

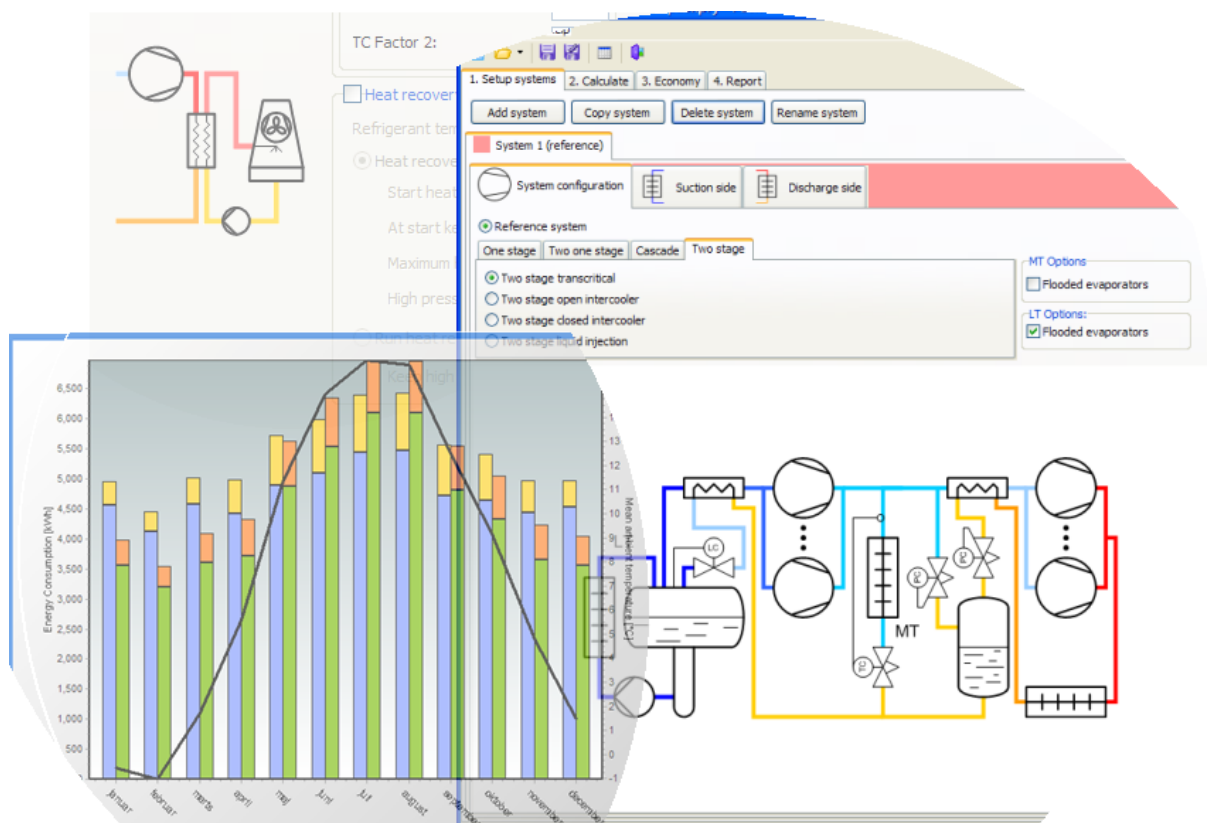
Udvikling og brug af simuleringsværk- tøjer til analyse og energioptimering af kølesystemer med CO₂ som kølemiddel

ELFOR Projekt 339-046

Hovedrapport

Morten Juel Skovrup

2010-03-11



Indholdsfortegnelse

Introduktion	2
Projektresultater	3
Rapporter	3
Beregningsprogrammer	3
Pack Calculation II	4
Simple CO2 one stage plant	9
Refrigerant Circulation Pumps	10
Compressor Performance	11
CO2 Kredsprocesberegner	12
Formidling	13
Artikler	13
Undervisning	13
Præsentationer	13
Møder	13
English Abstract.....	14
Reports.....	14
Simulation Tools.....	15
Perspektivering	16

Introduktion

Projektet "Udvikling og brug af simuleringsværktøjer til analyse og energioptimering af kølesystemer med CO₂ som kølemiddel" er udført i perioden marts 2007 til december 2009 med deltagelse af:

- IPU (projektansvarlig), ved Morten Juel Skovrup og Mette Havgaard Vorre
- Advansor, ved Kim G. Christensen
- Danfoss ved Hans Ole Matthiesen
- Grundfos, ved Bjarne D. Rasmussen
- Johnson Controls, ved Alexander Cohr Pachai
- Teknologisk Institut, ved Pia Rasmussen
- Knudsen Køling, ved Torben Olsen
- Autoriserede Kølefirmaers Brancheforening, ved Lau Vørs



Projektet er finansieret af ELFOR, projekt 339-046.

Formålet med projektet (som formuleret i projektansøgningen) er:

Projektets formål er, baseret på driftserfaringer og erkendte problemstillinger, at identificere behov for beregnings- og simuleringsværktøjer, udvikle og stille disse værktøjer og erkendelser til rådighed for den danske kølebranche, sådan at el-forbruget til CO₂ kølesystemer minimeres hurtigst muligt.

Projektresultater

Projektet har resulteret i 5 beregningsprogrammer og 3 tekniske rapporter. Både rapporter og beregningsprogrammer kan hentes som en samlet pakke fra IPU's hjemmeside www.ipu.dk; men også fra www.elforsk.dk.

Derudover er projektets resultater præsenteret ved adskillige konferencer og køletekniske møder.

