

Det energieffektiva kylbatteriet

- Förstudie

Caroline Haglund, SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut AB
Per Fahlén, SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut AB

Abstract

Different types of finned-tube coils with aluminium fins on expanded copper tubes are often used as cooling-coils in display cabinets and other types of refrigerating equipment. Such a coil is originally designed for evaporation of a refrigerant. Lately, major changes regarding regulations for the use of synthetic refrigerants have been taking place. This has led to an extended use of indirect cooling by means of a secondary coolant (brine). For indirect cooling the heat transfer coefficient on the tube-side will be much lower than in the case of direct evaporation. Hence it is appropriate to analyze the optimal distribution of heat transfer area between the air and brine sides. Furthermore, it is important to investigate the economic and technical possibilities for improvements of the heat transfer characteristics on the tube-side without increasing the pressure loss too much.

To start with, the limitations and possibilities for improvements for traditional air-coils will be studied. Thereafter, different types of modifications on the tube-side will be evaluated. Finally, the project may lead to a proposal for a completely new type of cooling-coil designed for indirect cooling.

The project started in August 2000. A literature review, aiming at studying heat transfer enhancement techniques for laminar flow, is going on. In addition, testing equipment for full-scale performance evaluation of air-coils for display cabinets has been constructed and measurements on traditional types of air-coils are in progress.

Sammanfattning

Olika typer av flänsbatterier med aluminiumfänsar på expanderade kopparrör används ofta som kylbatterier i kyl- och frysdiskar. Dessa kylbatterier är ursprungligen framtagna för direktförångning av köldmedium, men den stora omställning som skett på senare tid beträffande kraven på syntetiska köldmedier har lett till att det blir allt vanligare med indirekta kylsystem i livsmedelsbutiker. Vid indirekt kylning med traditionella köldbärare blir värmeöverföringskoefficienten på rörsidan i kylbatteriet mycket lägre jämfört med vid direktexpansion, om inte batteriet modifieras. Det finns därför anledning att analysera hur den optimala fördelningen mellan ytorna på luft- och köldbärarsidan påverkas vid övergång till köldbärarkylning. Dessutom är det viktigt att undersöka vilka åtgärder som är tekniskt och ekonomiskt möjliga för att förbättra värmeöverföringen på rörsidan utan att pumparbetet ökar för mycket.

Till att börja med ska begränsningarna och förutsättningarna för förbättringar hos traditionella typer av kylbatterier studeras. Därefter ska olika typer av förändringar på rörsidan undersökas. Avslutningsvis kan projektet leda till att ett förslag på en helt ny typ av kylbatteri, som är optimerat för rådande förhållanden vid indirekt kylning, tas fram.

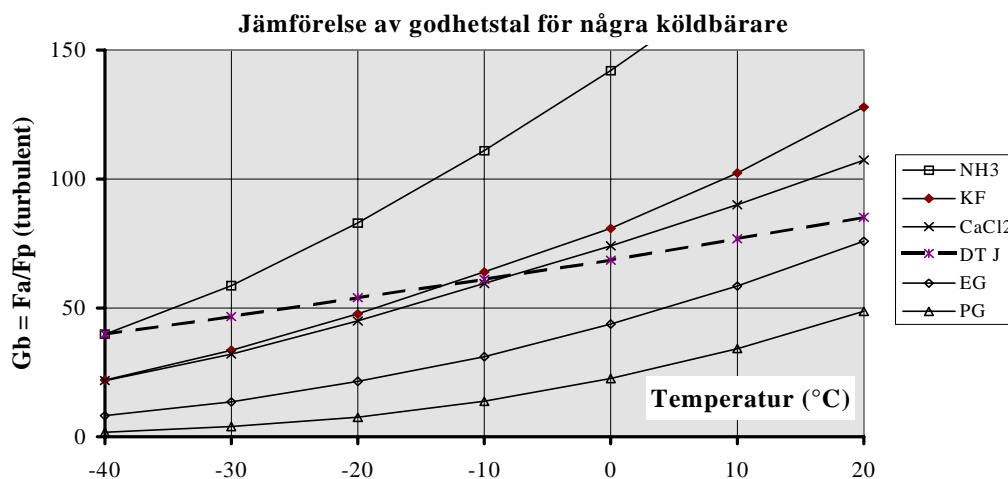
Projektet startades i augusti 2000. En litteraturstudie med syftet att undersöka möjligheterna att förbättra värmeöverföringen vid laminär strömning har påbörjats. Dessutom har en försöksutrustning för fullskaleprovning av kylbatterier byggts upp och mätningar på traditionella kylbatterier pågår.

