. Disse problemer retter sig primært mod brugerfladen samt databasefaciliteter. Et fremtidigt værktøj vil derfor, sandsynligvis med fordel, bestå af en kombination af edb-programmer, hvor selve beregningerne foretages i EES, mens brugerflader og øvrige visuelle I/O-grænseflader opbygges i et databasebaseret program.

Programmet vil næppe kunne anvendes til hurtig sammenligning af forskellige anlægstyper, da beregningstiden sandsynligvis er for lang. Ved simulering af årsenergiforbruget på store supermarkeder har beregningstiden vist sig at være ca. 30 minutter. I fremtidigt program skal der laves et simuleringsværktøj, der minimerer beregningstiden betragteligt. Dette afhænger naturligvis af mængden af input der varierer, beregningens nøjagtighed samt øvrige parametre, som der kan optimeres på.

## 8 Konklusion

Formålet med det samlede projekt er at udarbejde et værktøj til, på simpel vis, at sammenligne økonomien for alternative udformninger af køleanlæg med hinanden, når både investerings- og driftsomkostningerne over anlæggets levetid tages med i betragtning.

Med henblik på at undersøge, hvorvidt det overhovedet er muligt at foretage simulering af årsenergiforbruget med en rimelig grad af nøjagtighed kombineret med et rimeligt tidsmæssigt forbrug til simuleringerne, blev projektet opdelt i 2 dele, hvor formålet med den første del af projektet – som denne rapport dækker – er, at undersøge:

- Hvilke anlægstyper vil man forventeligvis se i fremtiden i Danmark.
- Hvor høj en grad af nøjagtighed kan der opnås ved simuleringer af energiforbrug på køleanlæg, hvor der er foretaget målinger.
- Anbefalinger til det videre projektarbejde.

De overordnede konklusioner omkring fremtidige anlægstyper er følgende:

- Anvendelsen af anlæg med HFC kølemidler er i Danmark på vej ud – dels grundet lovgivning og dels grundet udvikling af anlæg med naturlige kølemidler. På mindre anlæg, vil man dog stadig se anvendelsen af HFC, men fyldningen i anlæggene vil være begrænset.
- Systemer bestående af en "primær køleunit" med en begrænset kølemiddelmængde (evt. HC'er eller HFC'ere), hvor der varmeveksles til "den varme og den kolde side". I disse anlæg vil varmevekslerne primært være kompakte pladevarmevekslere. Som energibærer på den varme side, vil (frostsikret) vand i forbindelse med en tørkøler være dominerende. Energibæreren på den kolde side kan både være traditionelt frostsikret vand som propylenglykol og faseskiftende medier som binær is og CO<sub>2</sub>. Sidstnævntes udbredelse er stærkt stigende indenfor køleanlæg til supermarkeder. Der syntes ikke at være noget gennembrud på vej for anvendelse af binær is i den nærmest fremtid i Danmark.
- For lavtemperatursystemer (frost  $\approx$  - 30 °C) vil kaskadesystemer, hvor der er CO<sub>2</sub> på lavtryksdelen få stigende udbredelse.
- Anvendelsen af elektroniske komponenter vil øges, typisk ved fjernovervågning af anlæg, frekvensomformerstyring af komponenter. Anvendelsen af systemer til intelligent styring af køleanlæggene vil øges.

De overordnede konklusioner omkring målinger og simuleringer er følgende:

- Der er foretaget målinger på 3 køleanlæg til supermarkeder. Køleanlæggene er udvalgt således, at de dækker over forskellige anlægstyper og størrelser som man forventeligvis vil se i fremtiden.
- Der er reelt foretaget målinger på 1 luftkonditioneringsanlæg, idet det målingerne på det andet anlæg var desværre begrænset af fejl i loggeudstyret.
- Det er muligt, på relativ simpel vis, at beregne årsenergiforbruget på et køleanlæg til supermarkeder med en rimelig grad af nøjagtighed. Nøjagtigheden af beregningen af-

hænger primært af brugerens input – og dermed tidsforbrug. I de fleste tilfælde vil en meget nøjagtig beregning ikke være nødvendig, og tidsforbruget til at angive det ønskede input derfor ikke så stort. Den relative nøjagtighed af konsekvenserne ved at foretage forskellige besparesestiltag er langt større – og sandsynligvis mere interessant.

- Den største beregningsmæssige usikkerhed ved beregning på supermarkeder består i beregning af kompressorens eller kompressorernes effektivitet ved forskellige delastsituationer, hvilket der bør arbejdes videre med at få minimeret.
- Det er relativt simpelt at opbygge en generel model for luftkonditioneringsanlæg. Simuleringsresultaterne viste imidlertid, at være ekstremt følsomme overfor selv mindre ændringer i temperatur og fugt SAMT belastningsdata fra kontoret. Reelle belastningsdata er i øvrigt næppe tilgængeligt for særlig mange kontorer, og simuleringsværktøjet vil derfor primært have nytte i forbindelse med optimering af styrestrategi, eksempelvis anvendelse af den mest optimale luftmængde.
- En metode til at minimere ovenstående forhold kunne være at definere en slags "gradkøledage", hvor et energiforbrug til luftkonditionering blev korrigeret for forskelle i temperatur i årets timer.
- Typisk er forbruget til aktiv køling til luftkonditionering i øvrigt langt mindre end forbruget til nedkøling af serverrum, også selvom muligheden for frikøling er til stede. Det faktum, at elforbruget til ventilation er langt større end elforbruget til luftkonditionering forstærkes blot behovet for at anvende et simuleringsværktøj til at optimere forholdet mellem ventilation og køling.

Anbefalingerne til det videre arbejde er følgende:

- Det anbefales, på basis af de opnåede erfaringer, at der arbejdes videre med et nyt projekt, der har til formål at lave et simuleringsprogram til beregning af årsenergiforbrug, besparelser ved energimæssige tiltag, tilbagebetalingstider, anlæggets levetidsomkostninger, mv.
- En prototype til et sådanne værktøj er udviklet i dette arbejde til supermarkeder, og der kan relativt simpelt bygges videre på disse tankegange i et nyt projekt.
- En prototype er ligeledes lavet til luftkonditioneringsanlæg, men det kræver en del videreudvikling for at kunne anvendes af en typisk bruger. Dette vil dog relativt enkelt kunne foretages, med de ovenfor nævnte begrænsninger.
- Prototypeværktøjet er udarbejdet i programmeringssproget EES. Dette har givet en række problemer, der ikke umiddelbart synes at kunne løses gennem anvendelse af EES alene. Et fremtidigt værktøj vil derfor, sandsynligvis med fordel, bestå af en kombination af edb-programmer, hvor selve beregningerne foretages i EES, mens brugerflader og øvrige visuelle I/O-grænseflader opbygges i et databasebaseret programmel.

## 9 Referencer

- /1/: Hansen, T. M., Hansen, S.: *"Analyse af Danmarks elforbrug til køling opdelt på anvendelser og anlægstyper – forbrug og besparelsesmuligheder"*, Rapport fra EFP2000-projektet *"Energioptimal Styring og Overvågning af køleanlæg"*, Institut for Mekanik, Energi og Konstruktion, Danmarks Tekniske Universitet, 2002 ISBN 87-7475-254-5.
- /2/: Jensen, J.B., Lundager, F., Jensen, M.L.: *"CFC-udfasning – konsekvenser for drift og energiforbrug i køleanlæg"*, DEFU Teknisk rapport 343, Danske Elværkers Forening, 1994.
- /3/: Høgaard-Knudsen, H.J.: *"-"*, Danmarks Tekniske Universitet, Miljøprojekt Nr. 931 2004, Miljøstyrelsen.
- /4/: Jakobsen, A. & Rasmussen, B.: *"Energitest af remote køle- og frostanlæg i handels- og servicesektoren – Beregning af normenergiforbrug"*, Energistyrelsen, 1998.

## Bilag 1: Specifikation af PC-baseret-værktøj

### B.1.1 Generelt om værktøjet

Dette bilag indeholder beskrivelser og specifikationer af et PC-baseret værktøj til nem, "standardiseret" og hurtig beregning af energimæssige og økonomiske forhold for alternative kølesystemudformninger i beslutningsfasen. Afsnittet skal naturligvis betragtes som værende foreløbige, og er tiltænkt anvendt som oplæg for en eventuel fortsættelse af projektet, dvs. igangsættelse af projektets del 2.

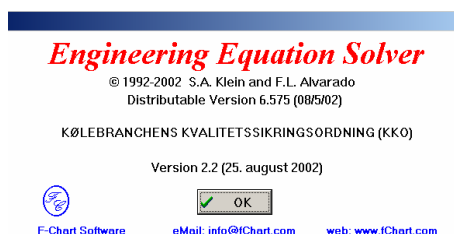
#### B.1.1.1 Medie

Den bedste løsning er formodentlig, at PC-værktøjet findes på en central server og aktiveres via Internettet med et password, idet man på den måde effektivt kan sikre, at der kun findes én løbende opdateret udgave samtidig med at distributionsproblemer minimeres.

PC-værktøjet skal også kunne installeres "normalt" på en PC'er af "normal" type via en CD eller gennem download fra Internettet.

#### B.1.1.2 Programmeringssprog, mm

Værktøjet bør udarbejdes i EES-programmet<sup>4</sup> for at efterfølgende at kunne blive integreret i såvel CoolPack-programmet<sup>5</sup> som i KKO-programmet<sup>6</sup>.



#### B.1.1.3 Brugerflade

Det er af overordentlig stor betydning at det er nemt, hurtigt og overskueligt at anvende PC-værktøjet. Det bør følge systemet i de nævnte programmer. Det skal være muligt at følge beregningsgangen i detaljer. I bilag 2 er brugerfladen ved ét af KKO-programmerne vist, som et "godt" eksempel.

---

4 EES er en forkortelse for Engineering Equation Solver, som forhandles af F-Chart Software

5 CoolPack-programpakken er udviklet af Danmarks Tekniske Universitet - et gratis "freeware-program"

6 KKO-programpakken er udviklet af Kølebranchens KvalitetssikringsOrdning og distribueret til medlemmerne

### B.1.1.3 Udskrift

Udskrifter skal evt. findes i to udgaver; én forenklet udgave med hoveddata for ejer/køber/bruger og en fuldstændig detaljeret udgave for rådgivere og kølefirmaer.

Udskrifter skal altid indeholde brugerens navn, programversion og udskrivningsdato.

## B.1.2 Overordnet opbygning af Pc-værktøj

### B.1.2.1 Kuldeydelse med døgn- og årsprofiler

Kølesystemets kuldeydelse skal kunne indgives som input med døgnprofiler for 5 forskellige driftssituationer svarende til hverdag, lørdag, søndag, fredag, specialdag med variationer på timebasis.

Ud fra en kalender med 52 uger skal man kunne anvende døgnprofilerne og dermed skabe et normalår.

### B.1.2.2 Det varmeoptagende medies årsprofil

Temperaturforløbet af det medie, der benyttes til varmeafgivelse fra kølesystemets varme side skal kunne indgives på timebasis.