Rapporter

De 3 rapporter produceret som en del af projektet er:

1. **Danfoss CO₂ Application Handbook**, som giver en introduktion til CO₂ som kølemiddel, transkritiske og subkritiske anlæg samt reguleringen af disse. Rapporten indeholder både teoretiske overvejelser og praktiske forslag til, hvordan anlæggene kan udformes.
2. **CO₂ Encyclopedia**, som giver en introduktion til nogle af de grundlæggende begreber der benyttes i forbindelse med køleanlæg med CO₂ som kølemiddel.
3. **Fundamental cycle processes and options**, som giver et overblik over de grundlæggende kredsprocesser og variationer af disse, der benyttes ved køleanlæg med CO₂ som kølemiddel.

Beregningsprogrammer

De 5 beregningsprogrammer som er en del af projektresultatet præsenteres kort nedenfor; men det anbefales, at man installerer og prøver programmerne for at få et fuldt overblik over funktionaliteten.

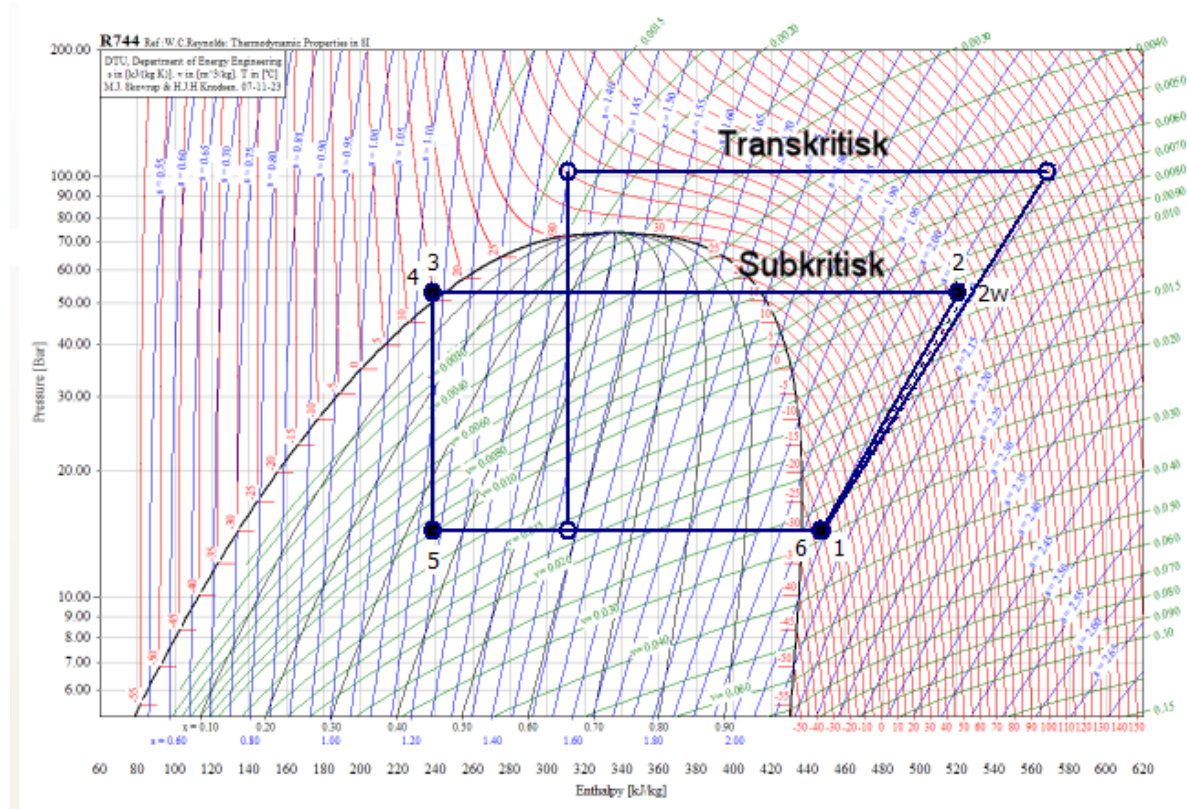
Pack Calculation II

I forhold til traditionelle kølesystemer vil man i første omgang forvente et mer-energiforbrug for køleanlæg, der benytter CO₂ som kølemiddel. Dette skyldes den lave kritiske temperatur for CO₂ på ca. 31 °C der bevirker, at mange anlæg vil operere transkritisk i dele af driftstiden. Teori og praksis viser dog, at COP vil være lavere for anlæg, der opererer transkritisk, end COP for traditionelle subkritiske kølesystemer.

På den anden side vil antallet af timer et anlæg opererer transkritisk, være afhængig af anlæggets geografiske placering – i f.eks. Nordeuropa vil antallet være lavt, mens det i Sydeuropa vil være højt. Samtidig viser erfaringer, at der tilsyneladende er en mulighed for:

1. at komponenter til CO₂ anlæg vil være mere effektive – kompressorer med højere virkningsgrad og varmevekslere med lavere temperaturdifferencer.
2. at anlægget kan køre mere energieffektivt: højere trykdifferens over ekspansionsventilen gør, at man har mulighed for at lade kondenseringstemperaturen følge omgivelserne længere ned end normalt.

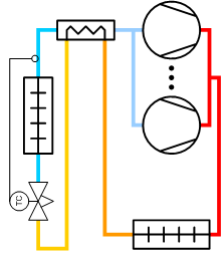
Samlet set er der altså en mulighed for, at CO₂ anlæg kan genvinde mer-energiforbruget ved transkritisk drift når det kører subkritisk.



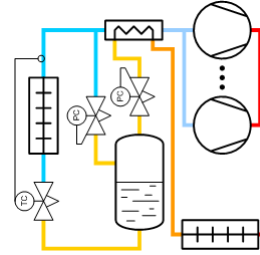
For at undersøge om dette vil være tilfældet, er der i projektet udviklet et simuleringsprogram, der kan sammenligne årsenergiforbruget af CO₂ anlæg med traditionelle anlæg. Programmet foretager denne sammenligning på baggrund af en given geografisk placering.