Innehållsförteckning

1	Bakgrund och motiv för projektet.....	1
2	Syfte och mål	2
3	Forskare och industrirepresentanter som arbetat i projektet.....	3
4	Projektets genomförande	4
4.1	Projektplan.....	4
5	Resultat	5
6	Energi, miljö samt industriell relevans	7
7	Examina	7
8	Publikationer.....	7
9	Internationell samverkan	7
10	Slutsats och diskussion	7
11	Referenser	8

1 Bakgrund och motiv för projektet

En viktig komponent i kyldiskar och andra kyl- och frysutrustningar är kylbatteriet. Traditionellt används olika former av flänsbatterier med aluminiumflänsar på expanderade kopparrör, vilka ursprungligen tagits fram för direktförångning. I och med den stora omställning som skett beträffande kraven vid användning av syntetiska köldmedier har intresset för indirekta system ökat markant och i Sverige byggs t ex numera huvudsakligen indirekt kylda butiker. Vid indirekt kylning med köldbärare kan emellertid värmeövergångskoefficienten på rörsidan vara storleksordningen tio gånger lägre än vid direktförångning om man inte förändrar batteriet eller väljer effektivare köldbärare än de som används traditionellt. Samtidigt måste strömningshastigheterna begränsas, inte minst med hänsyn till strömningssrelaterad korrosion. Här behövs ytterligare kunskap, speciellt för en del nya typer av köldbärare av typen organiska salter. Figur 1 (Fahlén², 2000) illustrerar de stora skillnader i godhetstal som finns mellan olika köldbärare (godhetstalet anger förhållandet mellan överförd värmeeffekt och erforderlig pumpeffekt). Vid laminär strömning blir godhetstalen betydligt högre än vid turbulent strömning.



Figur 1. Fa/Fp för några köldbärare. Fryspunkt = -40 °C, turbulent strömning (vattenbaserade: PG = propylenglykol, EG = etylenglykol, NH₃ = ammoniak, CaCl₂ = kalciumklorid; KF = kaliumformiat; ej vattenbaserad: DT J = Dowtherm J).

Det finns således anledning att analysera hur den optimala fördelningen mellan ytorna på luft- och köldbärarsidan påverkas vid övergång till köldbärarkylning samt vilka åtgärder som är tekniskt och ekonomiskt möjliga för att förbättra värmeöverföringen på rörsidan utan att pumparbetet ökar för mycket. Det finns dessutom stora fördelar om man med förbättrad värmeöverföring kan höja batteriets temperatur så mycket att påfrysning kan undvikas. Det gäller såväl energimässigt som beträffande varukvaliteten. Andra applikationer för köldbärarkylda luftvärmexlaren är exempelvis stora frånlufts- och uteluftsvärmepumpar, luftkonditioneringssystem och vätskekopplade system för värmeåtervinning. Dessa tillämpningar har likartade temperatur- och fuktförhållanden och kan alla dra nytta av minskade problem med påfrysning. Angående referenser se Axell and Fahlén (1998), Fahlén (1996), Fahlén¹ (2000) and Fahlén² (2000).

2 Syfte och mål

De mål som beskrivs nedan gäller för hela projektet ”Det energieffektiva kylbatteriet”. Denna förstudie omfattar delmål 1 och 2 (se ”4. Projektets genomförande”).

Projektet avser att analysera begränsningarna beträffande värmeöverföring och tryckfall i dagens köldbärarkylda flänsbatterier och därefter bedöma förutsättningarna till förbättringar. På kort sikt syftar arbetet till att genom åtgärder i första hand på rörsidan förbättra värmeöverföringen i konventionella batterier (val av köldbärare, rörytor, insatser, batterigeometri m m). Samtidigt måste förhållandena på luftsidan hela tiden beaktas (t ex flänstyp, flänstjocklek, delning m m).

Målet är att visa att moderna indirekta kylsystem kan utföras energieffektivare än dagens standardlösningar för direktexpansion. Värmeöverföringen bör bli lika bra vid $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ köldbärartemperatur i ett batteri som utformats speciellt för köldbärare som i ett traditionellt batteri med vatten och temperaturen $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ och vattenhastigheten 1 m/s . Genom val av ett effektivt kylbatteri ska yttemperaturerna i många applikationer kunna hållas uppe på en nivå så att avfrostning inte behövs.

En fortsättning på arbetet kan ge förslag till helt nya typer av köldbärarkylda batterier som inte bygger på tekniken med flänsade rör. Eftersom man ofta arbetar med strömning som är laminär eller i omslagsområdet både på luft- och köldbärarsidan kan det vara intressant att titta på konfigurationer med små hydrauliska diametrar, vilka kan ge höga värmeövergångskoefficienter även i det laminära området (ur denna synpunkt är cirkulära rör det sämsta alternativet).

En annan potentiell vidareutveckling är att välja lämplig ytbehandling, eller att helt göra batteriet i material med stor kontaktvinkel mot vatten (t ex vissa plaster). Därmed kan påfrysning förhindras även vid yttemperaturer väsentligt under fryspunkten. Med sådana material kan droppkondensation istället för filmkondensation stimuleras, vilket förbättrar värmeöverföringen och underlättar dränering av kondensatet.