Der skal findes mulighed for at hente og/eller skabe profiler for tør og våd luft, for brøndvand, køletårns vand, havvand eller andre varmeoptagende medier, der typisk anvendes.

Det skal være muligt at kunne specificere sit eget årsprofil, hvis det ønskes.

### B.1.2.3 Kølesystemets udformning

Man skal kunne vælge forskellige systemopbygninger i form af et valg af hovedkomponenter, der giver mulighed for at arbejde med følgende anlægskoncepter:

- Ettrinssystem
- Totrinssystem
- Kaskadesystem
- Indirekte system på både kold og varm side.

Hovedkomponenterne skal kunne specificeres simpelt og omfatte følgende:

- Kølere til luft, væske eller fast stof
- Pumper
- Sekundært rørsystem på kold side med frem- og returløb

- Fordampere til tørt eller vådt system til luft, væske eller fast stof
- Kompressorer af stempel-, scroll- og skruetype
- Primært rørsystem med sugeside, trykside og væskeside
- Mellemkølere af åben og lukket type
- Kaskadevekslere
- Kondensatorer til luft, væske, luft/væske og fast stof
- Sekundært rørsystem på varm side med frem- og returløb
- Varmeafgivere: luft, væske, luft/væske og fast stof

Til designet af kølesystemer skal man kunne indgive hovedkomponenternes karakteristika, samt designparametre som temperaturdifferens over varmevekslere, tryktab i rørstrækninger osv. Endvidere skal angives de forskellige styrings- og reguleringsforhold, eksempelvis:

- ON/OFF-drift og dertil hørende driftstidetal
- Hastighedsregulering
- Mest belastede kølested
- Trykreguleringsventiler til fordampertryk, kondensatortryk, hotgas-bypass, ...

#### *B.1.2.4 Beregning af årsenergiforbrug*

Programmet skal kunne beregne anlæggets årsenergiforbrug på basis af de valgte parametre.

#### *B.1.2.5 Beregning af årsøkonomi*

På basis af årsenergiforbruget skal programmet kunne beregne årlig driftsøkonomi med krav til tilbagebetalingstid som input-parameter eller som output-parameter.

### **B.1.3 Databaser, default-værdier**

For hurtig og effektiv anvendelse af PC-værktøjet er det vigtigt at flest mulige opslagsdata findes i tilgængelige databaser eller som defaultværdier direkte i programmerne. I det følgende er ønskerne listet op.

#### *B.1.3.1 Typiske døgn- og årsprofiler for kuldebelastninger*

Typiske eksempler på driftsprofiler for udvalgte normale anvendelser, såsom;

- Køle- og frostrum
- Supermarkedsanlæg
- Luftkonditioneringsanlæg (A/C)
- Proceskølesystem
- ...

Omfanget fastlægges med henblik på at "dække" størsteparten af behovet. Det skal være muligt – og let – at tage fat i et eksempel og tilpasse det til aktuelle forhold.

#### *B.1.3.2 Det varmeoptagende medies årsprofil*

Der skal direkte kunne hentes typiske profiler for tør og våd luft, for brøndvand, køletårsvand, havvand eller andre varmeoptagende medier, der typisk anvendes.

Der skal ligge standardprofiler svarende til TRY, DRY og årsprofilerne for de sidste 3 år (1999-2000-2001) for tør og våd udeluft.

Der skal ligge standardprofiler for brøndvand, køletårsvand, havvand for de sidste 3 år (1999-2000-2001) vandtemperaturer.

#### *B.1.3.3 Kølesystemets udformning*

Man skal kunne vælge blandt typiske systemopbygninger med forvalg af hovedkomponenter, der giver mulighed for på enkel vis at tilpasse til andre anlægskoncepter. Følgende systemopbygninger, hovedkomponenter og reguleringsforhold bør indgå:

##### Systemopbygninger:

- Køle- og frostrum
- Supermarkedsanlæg
- Luftkonditioneringsanlæg (A/C)
- Proceskølesystem

##### Hovedkomponenter:

- Kølere til luft, væske eller fast stof
- Pumper
- Sekundært rørsystem på kold side med frem- og returløb
- Fordampere til tørt eller vådt system til luft, væske eller fast stof
- Kompressorer af stempel-, scroll- og skruetype
- Primært rørsystem med sugeside, trykside og væskeside
- Mellemkølere af åben og lukket type
- Kaskadevekslere
- Kondensatorer til luft, væske, luft/væske og fast stof
- Sekundært rørsystem på varm side med frem- og returløb
- Varmeafgivere: luft, væske, luft/væske og fast stof

##### Styrings- og reguleringsforhold:

- ON/OFF-drift og dertil hørende driftstimal



- Hastighedsregulering
- Mest belastede kølested
- Trykreguleringsventiler til fordampertryk, kondensatortryk, hotgas-bypass, ...

#### **B.1.4 Programstruktur**

Programstrukturen består i valg på flere niveauer, således at bruger først foretager overordnet valg af anlægstypen. Efter dette valg kan alene foretages underliggende valg hørende til denne anlægstype. Der opereres, i denne specifikation, umiddelbart med 3 niveauer. Dette kan dog ændres, såfremt flere eller færre niveauer er mest hensigtsmæssigt. De 3 niveauer er følgende:

1. Trin 1: Valg af anlægsgrundtype
2. Trin 2: Fastlæggelse af hovedlayout
3. Trin 3: Data for enkeltkomponenter

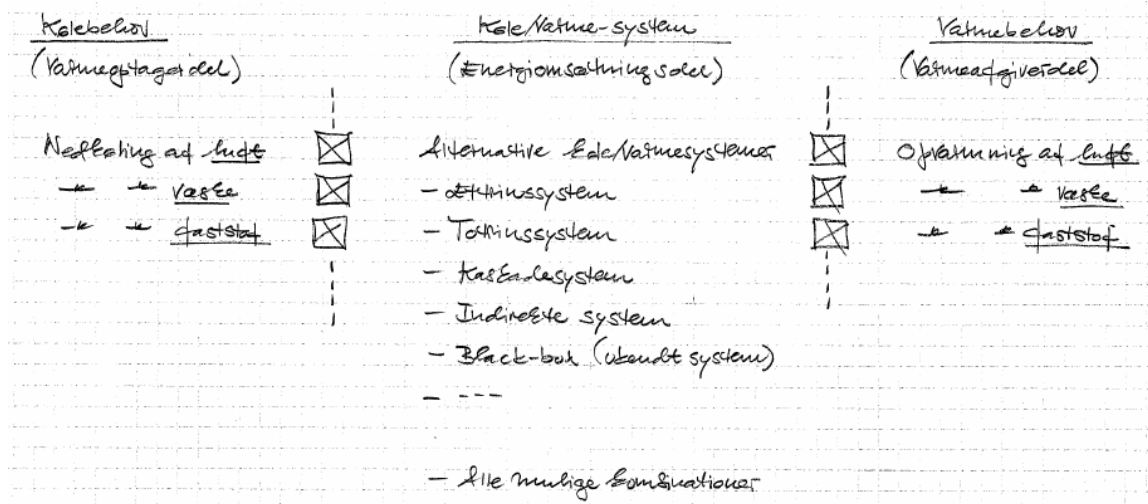
Idet følgende gennemgås de enkelte niveauer – dels med skitser og dels med tiltænkt indhold.

##### *B.1.4.1 Trin 1: Valg af anlægsgrundtype*

Der vælges type for følgende dele:

1. Varmeoptagende del (nedkøling af luft, væske, faststof)
2. Energiomsættende del (1-trin, 2-trin, kaskade, indirekte system, black-box)
3. Varmeafgivende del (opvarmning af luft, væske, faststof)

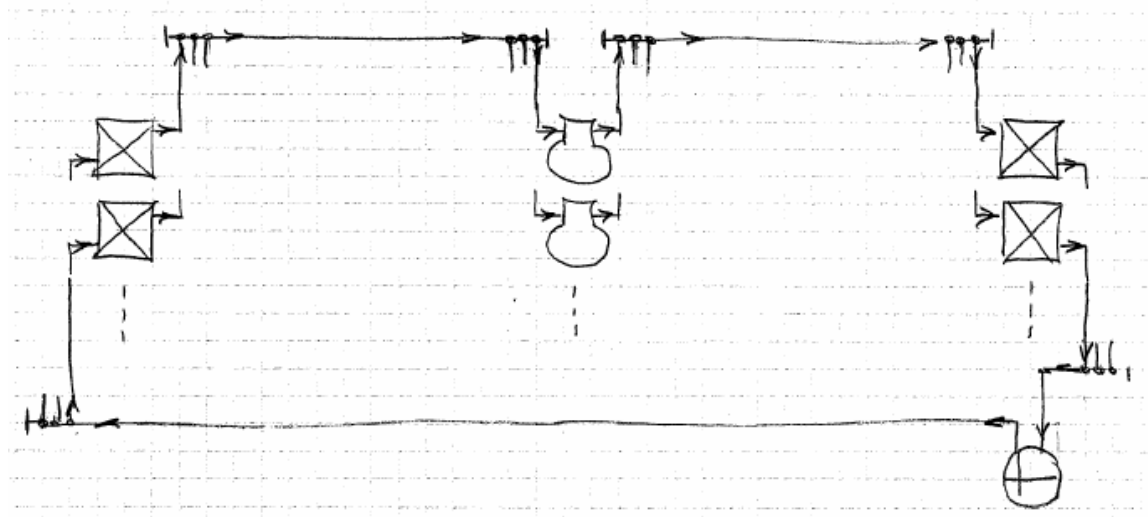
Valgene er illustreret af følgende figur:



B.1.4.2 Trin 2: Fastlæggelse af hovedlayout

Når anlægstypen er valgt, skal hovedlayoutet fastlægges. For et 1-trinssystem, vist af nedenstående figur, skal der kunne vælges følgende:

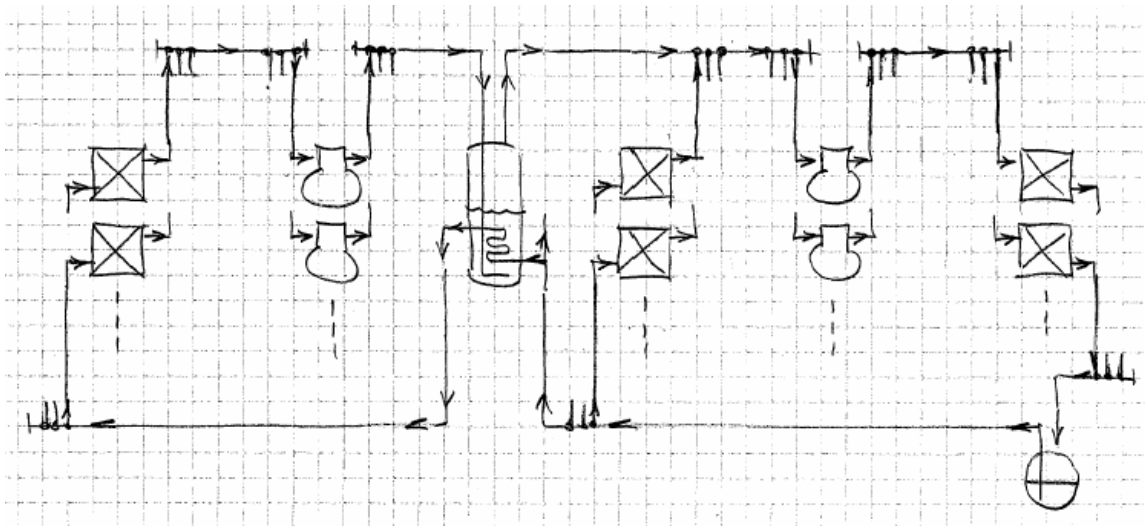
- Kølemiddel
- Antal parallelkoblede fordampere
- Antal parallelkoblede kompressorer
- Antal parallelkoblede kondensatorer.