Simuleringsprogrammet til beregning af årsenergiforbrug for et køleanlæg, tager udgangspunkt i en af indtil videre 11 anlægstyper:

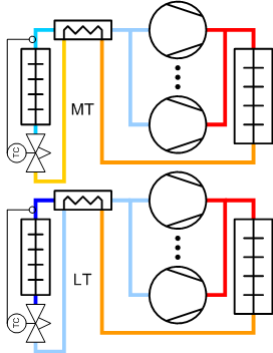
Etrins subkritisk



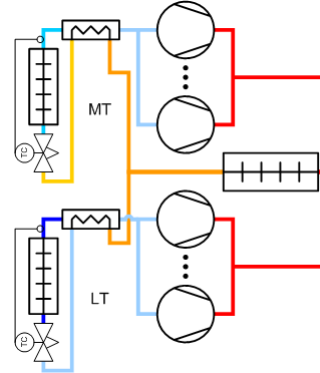
Etrins transkritisk med gas bypass



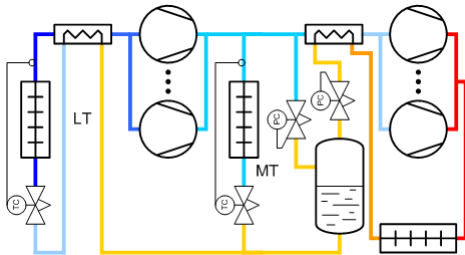
To ettrins, subkritisk



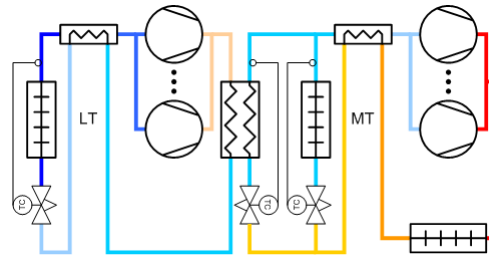
To ettrins, subkritisk, fælles kondensator



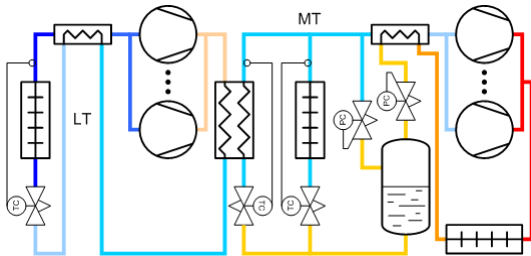
Totrins transkritisk



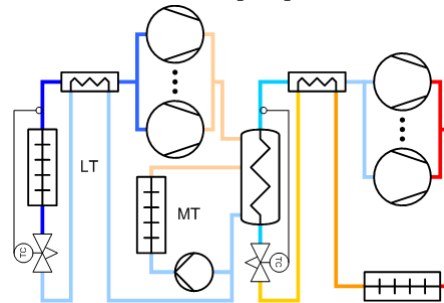
Subkritisk kaskade



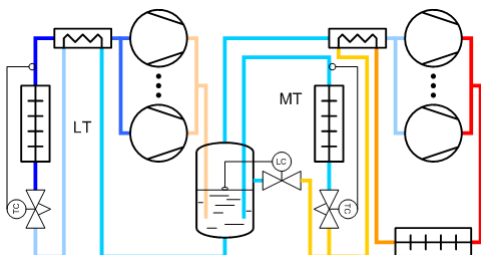
Transkritisk kaskade



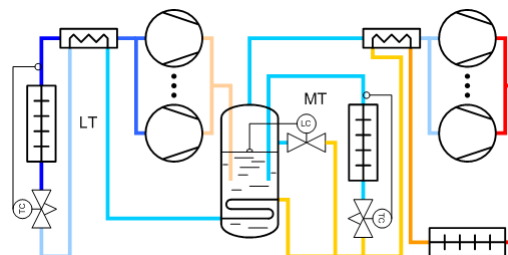
Kaskade med CO₂ pumpecirkulation



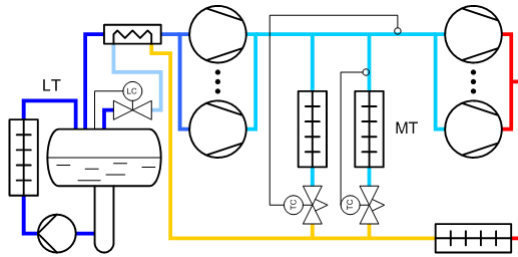
Totrins med åben mellemkøler



Totrins med lukket mellemkøler



Totrins med væskeindsprøjtning

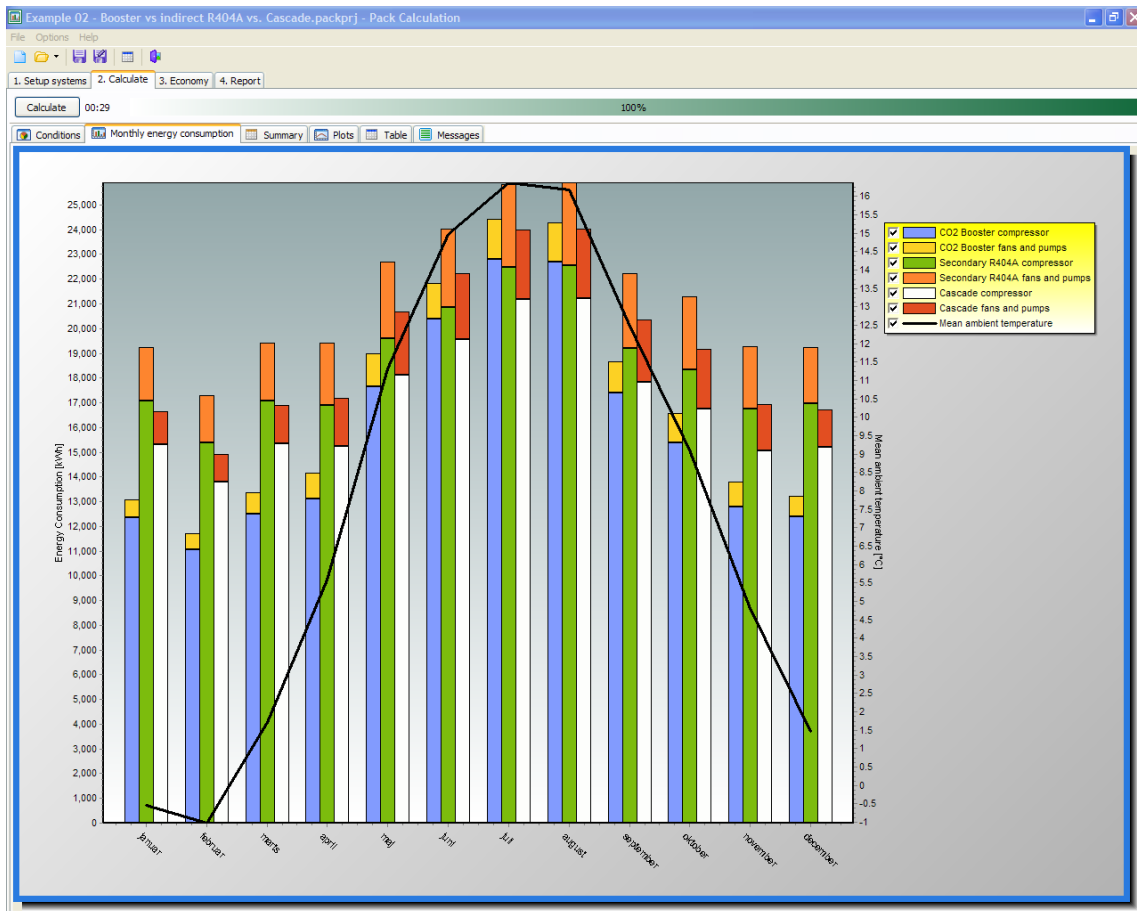


Alle anlægstyper kan varieres med oversvømmet fordampner og/eller intern varmeveksler og der kan tilføjes en sekundærkreds i stedet for direkte fordampning.

Efter valg af anlægstype, bestykes anlægget med kompressorer, der vælges ud fra en database, som i øjeblikket indeholder data for lidt over 2000 kommercielt tilgængelige kompressorer. Man har selv mulighed for at tilføje flere kompressorer i den medfølgende editor.

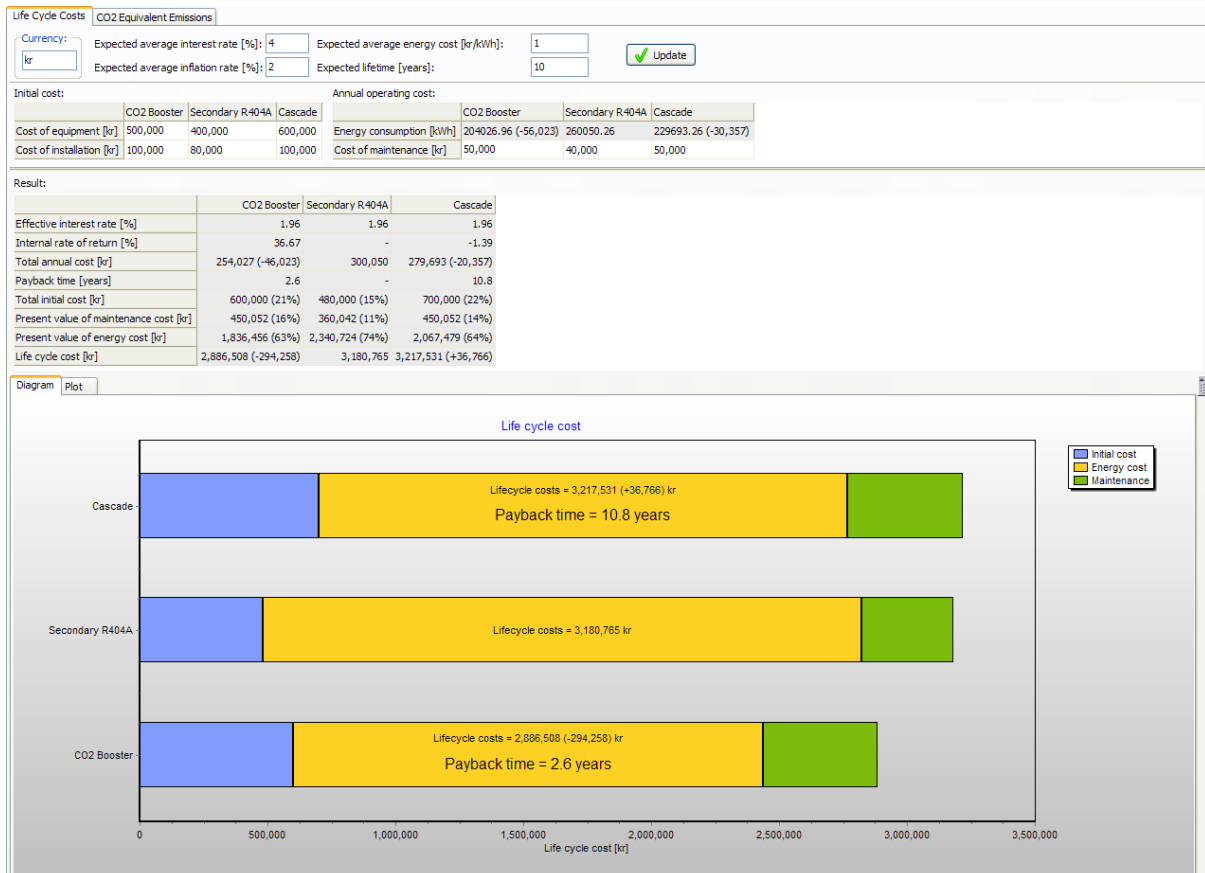
De valgte kompressorer kan hastighedsreguleres, hvis man ønsker det. Programmet vil selv korrigere virkningsgrader således, at der tages hensyn til tab i frekvensomformer mm.