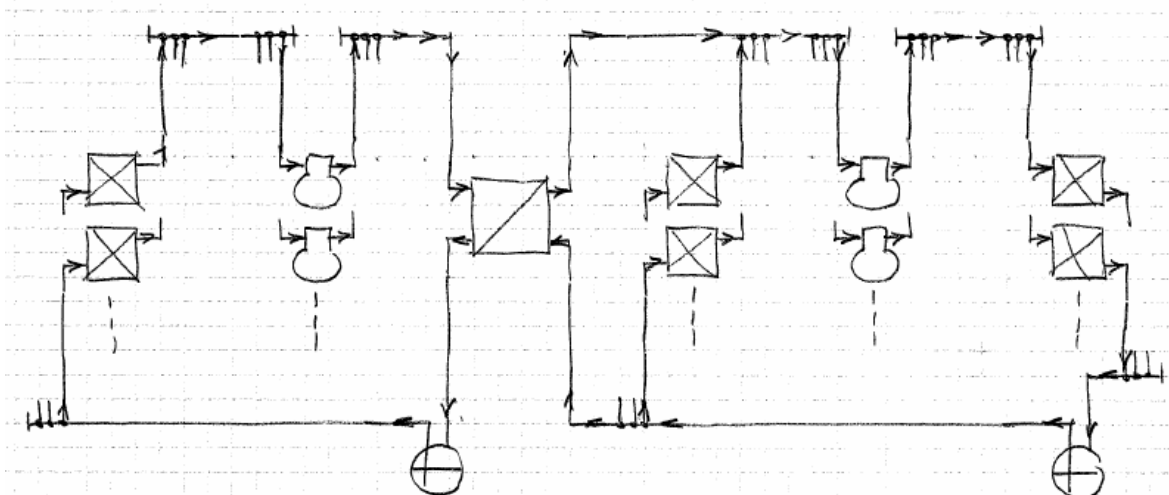
For et 2-trinssystem, vist af nedenstående figur, skal der kunne vælges følgende:

- Kølemiddel
- Antal parallelkoblede fordampere lavtryk
- Antal parallelkoblede kompressorer lavtryk

- Antal parallelkoblede mellemkølere
- Antal parallelkoblede fordampere mellemtryk
- Antal parallelkoblede kompressorer mellemtryk
- Antal parallelkoblede kondensatorer



For et kaskadesystem, vist af nedenstående figur, skal der kunne vælges følgende:



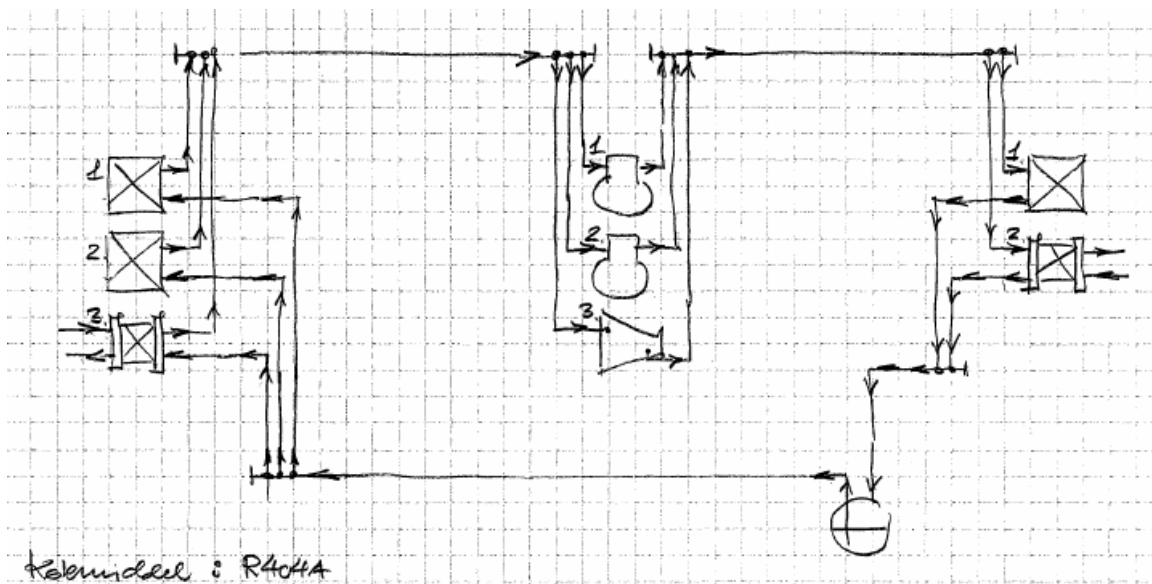
- Kølemiddel nederst
- Antal parallelkoblede fordampere nederst
- Antal parallelkoblede kompressorer nederst
- Antal parallelkoblede kaskadekølere
- Kølemiddel øverst
- Antal parallelkoblede fordampere øverst
- Antal parallelkoblede kompressorer øverst
- Antal parallelkoblede kondensatorer

For et black-box system skal forstås et system, hvor selve opbygningen af kølekredsen ikke angives. Dette er skitseret nedenfor sammen med en angivelse af, hvilke input der skal angives:



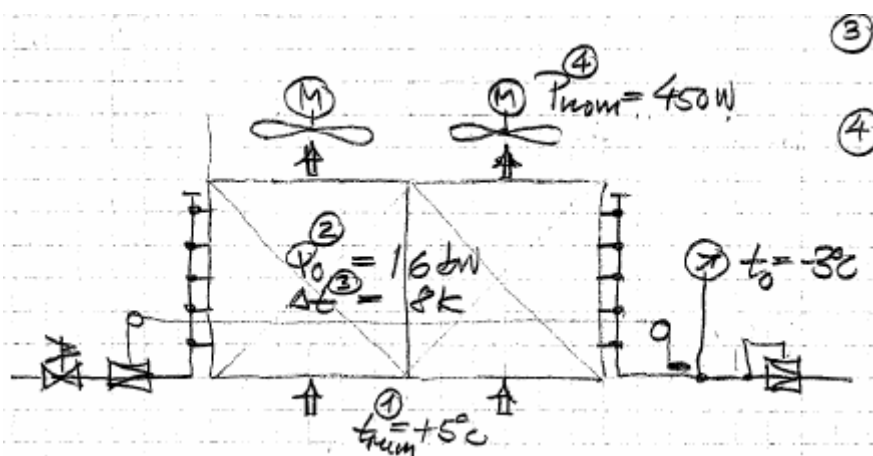
B.1.4.3 Trin 3: Data for enkeltkomponenter

I det følgende er skitseret et anlæg, der er valgt på baggrund af de 2 foregående trin – anlægsgrundtype og hovedlayout. Her skal der efterfølgende gives data for hovedkomponenter.



I det følgende er alene, af illustrative grunde, valgt eksempler på fordampere.

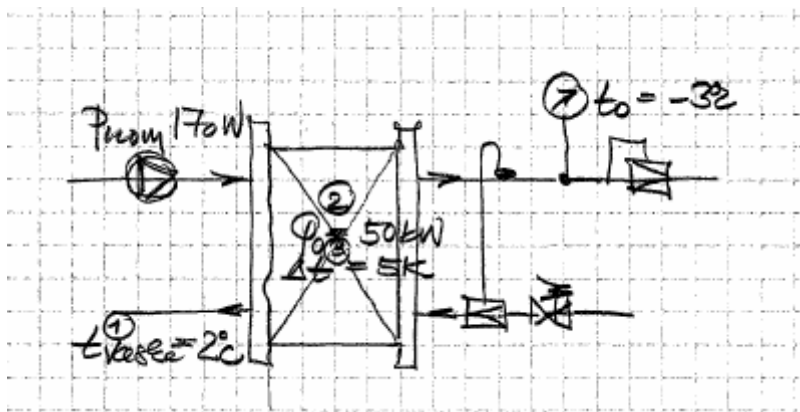
Nedenfor vises en skitse for en fordampere med luft med de data der skal angives beskrevet efterfølgende:



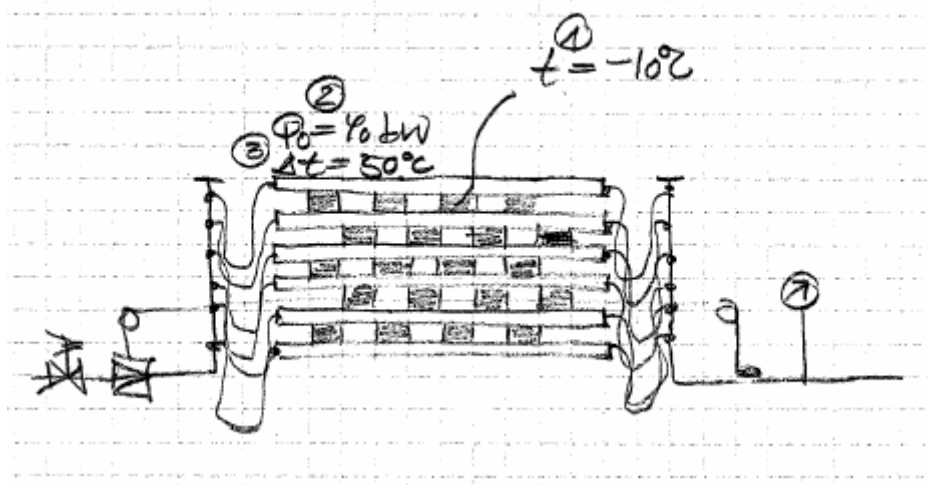
- Dimensionerende rumtemperatur ( $t_{\text{luft,tilgang}}$ )
- Kølebelastning: dimensionerende køleydelse (kW), døgnprofil (kW/h)
- Dimensionering:  $\Delta t$  ( $t_{\text{luft,tilgang}} - t_o$ ,  $t_o$  = mætningstemperatur ved trykket efter fordampere)
- Konstruktion: rørbundet (coil), m./u. lameller
- Luftcirkulation: m/u blæsere
- Blæsere: Antal, optaget eleffekt (evt. nominel motoreffekt)
- Kølemiddeltilførsel: tørt system, oversvømmet system med naturlig eller pumpecirkulation
- Afrimning: elvarmelegeme (evt. nominel effekt)
- Styring og regulering: fordampere, blæsere, afrimning
- Fordamper: i drift hele tiden, on/off med rumtermostat, ...
- Blæsere: i drift hele tiden, on/off med rumtermostat, hastighedsreguleret med ???
- Afrimning: antal perioder á x minutter i døgnet, behovsstyret
- Omkostninger: investering, drift, vedligehold.

Nedenfor vises en skitse for en fordamper for væske samt de data der skal angives:

- Kølebelastning: døgnprofil (kW/h)
- Dimensionering:  $\Delta t$  ( $t_{\text{væske,tilgang}} - t_o$ ,  $t_o$  = mætningstemperatur ved trykket efter fordampere)
- Konstruktion: shell & tube, pladeveksler, koaksial, rørspiral i åben eller lukket tank
- Væskecirkulation: m. pumper
- Pumper: Antal, optaget eleffekt (evt. nominel motoreffekt)
- Kølemiddeltilførsel: tørt system, oversvømmet system
- Styring og regulering: fordampere, pumper
- Fordamper: i drift hele tiden, on/off med termostat i  $t_{\text{væske,afgang}}$ , ...
- Pumper: i drift hele tiden, on/off med væsketermostat, hastighedsreguleret med ???
- Omkostninger: investering, drift, vedligehold



Nedenfor vises en skitse for en fordamper for faststof samt de data der skal angives:



- Kølebelastning: døgnprofil (kW/h)
  - Dimensionering:  $\Delta t$  ( $t_{\text{faststof, start}} - t_o$ ,  $t_o$  = mætningstemperatur ved trykket efter fordamper)
  - Konstruktion: pladefryser, ispåfrysning udvendig på rør i åben tank
  - Væskecirculation: m. pumper eller røreværk
  - Pumper eller røreværk: Antal, optaget eleffekt (evt. nominel motoreffekt)
  - Kølemiddeltilførsel: tørt system, oversvømmet system med naturlig eller pumpecirkulation
  - Styring og regulering: fordamper, pumper, røreværk
  - Fordamper: i drift i bestemt periode, on/off med termostat i  $t_{\text{faststof}}$ , ...
  - Pumper, røreværk: i drift i bestemt periode, on/off med faststofstermostat
- Omkostninger: investering, drift, vedligehold

### Eksempel:

Her er valgt angivelse af en fordamper for luft:

- Dimensionerende rumtemperatur ( $t_{\text{luft, tilgang}}$ )

Eks: +5°C

- Kølebelastning: dimensionerende køleydelse (kW), døgnprofil (kW/h)

Eks: 16 kW

Kl.	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12
Q <sub>o</sub> kW	8	8	8	8	8	8	8	12	15	15	15	15
Kl.	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	22-23	23-24
Q <sub>o</sub> kW	15	15	15	15	12	12	8	8	8	8	8	8

- Dimensionering:  $\Delta t$  ( $t_{\text{luft,tilgang}} - t_o$ ,  $t_o$  = mætningstemperatur ved trykket efter fordampner)

Eks: 8 K

- Konstruktion: rørbundet (coil), m./u. lameller

Eks: Rørbundet (coil), m. lameller indbygget i kabinet, lofthængt, m. drypbakke

Eks: Fabrikat: Friga Bohn, typebetegnelse: SKB 12R, kapacitet: 15.770 W ved  $\Delta t=8K$ , overflade: 57 m<sup>2</sup>, luftmængde: 7.600 m<sup>3</sup>/h

- Luftcirkulation: m/u blæsere

Eks: Tvungen cirkulation med blæsere (valg gennem afkrydsning)

- Blæsere: Antal, optaget eleffekt (evt. nominel motoreffekt)

Eks: 2 stk, optaget eleffekt (evt. nominel motoreffekt) = 450 W

- Kølemiddeltilførsel: tørt system, oversvømmet system med naturlig eller pumpecirkulation

Eks: Tørt system med magnetventil og termostatisk ekspansionsventil (valg gennem afkrydsning)

- Afrimning: elvarmelegeme (evt. nominel effekt)

- Styring og regulering: fordampner, blæsere, afrimning

Eks: Fordampnertryksstyring via reguleringsventil (valg gennem afkrydsning)

Eks: Setpunkt for  $t_o = t_{\text{mætn}}$  ved trykket efter fordampner (valg er +3°C)

- Fordampner: i drift hele tiden, on/off med rumtermostat, ...

Eks: Fordampner konstant i drift (på nær afrimning) (valg gennem afkrydsning)

- Blæsere: i drift hele tiden, on/off med rumtermostat, hastighedsreguleret med ???

Eks: Blæsere on/off-drift via  $t_{\text{rum}}$  (på nær afrimning) (valg gennem afkrydsning)

- Afrimning: antal perioder á x minutter i døgnet, behovsstyret

Eks: Tvungen luftcirkulation m. blæsere uden væsketilførsel til køling (valg gennem afkrydsning)

Kl.	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12
min								15				15
Kl.	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	22-23	23-24
min				15				15				

- Omkostninger: investering, drift, vedligehold.

Eks: Listepriis: 20.537 kr., rabatsats 40%

Eks: Vurderet omkostning ekskl. energiforbrug og intern personaleomkostning: 200 kr./år (reparation og vedligehold af sliddele)



## Bilag 2: Eksempler på brugerflader på Pc-værktøj

## Bilag 2.1. Brugerfladen fra ét af KKO-programmerne

EES Distributable C:\programmer\kko\_ver\_2.2beta\models\kko\_01.exe 1. Kko\_01a - [Diagram Window]

File Edit Search Options Calculate Tables Plots Windows Help

### KULDEBEHOV FOR KØLE- OG FROSTRUM

KKO 01A (Ver. 2.2) Dato : 25-09-2002 Tid : 20:06:36

Svenn Hansen KK nr.: 70501

Sags nr. og titel

Beskrivelse

Beregn Print Gem input Hent input Hjælp

VARMETRANSMISSION GENNEM BYGNINGSDELE							
TILSTAND I RUM	DIMENSIONER		BYGNINGSDELE	VÆGGE	LOFT	GULV	DELBELASTNING
Temperatur [°C]	2.0	Længde [m]	10	Areal [m <sup>2</sup> ]	96.0	60.0	60.0
Relativ fugtighed [%]	85	Bredde [m]	6	k-værdi [W/(m <sup>2</sup> ·K)]	0.25	0.25	0.25
Volumen [m <sup>3</sup> ]	180	Højde [m]	3	T <sub>OMGIVELSER</sub> [°C]	30.0	40.0	10.0
1.36 [kW]							

LUFTSKIFTE (infiltration + ventilation)							DELBELASTNING
Temperatur [°C] :	28.0	Relativ luftfugtighed [%] :	65	Luftskiftefaktor [pr. døgn]	6		
Luftskiftefaktor : 6 [pr. døgn]    Volumenstrøm : 45 [m <sup>3</sup> /h]    Vejledende luftskiftefaktor : 5.2 [pr. døgn]							0.81 [kW]

NEDKØLING OG INDFRYSNING AF VARER SAMT MODNINGSVARME						
Mængde [kg]	T <sub>INDBRING</sub> [°C]	Nedkølingstid [h]	Varetype	Q <sub>MAX</sub> [kW]	Q <sub>MID</sub> [kW]	DELBELASTNING
1	500	20.0	10	Oksekød	2.45	0.80
2	0	0.0	0	Ingen vare	0.00	0.00
0.80 [kW]						
Specifik modningsvarme [W/ton] : 0				Mængde på lager [ton] : 0		Modningsvarme : 0.00

DIVERSE BELASTNINGER			
PERSONER	0.53 [kW]	EL-UDSTYR	1.60 [kW]
Antal personer	2	Belysning [W/m <sup>2</sup> ]	20
Arbejdstype	Middel	Ventilatorer [kW]	0.300
Belastning pr. person [W]	264	Andet udstyr [kW]	0.100
2.13 [kW]			

DIMENSIONERENDE KULDEBEHOV (Benyttes ved 2. gennemregning)			
Forhold mellem beregnet og anvendt kuldebehov :	1.08	Beregnet dimensionerende kuldebehov :	5.1 [kW] ved SHR : 92 [%]
Specifik belastning : 85 [W/m <sup>2</sup> ]	eller 28 [W/m <sup>3</sup> ]	Anvendt dimensionerende kuldebehov :	5.5 [kW] ved SHR : 90 [%]

**Bilag 2.2. Forslag til output-billede 1 for Pc-værktøj**

OVERSIGT OVER ENERGIØKONOMISKE FORHOLD

KKO 01A (Ver. 2.2)

Dato : 28-10-2003

Tid : 15:28:09

Beregning Print Gem input Hent input Hjælp Noter

Svenn Hansen

Reference:

Benævnelse:

**Anlægsbeskrivelse**

**Hoveddata**

**Fordampere:**

- 1: Luft, Friga Bohn, SKB 12R,  $t_{rum} +5^{\circ}\text{C}$ ,  $Q_{o,nom}$  16 kW,  $t_o -3^{\circ}\text{C}$
- 2: Væske, SWEP, B5,  $t_{væske} +2^{\circ}\text{C}$ ,  $Q_{o,nom}$  50 kW,  $t_o -3^{\circ}\text{C}$
- 3: Faststof, Jackstone, ?,  $t_{produkt} +20 \rightarrow +10^{\circ}\text{C}$ ,  $Q_{o,nom}$  ? t/døgn,  $t_o$  ? $^{\circ}\text{C}$

**Kompressorer**

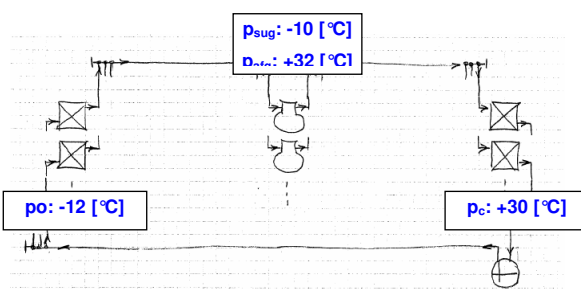
- 1: Stempel, Bitzer,

2:

3:

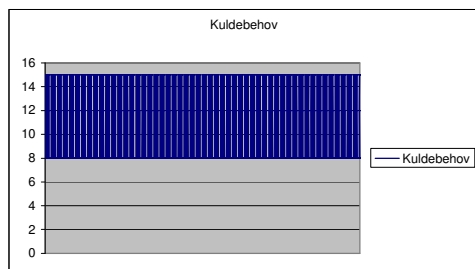
**Kondensatorer**

**Systemskitse**

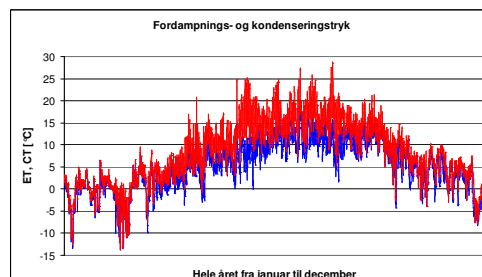


**Anlægsdriften**

**Kuldebehovsvariation**



**Driftsdata**



**Energiøkonomisk "input" (krav og forudsætninger) og "output" (levetidsomkostninger)**

**Input**

**Beregningsperiode:**  
 Forventet levetid: 15 [år]

**Rente og inflation:**  
 Rente og inflation: 0 [% p.a.] og 0 [% p.a.]

**Priser på el og vand:**  
 Elektricitet: 0,50 [kr/kWh]  
 Vand: 10,00 [kr/m<sup>3</sup>]

**Anlægsomkostninger:**  
 Investering: 100.000 [kr]

**Serviceomkostninger:**  
 Drift og vedligehold: 15.000 [kr/år]  
 Vandforbrug: 220 [m<sup>3</sup>/år]

**Output**

**Forbrug af el:**  
 Årligt elforbrug: 50.000 [kWh/år]  
 Elforbrug i levetiden: 750.000 [kWh/år]

**Levetidsomkostninger:**

Investering i anlæg	100.000 [kr]	14 [%]
Elforbrug	375.000 [kr]	51 [%]
Vandforbrug	33.000 [kr]	5 [%]
Drift og vedligehold	225.000 [kr]	31 [%]
I alt	<u>733.000 [kr]</u>	<u>100 [%]</u>

**Levetidsomkostninger – grafisk:**

**Bilag 2.3. Forslag til output-billede 2 for Pc-værktøj**

**OVERSICHT OVER ENERGIØKONOMISKE FORHOLD**

KKO 01A (Ver. 2.2)

Dato : 28-10-2003

Tid : 15:28:09

Beregn
Print
Gem input
Hent input
Hjælp
Noter

Svenn Hansen

Reference:

Benævnelse:

**Anlægsalternativer**

**Hoveddata for alternativer**

**Alternativ A: Ettrinsanlæg med on/off-drift af Bitzerkompressor**

Fordampere: 1. Luft, Friga Bohn, SKB 12R, 2: Væske, SWEP, B5, 3. 3: Faststof, Jackstone, ?

Kompressorer: 1. Stempel, Bitzer, 2. ...

Kondensatorer: 1. ...., 2. ...

**Alternativ B: Ettrinsanlæg med frekvensregulering af Bitzerkompressor**

Fordampere: 1. Luft, Friga Bohn, SKB 12R, 2: Væske, SWEP, B5, 3. 3: Faststof, Jackstone, ?

Kompressorer: 1. Stempel, Bitzer, 2. ...

Kondensatorer: 1. ...., 2. ...

**Alternativ C: Ettrinsanlæg med behovsstyring af Bitzerkompressor**

Fordampere: 1. Luft, Friga Bohn, SKB 12R, 2: Væske, SWEP, B5, 3. 3: Faststof, Jackstone, ?

Kompressorer: 1. Stempel, Bitzer, 2. ...

Kondensatorer: 1. ...., 2. ...

**Energiøkonomiske "input" (krav og forudsætninger)**

**Input**

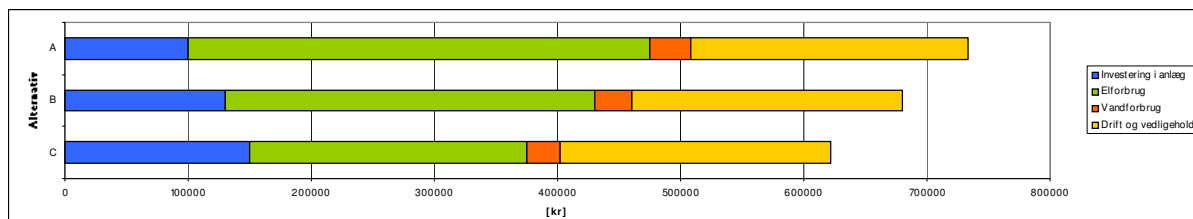
	Alternativ A (Referencen)	Alternativ B	Alternativ C
<b>Beregningsperiode:</b>			
Forventet levetid:	15 [år]	15 [år]	15 [år]
<b>Rente og inflation:</b>			
Rente og inflation:	0 [% p.a.] og 0 [% p.a.]	0 [% p.a.] og 0 [% p.a.]	0 [% p.a.] og 0 [% p.a.]

**Energiøkonomiske "output" (levetidsomkostninger)**

**Output**

	Alternativ A (Referencen)	Alternativ B	Alternativ C
<b>Forbrug af el:</b>			
Årligt elforbrug:	50.000 [kWh/år]	40.000 [kWh/år] -20 [%]	30.000 [kWh/år] -40 [%]
Elforbrug i levetiden:	750.000 [kWh/år]	600.000 [kWh/år] -20 [%]	450.000 [kWh/år] -40 [%]
<b>Levetidsomkostninger:</b>			
Investering i anlæg	100.000 [kr]	130.000 [kr] +30 [%]	150.000 [kr] +50 [%]
Elforbrug	375.000 [kr]	300.000 [kr] -20 [%]	225.000 [kr] -40 [%]
Vandforbrug	33.000 [kr]	30.000 [kr] -9 [%]	27.000 [kr] -18 [%]
Drift og vedligehold	225.000 [kr]	220.000 [kr] -2 [%]	220.000 [kr] -2 [%]
I alt	733.000 [kr]	680.000 [kr] -7 [%]	622.000 [kr] -15 [%]
Årlige driftsomkostninger	42.200 [kr]	36.667 [kr] -13 [%]	31.467 [kr] -25 [%]
<b>Rentabilitet:</b>			
Simpel tilbagebetalingstid:		5,4 [år]	4,7 [år]
Nutidsværdi:	733.000 [kr]	680.000 [kr]	622.000 [kr]
Forrentnings-procent:		? [%]	? [%]

**Levetidsomkostninger - grafisk:**



**Bilag 2.4. Forslag til input-billede 1 for Pc-værktøj**

## OVERSIGT OVER ENERGIØKONOMISKE FORHOLD

KKO 01A (Ver. 2.2)

Date : 28-10-2003

Tid : 15:28:09

Svenn Hansen

Reference:

Benævnelse:








**Anlægsgrundtype**Ettrin Totrin Kaskade Blackbox **Fastlægge hovedlayout**(Ettrin )Kølemiddel [R404A](#)Antal parallelkoblede fordampere **3 stk**Antal parallelkoblede kompressorer **3 stk** (2 stempelkompressorer, 1 skruekompressor)Antal parallelkoblede kondensatorer **2 stk** (1 luftkølet kondensator, 1 væskekølet kondensator (indirekte system))**Fastlægge hovedkomponenter**(Ettrin ) (Antal parallelkoblede fordampere **3 stk**)

Fordamper 1

- til luft  - til væske  - til faststof 

Fordamper 2

- til luft  - til væske  - til faststof 

Fordamper 3

- til luft  - til væske  - til faststof **Fastlægge hovedlayout**(Ettrin )

Sugerørsystem

- Tryktab [0,5K](#)**Fastlægge hovedkomponenter**(Ettrin ) (Antal parallelkoblede kompressorer **3 stk**)

Kompressor 1

- Stempelkompressor  - Skruekompressor  - Anden kompressortype 

Kompressor 2

- Stempelkompressor  - Skruekompressor  - Anden kompressortype 

Kompressor 3

- Stempelkompressor  - Skruekompressor  - Anden kompressortype **Fastlægge hovedlayout**(Ettrin )

Trykrørsystem

- Tryktab [0,5K](#)**Fastlægge hovedkomponenter**(Ettrin ) (Antal parallelkoblede kondensatorer **2 stk**)

Kondensator 1

- til luft  - til væske  - til luft og væske 

Kondensator 2

- til luft  - til væske  - til luft og væske **Fastlægge hovedlayout**(Ettrin )

Rørsystem mellem kondensator og receiver

- Tryktab [0,5K](#)**Fastlægge hovedlayout**(Ettrin )

Receiver(e) ?

**Fastlægge hovedlayout**(Ettrin )

Væskerørsystem

- Tryktab [0,5K](#)

## Bilag 2.5. Forslag til input-billede 2 for Pc-værktøj

## OVERSIGT OVER ENERGIØKONOMISKE FORHOLD

KKO 01A (Ver. 2.2)

Dato : 28-10-2003

Tid : 15:28:09



Svenn Hansen

Reference:

Benævnelse:

## Data for enkeltkomponenter

(Ettrin )

(Luftfordamper 1)

Dimensionerende rumtemperatur ( $t_{\text{luft,tilgang}}$ ) +5°C

Kølebelastnings døgnprofil

Kl.	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12
Q <sub>o</sub> kW	8	8	8	8	8	8	8	12	15	15	15	15
Kl.	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	22-23	23-24
Q <sub>o</sub> kW	15	15	15	15	12	12	8	8	8	8	8	8

Dimensionerende kølydelse 16 kW

Dimensionering [ $\Delta t$  ( $t_{\text{luft,tilgang}} - t_o$ ), hvor  $t_o = t_{\text{mætn}}$  ved trykket efter fordamper] 8 KValgt komponent Fabrikat: Friga Bohn, typebetegnelse: SKB 12R, kapacitet: 15.770 W ved  $\Delta t=8K$ , overflade: 57 m<sup>2</sup>, luftmængde: 7.600 m<sup>3</sup>/h

Konstruktion:

- Rørbundt (coil) m. lameller  (Rørbundt (coil), m. lameller indbygget i kabinet, lofthængt, m. drypbakke)
- Rørbundt (coil) u. lameller

Luftcirkulation:

- Tvungen cirkulation med blæsere  et niveau mere!
- Naturlig cirkulation uden blæsere

Kølemiddeltilførsel;

- Tørt system med magnetventil og termostatisk ekspansionsventil  et niveau mere!
- Oversvømmet system med niveaureguleringsventil

Afrimning;

- Elvarmelegeme
- Antal og optaget eleffekt
- Varmgas
- Tvungen luftcirkulation m. blæsere uden væsketilførsel til køling  et niveau mere!
- Behovsstyret

Fordampertryksstyring via reguleringsventil 

- Sætpunkt for  $t_o = t_{\text{mætn}}$  ved trykket efter fordamper  $\pm 3^\circ\text{C}$

Omkostninger;

- Investering Listepriis: 20.537 kr, rabatsats 40%

Drift, service og vedligehold Vurderet omkostning ekskl. energiforbrug og intern personaleomkostning: 200 kr/år (reparation og vedligehold af eludrustning)

## Data for enkeltkomponenter – næste niveau

(Ettrin ) (Luftfordamper 1) (Tvungen cirkulation med blæsere )

Antal og optaget eleffekt 2 stk, optaget eleffekt (evt. nominel motoreffekt) = 450 W