Et eksempel på resultatet af en beregning er vist nedenfor:

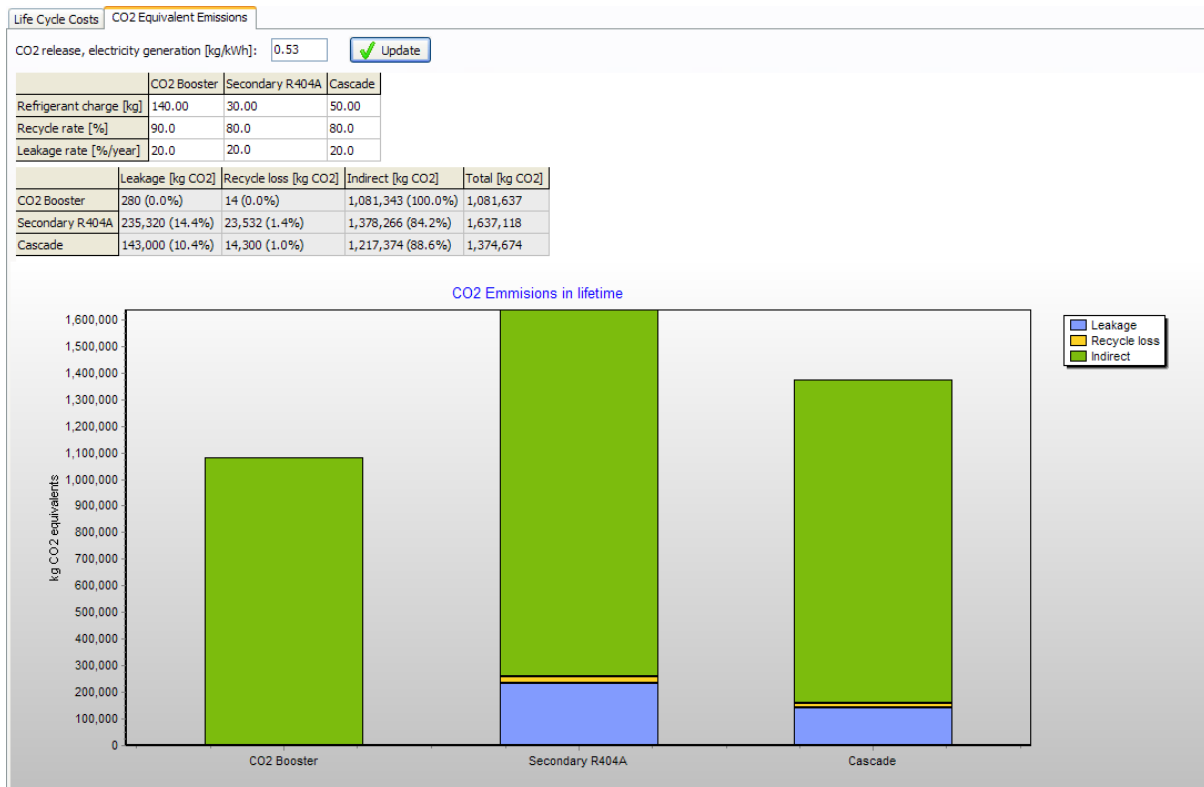


Energiforbruget over året for 3 forskellige systemer: Den blå/gule er for et CO₂ anlæg, den grøn/orange er et traditionelt R404 anlæg og den hvid/røde er et kaskade anlæg med CO₂ som lavtrykskølemiddel. Den sorte kurve viser omgivelsernes månedsmiddel-temperatur over året.

Efter en beregning af årsenergiforbruget for de anlæg man ønsker at sammenligne, kan man lave en økonomisk analyse af anlæggene, der inkluderer levetidsomkostninger og tilbagebetalingstid:



Samt sammenligne CO₂ emissioner i anlæggenes levetid:



Emissionerne er fordelt på:

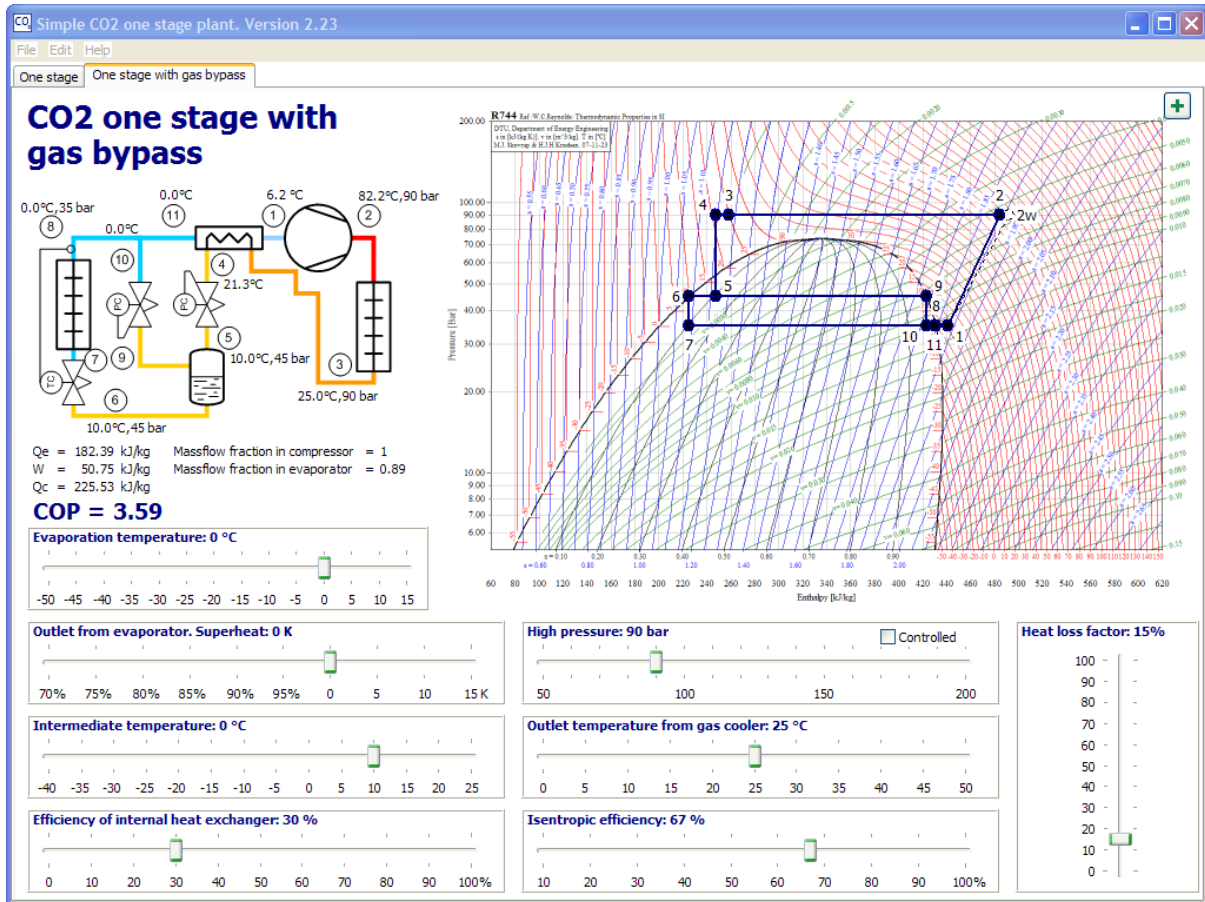
- Ækvivalent CO₂ udslip ved lækage – altså kølemiddel der undslipper anlægget i hele dets levetid på grund af utætheder
- Ækvivalent CO₂ udslip ved tab af kølemiddel i forbindelse med bortskaffelse af anlægget
- Ækvivalent CO₂ udslip forbundet med anlæggets energiforbrug

I programmet er indbygget CO₂ ækvivalenter for de mest almindelige kølemidler, og man kan selv indtaste, hvor stort CO₂ udslippet er i forbindelse med elproduktion i det land/region hvor anlæggene skal placeres.

Til slut kan alle resultater overføres til en automatisk genereret rapport i Microsoft Word®.

Simple CO₂ one stage plant

Programmet er hovedsageligt tænkt som et undervisningsprogram, der kan benyttes til at illustrere overgangen fra subkritisk til transkritisk drift:



Programmet benyttes allerede nu i kurser på Teknologisk institut og i undervisningen på Danmarks Tekniske Universitet.

Refrigerant Circulation Pumps

Programmet kan benyttes til at dimensionere pumper til CO₂ og andre kølemidler:

REFRIGERANT CIRCULATION PUMPS

> Capacity calculation GRUNDFOS

Calculate

Load inputs

Save inputs

Print

1 Choose refrigerant: R744

2 Chose inputs and specify operating conditions:

Size	OD [mm]	U [m/s]
DN20	21.7	2.13
DN25	28.5	1.23
DN32	37.2	0.72
DN40	48.3	0.54
DN50	60.3	0.33
DN65	76.1	0.20
DN80	88.9	0.15
DN100	108.0	0.10
DN125	133.0	0.06

EVAPORATOR(S)

Refrigeration capacity: 100.0 [kW] ≈ 28.4 [TR]

Temperature: -10.0 [°C] ≈ 14.0 [°F]

Pressure: 26.5 [bar] ≈ 384.1 [psi]

Heat of vaporisation: 258.6 [kJ/kg] ≈ 111.2 [Btu/lb_m]

SEPARATOR (low-pressure receiver)

Pressure: 26.5 [bar] ≈ 384.1 [psi]

Temperature: -10.0 [°C] ≈ 14.0 [°F]

PUMP

Volume flow: 2.83 [m³/h] ≈ 0.786 [l/s] ≈ 12.46 [gpm] Hydraulic power: 0.197 [kW]

Mass flow: 0.77 [kg/s] ≈ 2784 [kg/h] ≈ 102.3 [lb_m/min]

Pressure difference: 2.5 [bar] ≈ 25.9 [m] ≈ 36.3 [psi] ≈ 85.0 [ft]

LIQUID AT PUMP INLET

Temperature (T_{LIQ}): -10.1 [°C] ≈ 13.8 [°F] Density (ρ_{LIQ}): 983.5 [kg/m³] ≈ 61.4 [lb_m/ft³]

Subcooling (ΔT_{SC}): 0.1 [K] ≈ 0.2 [°F] Dynamic viscosity (μ_{LIQ}): 1.240E-04 [Pa·s] ≈ 0.124 [cP]

Note: Subcooling ΔT_{SC} = T_{SAT}(P_{LIQ}) - T_{LIQ} Kinematic viscosity (ν_{LIQ}): 1.261E-07 [m²/s] ≈ 0.1261 [cSt]

© Grundfos 2010
Version 1.00
04-02-2010

Compressor Performance

Compressor Performance er grundlæggende en revision af et af de værktøjer, der distribueres sammen med CoolPack. Programmet kan benyttes til at regne isentropisk og volumetrisk virkningsgrad ud for en kompressor (incl. en transkritisk kompressor), og dermed kan man evaluere kompressorens ydelse ved driftssituationer, der er forskellige fra driftssituationen opgivet af en fabrikant.