- Blæsere konstant i drift (pånær afrimning)
- Blæsere i drift i perioder (pånær afrimning)
- Blæsere on/off-drift via  $t_{\text{um}}$  (pånær afrimning)
- Blæsere hastighedsreguleret via  $t_{\text{um}}$  (pånær afrimning)

## Data for enkeltkomponenter – næste niveau

(Ettrin ) (Luftfordamper 1) (Tvungen cirkulation med blæsere ) (Tørt system med magnetventil og termostatisk ekspansionsventil )

- Fordamper konstant i drift (pånær afrimning)

- Fordamper i drift i perioder (pånær afrimning)
- Fordamper i on/off-drift via  $t_{\text{um}}$  (pånær afrimning)

## Data for enkeltkomponenter – næste niveau

(Ettrin ) (Luftfordamper 1) (Tvungen cirkulation med blæsere ) (Tvungen luftcirkulation m. blæsere uden væsketilførsel til køling )

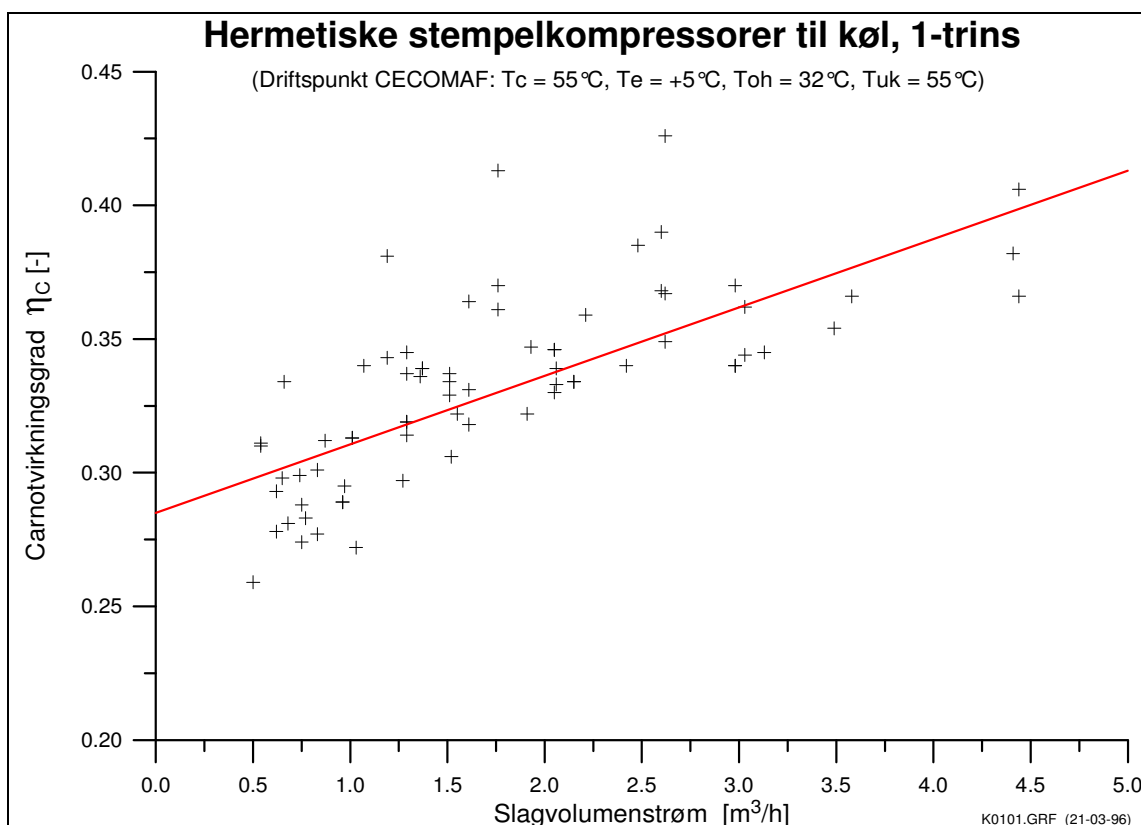
Antal perioder á x min/døgn

Kl.	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12
min								15				15
Kl.	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	22-23	23-24
min				15				15				

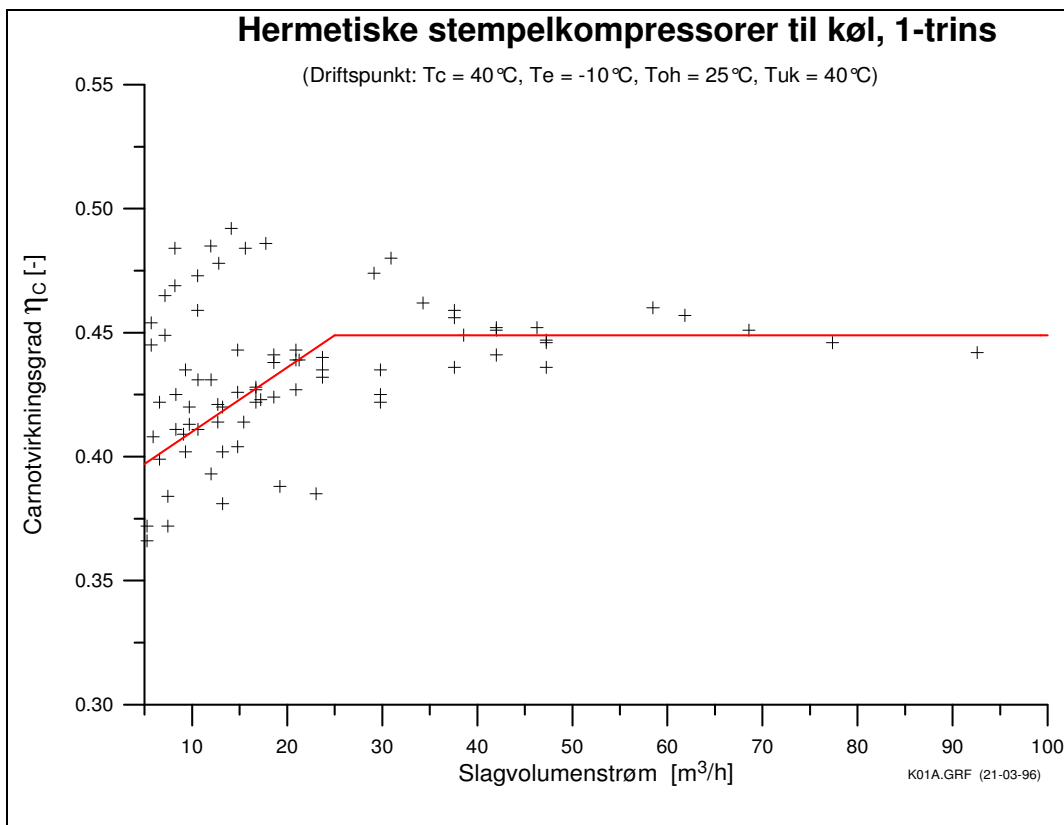
### Bilag 3: Regressionsplot for kompressorer

Dette bilag indeholder regressionsplot af de korrigerede Carnotvirkningsgrader for de undersøgte kompressorer i systemsammenhæng. Hver kompressor er repræsenteret ved et punkt (mærket med tegnet +). Normkravet repræsenteres i alle disse plots ved en eller flere rette linier.

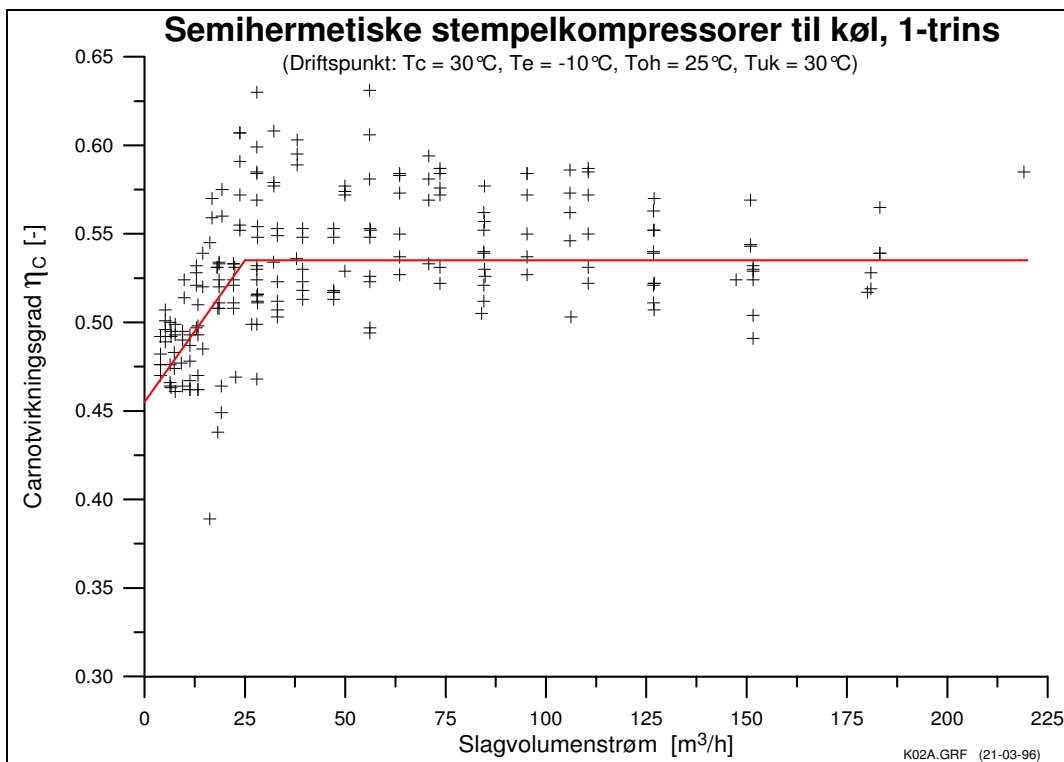
Disse regressionsplots er uafhængige af kølemiddel, idet Carnotvirkningsgraderne er korrigeret med de tidligere beskrevne korrektionsfaktorer før de er plottet.



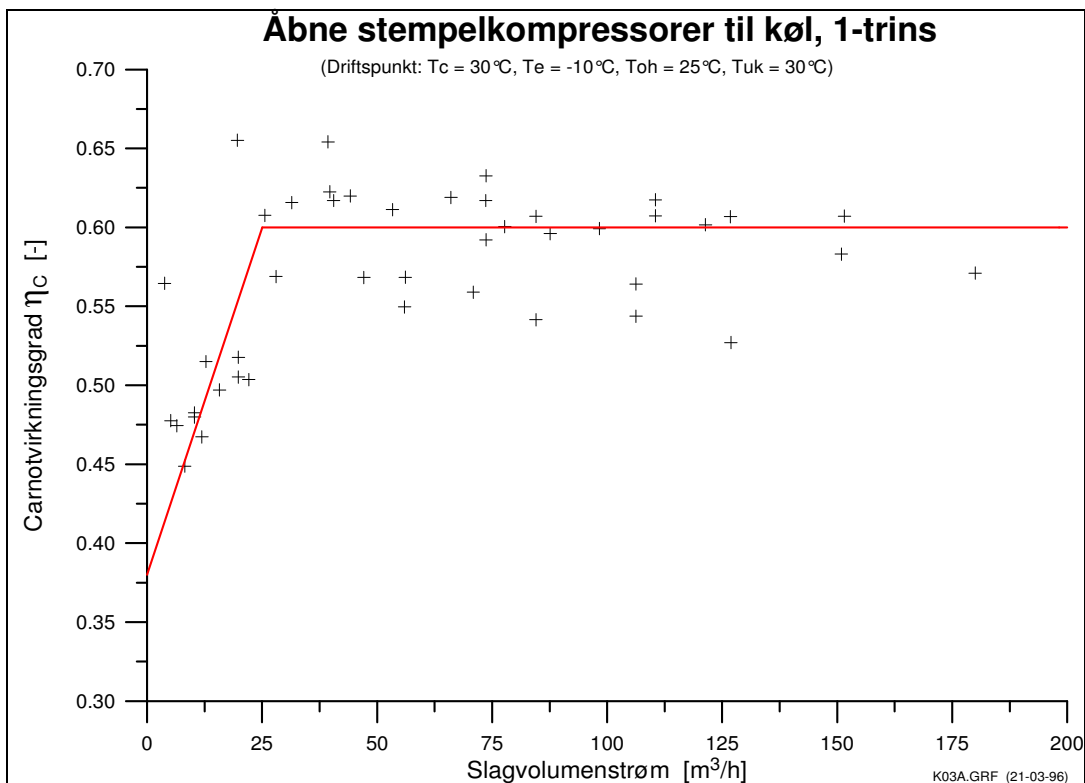
Figur B.3.1. Kategori K.01.01 - Hermetiske stempelkompressorer til køl, 1-trins



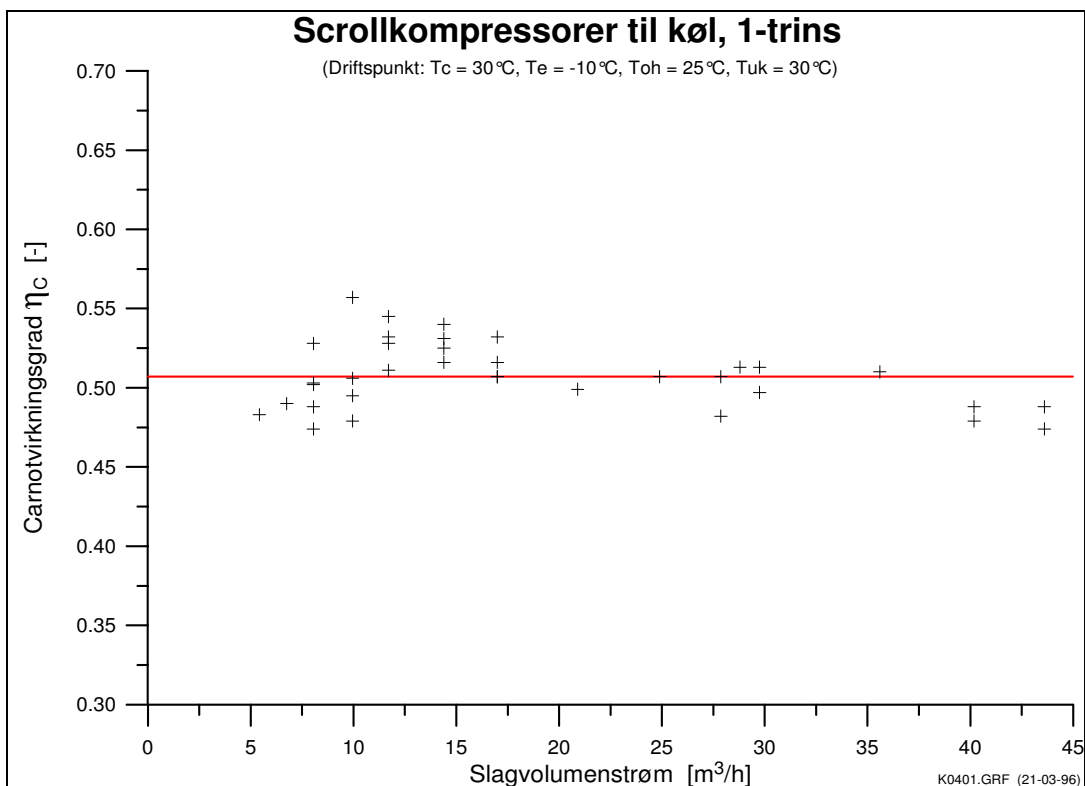
Figur B.3.2. Kategori K.01.02 og K.01.03 - Hermetiske stempelkompressorer til køl, 1-trins



Figur B.3.3. Kategori K.02.01 og K.02.02 - Semihermetiske stempelkompressorer til køl, 1-trins

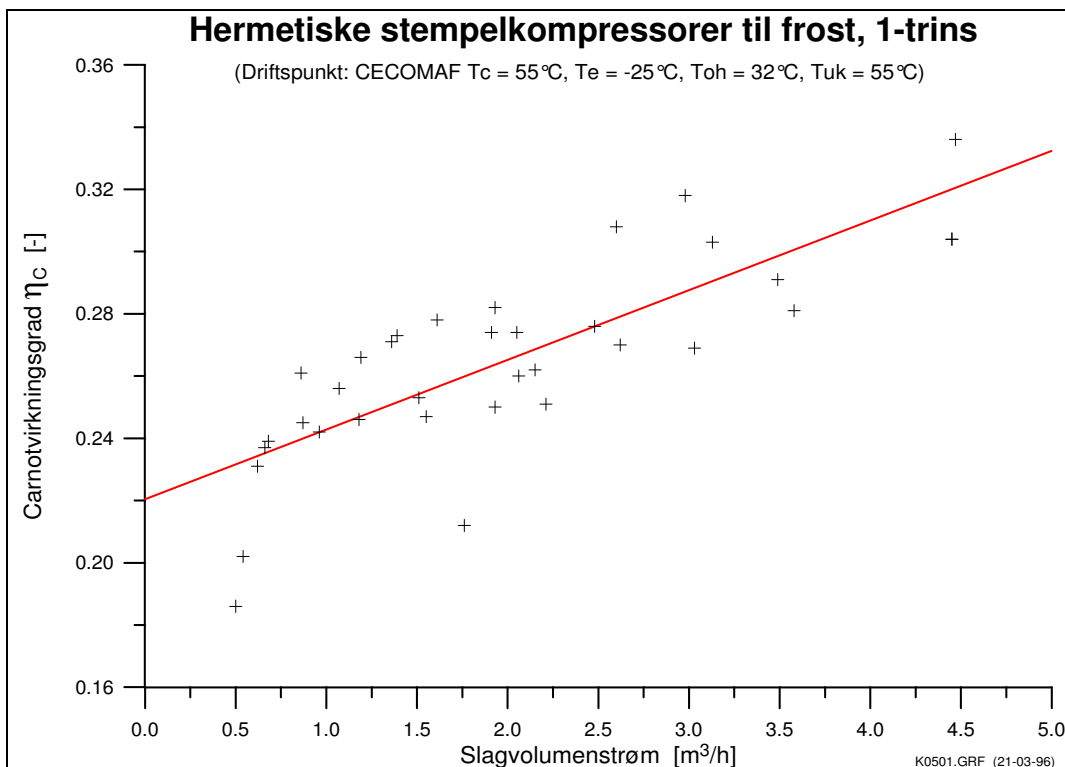


Figur B.3.4. Kategori K.03.01 og K.03.02 - Åbne stempelkompressor til køl, 1-trins