CoolPack

COMPRESSOR CALCULATIONS

> CALCULATION OF ISENTROPIC AND VOLUMETRIC EFFICIENCIES

DIAGRAM

$\Delta T_{SH,USE}$: 5.0 [K]

$\Delta T_{SH,UNUSE}$: 30.0 [K]

$\Delta T_{SH,TOT}$: 35.0 [K]

REFRIGERANT | R744

TEST CONDITION

T_E [°C] : -10

$\Delta T_{SH,USEFUL}$ [K] : 5

T_1 [°C] : 25

p_{GC} [bar] : 90

$T_{GC,OUT}$ [°C] : 25

Choose p_{GC} for transcritical operation p_{GC} [MPa] : 9.0

DISPLACEMENT

$\dot{V}_{D,100\%}$ [m³/h] : 3.20

f_{CAP} [%] : 100.0

$\dot{V}_{D,100\%}$: 3.20 [m³/h]

CAPACITY

\dot{Q}_E [kW] : 7.5

η_{VOL} : 0.836

\dot{Q}_E : 7.500 [kW]

\dot{m} : 0.0409 [kg/s]

\dot{V}_{SUC} : 2.676 [m³/h]

PERFORMANCE

\dot{W} [kW] : 4

η_{IS} : 0.688

\dot{W} : 4.000 [kW]

COMPRESSOR HEAT LOSS

f_Q [%] : 10

f_Q : 10 [%]

T_2 : 141.7 [°C]

\dot{Q}_{LOSS} : 0.400 [kW]

COP : 1.875

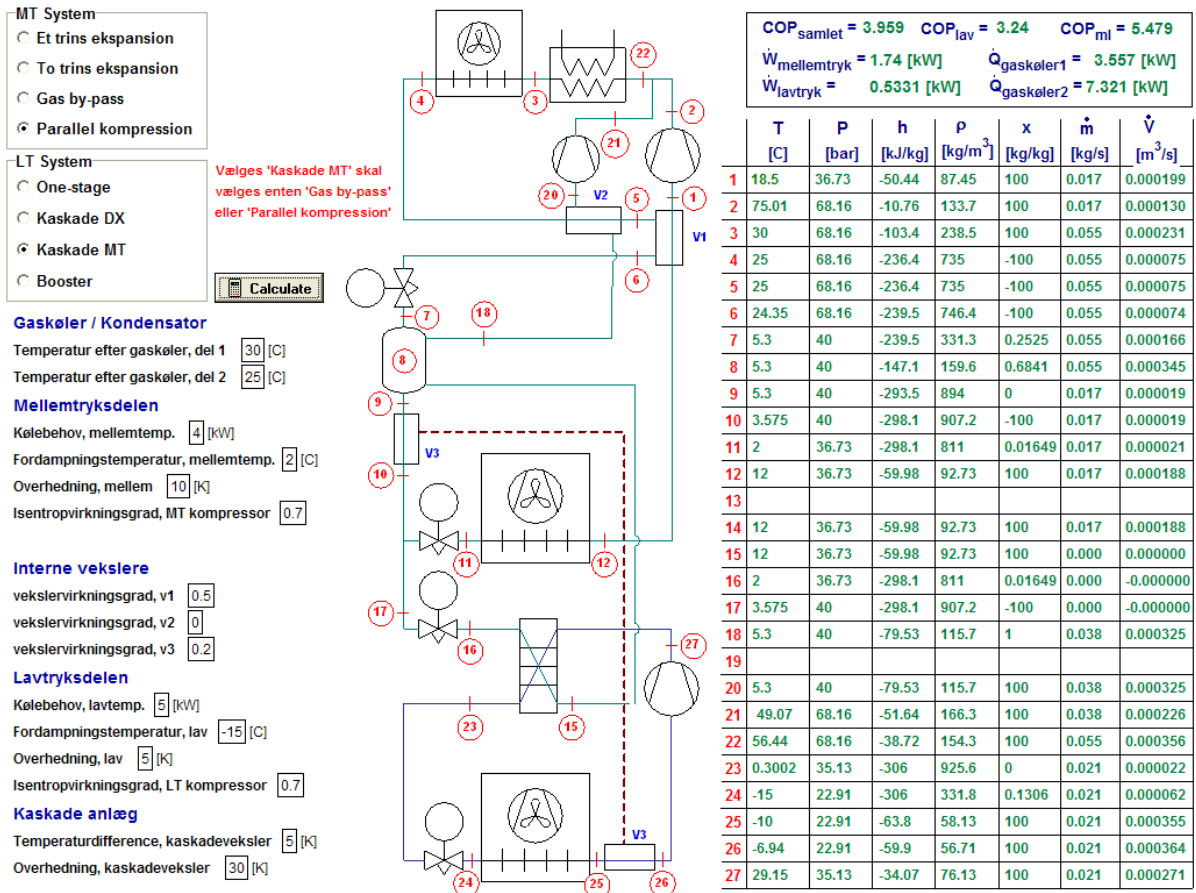
COP^* : 2.248

p_2/p_1 : 3.40

Version 2.00
TOOL A.1X

CO₂ Kredsprocesberegner

CO₂ kredsprocesberegner er et ekspertværktøj, som kan benyttes til at undersøge detaljer omkring transkritiske CO₂ anlæg:



Formidling

Projektets resultater har været præsenteret ved følgende konferencer, møder, foredrag og kurser:

Artikler

"Årsenergiforbrug for transkritiske CO₂ anlæg", *Morten Juel Skovrup, IPU*. Danske Køledage 2009 samt i HVAC-Magasinet nummer 6, 2009 p. 47.