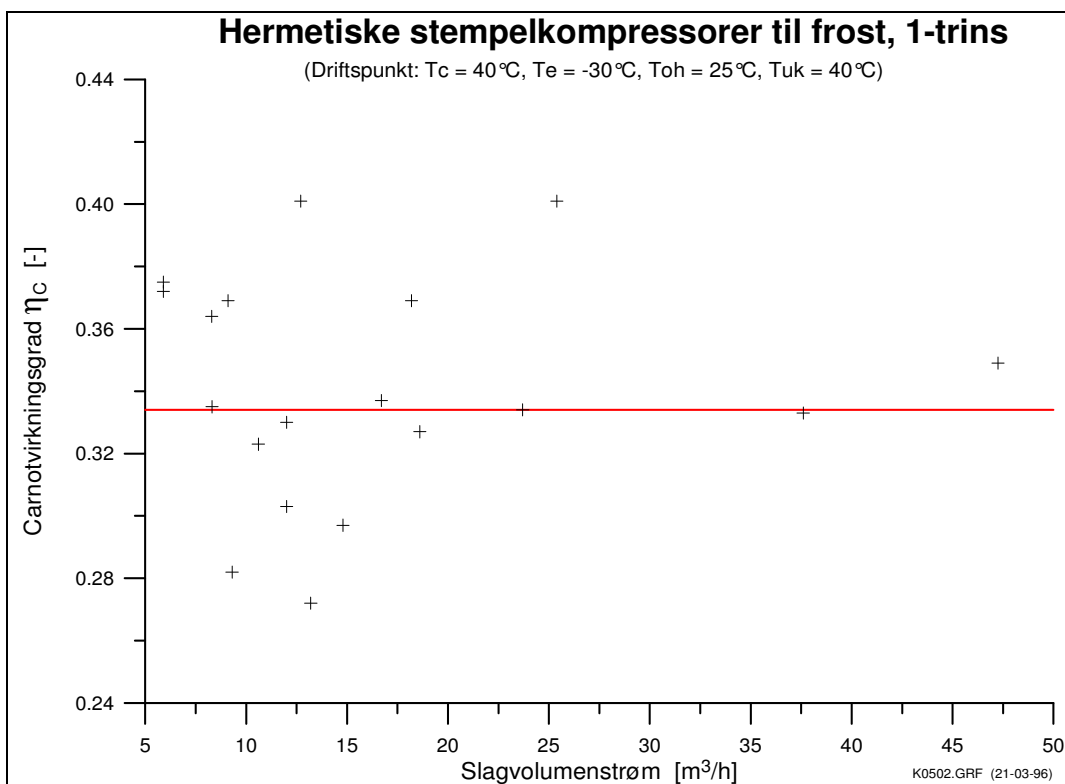


Figur B.3.5. Kategori K.04.01 - Scrollkompressor til køl, 1-trins

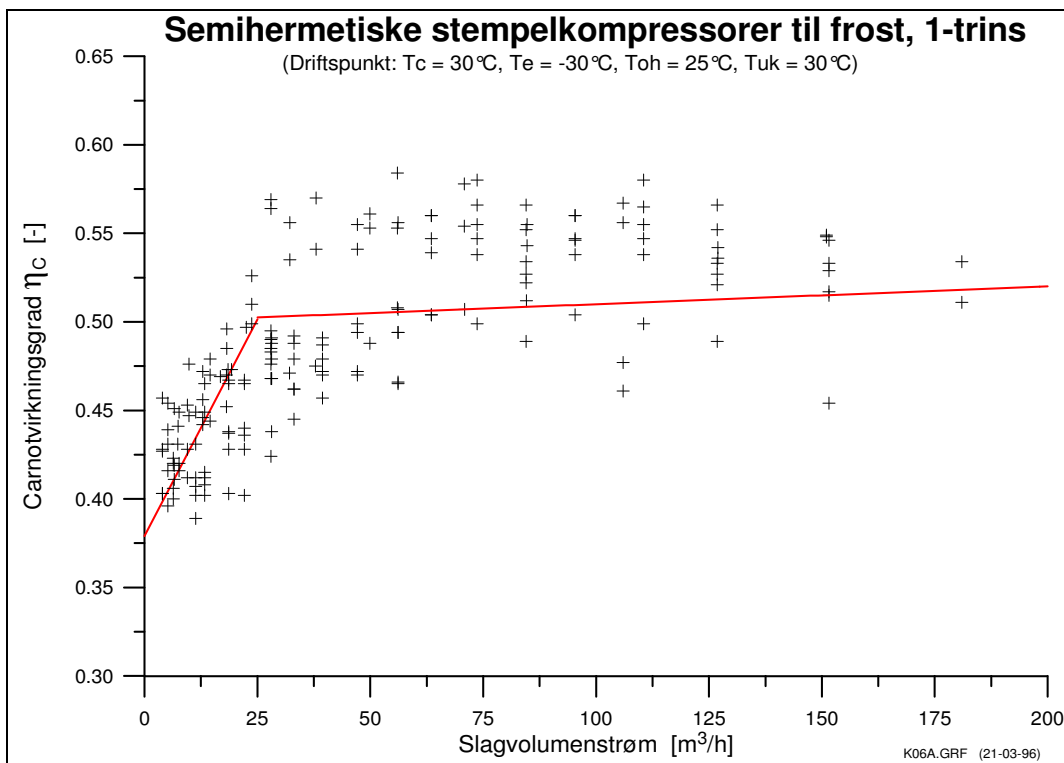




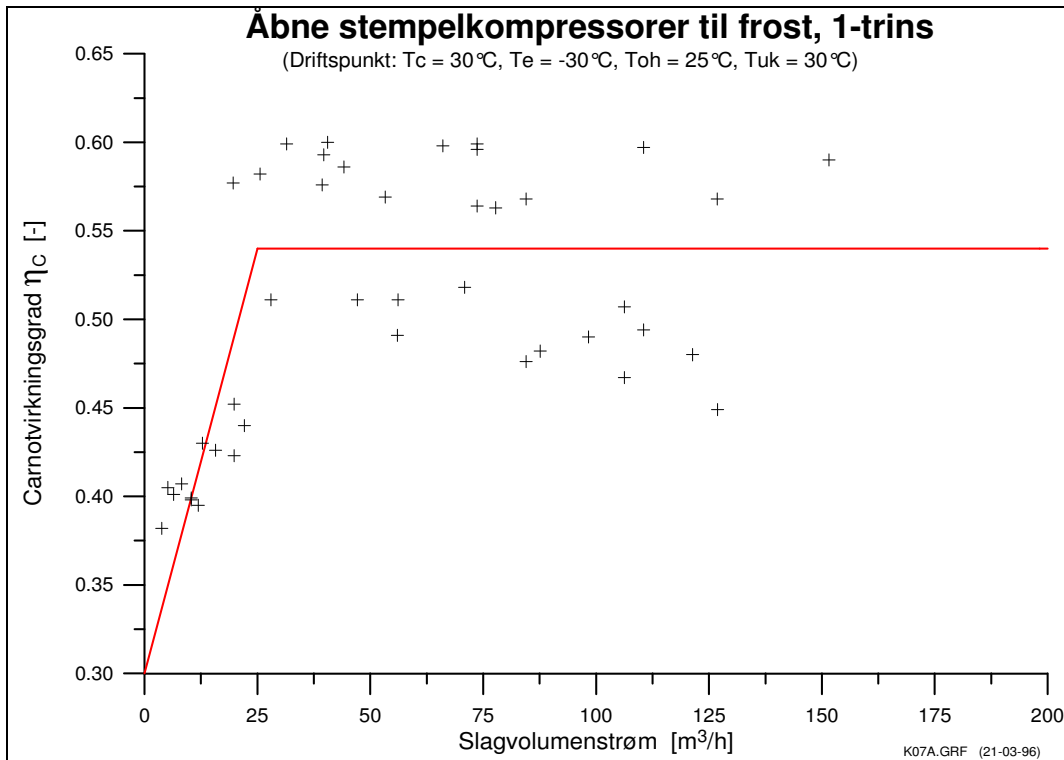
Figur B.3.6. Kategori K.05.01 - Hermetiske stempelkompressorer til frost, 1-trins



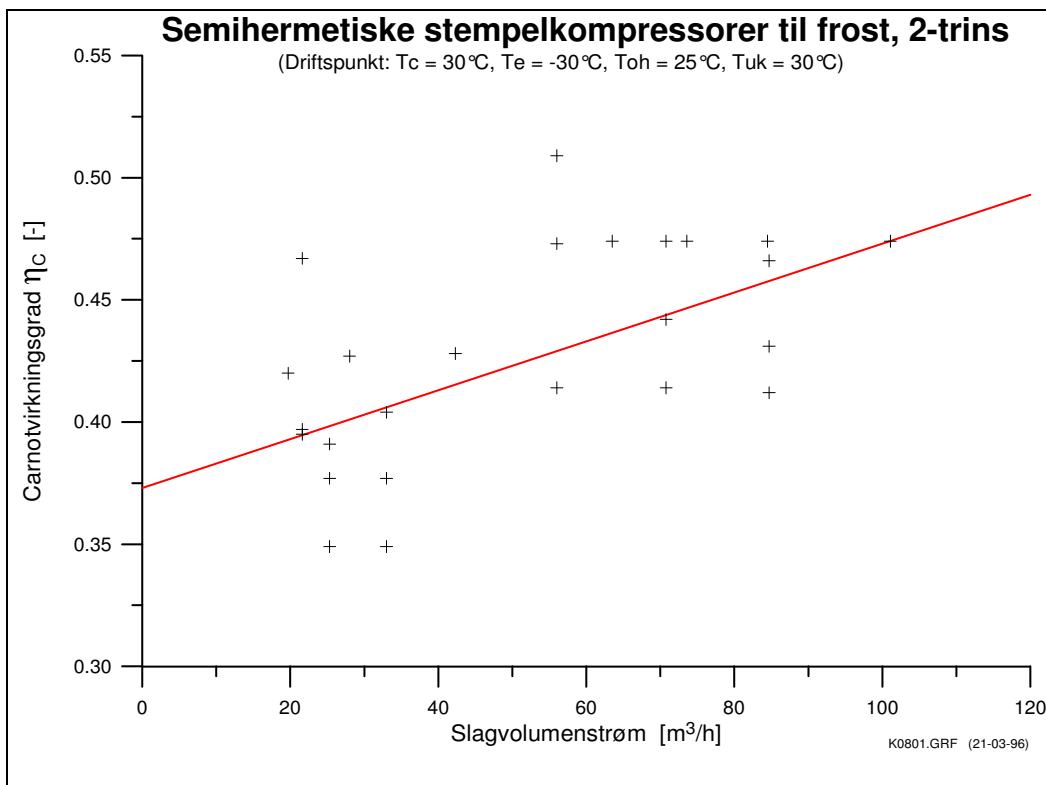
Figur B.3.7. Kategori K.05.02 - Hermetiske stempelkompressorer til frost, 1-trins



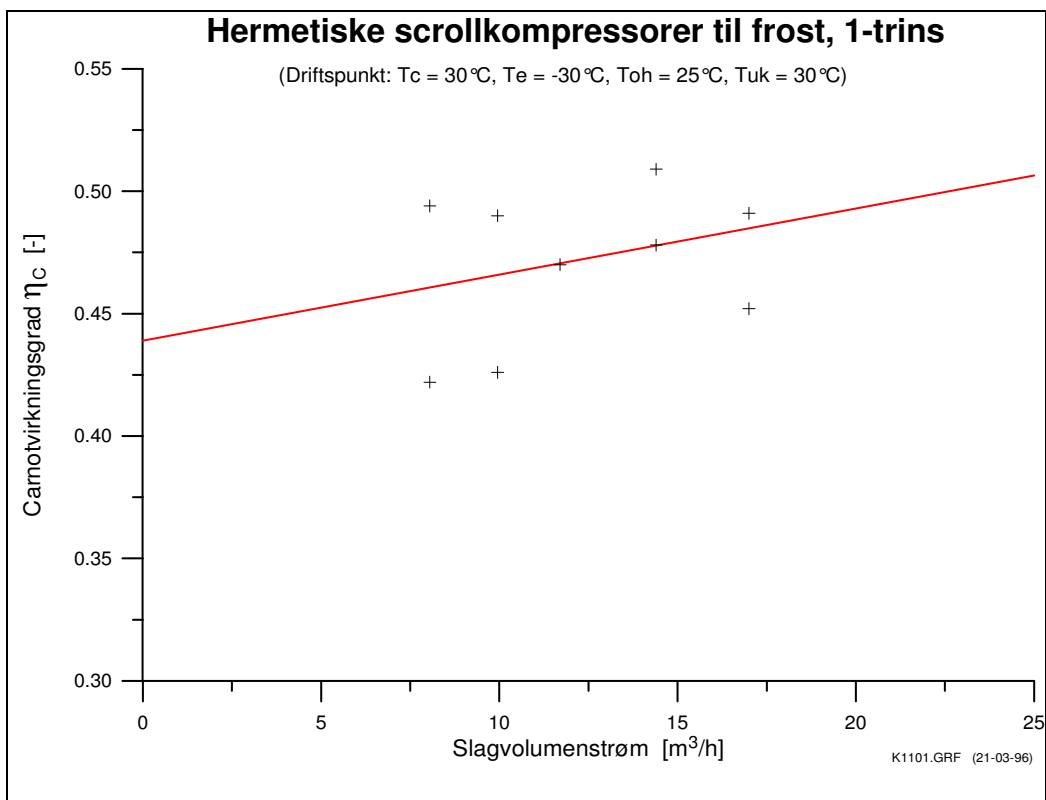
Figur B.3.8. Kategori K.06.01 og K.06.02 - Semihæretiske stempelkompressorer til frost, 1-trins



Figur B.3.9. Kategori K.07.01 og K.07.02 - Åbne stempelkompressorer til frost, 1-trins



Figur B.3.10. Kategori K.08.01 - Semihermetiske stempelkompressorer til frost, 2-trins



Figur B.3.11. Kategori K.11.01 - Hermetiske scrollkompressorer til frost, 1-trins