"Transkritisk kontra subkritisk – valg af CO₂-køleanlæg i Danmark", *Kenneth Madsen, Danfoss og Christian Heerup, Teknologisk Institut*. Danske Køledage 2009.

"Hvor små kan ammoniak køleanlæg blive", *Alexander Cohr Pachai, Johnson Controls Denmark*. Danske Køledage 2009.

"Ammonia Safety by Design and Maintenance", *Alexander Cohr Pachai, Johnson Controls Denmark*. International Institute of Refrigeration Bulletin 2010-1.

"Beregning af års energiforbruget i forskellige klimazoner". *Alexander Cohr Pachai, Johnson Controls Denmark*. Norske Kjøleteknisk Møde 11+12 marts 2010.

"Using Natural Refrigerants in the Cold Chain". *A. C. Pachai, M. A. Jones, Johnson Controls*. 1st IIR International Conference on Sustainability and the Cold Chain. 29th, 30th and 31st March 2010, Selwyn College, Cambridge UK

Undervisning

Advansor's kurser for kunder – 12 gange årligt med 6-12 kursister per kursus

Teknologisk Instituts kurser vedrørende CO₂

DTU's kurser i køleteknik

Præsentationer

"Yearly energy consumption of transcritical CO₂", *Morten Juel Skovrup, IPU*. Indlæg fra strategisk temadag hos Nilan A/S, 15-5-2009. Publiceret på www.R744.com.

Advansor: Norpe Partnermøde, Norge, 28-29/1-2010

Diverse omtale på www.R744.com.

Møder

Advansor: Diverse salgsmøder: England, Schweiz, Norge, Sverige, DK

English Abstract

The Project "Development and use of simulation tools for energy optimisation of refrigeration systems with CO₂ as the refrigerant" has been carried out in the period from March 2007 to December 2009 with participation of:

- IPU (project responsible), by Morten Juel Skovrup and Mette Havgaard Vorre
- Advansor, by Kim G. Christensen
- Danfoss by Hans Ole Matthiesen
- Grundfos, by Bjarne D. Rasmussen
- Johnson Controls, by Alexander Cohr Pachai
- Teknologisk Institut, by Pia Rasmussen
- Knudsen Køling, by Torben Olsen
- Autoriserede Kølefirmaers Brancheforening, by Lau Vørs



The project is financed by ELFOR, project 339-046.

The purpose of the project is (as stated in the application):

The purpose of the project is, based on running experience and known problems, to identify the need for calculation- and simulation tools and thereafter develop these tools and makes them available for the Danish refrigeration industry so that the energy consumption of refrigeration systems using CO₂ as a refrigerant is minimized.

The project has resulted in the following reports and simulation tools:

Reports

1. **Danfoss CO₂ Application Handbook**, which gives an introduction to CO₂ as refrigerant, transcritical and subcritical systems and the control of these.
2. **CO₂ Encyclopedia**, which gives an introduction to the basic concepts, used in connection with especially transcritical systems.
3. **Fundamental cycle processes and options**, which gives an overview of the basic refrigeration cycles which can be used when CO₂ is used as a refrigerant.

Simulation Tools

1. **Pack Calculation II.** Simulation tool for comparing yearly energy consumption of refrigeration systems.
2. **Simple CO₂ one stage plant.** Tool for teaching the basics about CO₂ refrigeration systems.
3. **Refrigerant Circulation Pumps.** Tool for calculating and dimensioning refrigeration pumps – including CO₂ pumps.
4. **Compressor Performance.** Tool for converting a test condition for a compressor into another operating condition.
5. **CO₂ Kredsprocesberegner.** Experts tool for investigating details about transcritical CO₂ systems. Only in Danish.

Perspektivering

Den store interesse, der har været vist for projektets resultater, har bevirket, at flere firmaer har henvendt sig for at få deres produkter med i simuleringsprogrammerne.

Dette betyder, at programmerne vil blive benyttet af endnu flere brugere, og at fokus på CO₂ som kølemiddel er blevet forstærket.

Projektets fokus på årsenergiforbrug har bevirket, at fordommene omkring, at energiforbruget for køleanlæg med CO₂ som kølemiddel er højere end for traditionelle køleanlæg, er blevet nedbrudt. Projektets resultater har vist, at fordelene ved CO₂ ophæver ulemperne i en sådan grad, at det kan være fordelagtigt at benytte CO₂ som kølemiddel i hele Europa, med undtagelse af de mest sydlige områder.

De gode erfaringer med beregning af årsenergiforbrug, har medført at projektets resultater er blevet benyttet i flere andre ELFOR projekter:

- Projekt 340-006. Naturlig køling - reduktion af energiforbrug til køling af processer og bygninger
- Projekt 341-026. Fremtidens Køletårne.

Resultaterne fra projektet videreføres i ELFOR projekt 342-051 "Optimering af køle- og varmepumpeanlæg gennem samspil mellem PackCalc og BSim", som fokuserer på dels belastningssiden af køleanlægget; men også på at inddrage beregninger af årsenergiforbrug for varmepumper.