Slutmålet är att få fram ett kylbatteri som påtagligt bidrar till att ytterligare sänka energibehovet med 25 % från nivån för den vinnande disken i Nutek's tävling. Samtidigt ska differensen mellan kallaste och varmaste vara är mindre än 5 K (se SP-projektet ”Den energieffektiva kyldisken”). Kylning till en varutemperatur av $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ skall vara möjligt utan aktiv avfrostning.

Delmål 1: Sammanställning av tidigare arbeten.

Delmål 2: Redovisning av förbättringspotential vid optimering av konventionella flänsade rörbatterier för kylning med köldbärare. Analys och mätning.

Delmål 3: Redovisning av förbättringspotential vid introduktion av nya geometrier och material, både på rörsidan och flänssidan (ytförstoringar, ”strip-fins” etc.) i köldbärarkylda batterier, speciellt vid låga Reynoldstal. Analys och mätning.

Delmål 4: Analys av köldbärarkylda kylbatterier konstruerade för laminära flöden med stora aspektförhållanden och liten hydraulisk diameter och därmed höga värmeövergångskoefficienter. Konstruktionen ska även göra att batteriet är lätt att avfrostas och har låga tryckfall. Praktiska resultat för värmeöverföring och tryckfall på tubsidan med olika köldbärare och olika kanalgeometrier.

Delmål 5: Praktiska erfarenheter beträffande strömningsinducerad korrosion vid användning av organiska salter som köldbärare. Bedömning av begränsningar för strömningshastighet.

Delmål 6: Underlag för en licentiatavhandling.

3 Forskare och industrirepresentanter som arbetat i projektet

Caroline Haglund, SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut

Per Fahlén, SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut

Monica Axell, SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut

Bengt Sundén, Kraft- och Värmeteknik LTH

ABB Coiltech

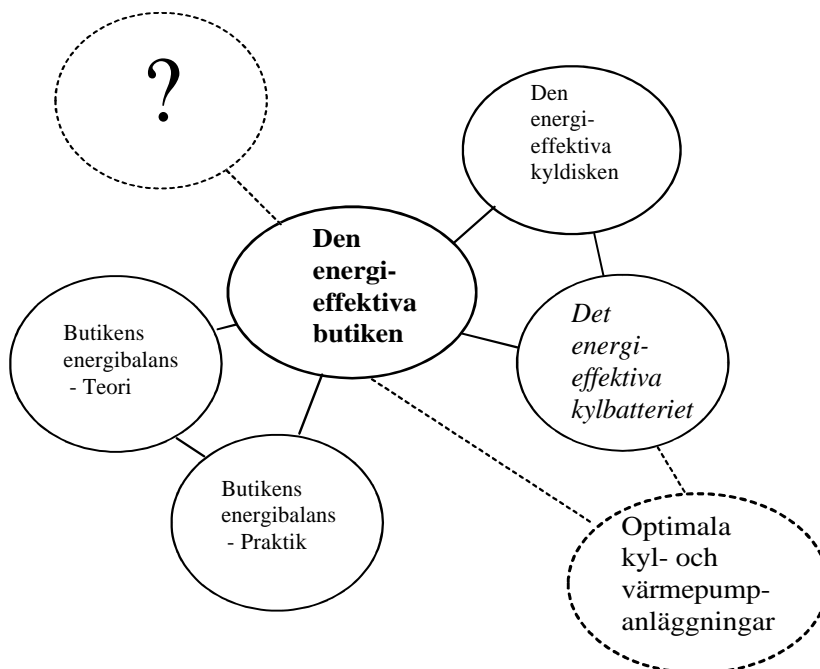
Aspen Petroleum

Cetetherm

Hydro Chemicals

Wica Cold

Eftersom projektet har en stark koppling till projektet "Den energieffektiva kyldisken" äger visst samarbete rum mellan dessa två projekt. Ett exempel på detta är de pågående försöken med de konventionella kylbatterierna.



4 Projektets genomförande

Projektplanen nedan gäller för hela projektet ”Det energieffektiva kylbatteriet”. Denna förstudie omfattar del 1 och del 2 exklusive det sista delmomentet (tillverkning och uppmätning av optimerade konventionella batterier) enligt 4.1 i nedanstående projektbeskrivning. Avsikten är att gå vidare med hela projektet inom den förväntade fortsättningen av Klimat 21. Del 1 och 2 pågår för tillfället.

4.1 Projektplan

Del 1: Sammanställning av tidigare arbeten.

- Litteratursökning via databas (Ei Compendex, Fridoc m.fl.).
- Personliga kontakter med branschfolk (tillverkare, konsulter, installatörer och servicepersonal, brukare, provnings- och forskningsinstitutioner som DTI, Cetiat, TNO, LTH, KTH, DTU, University of Illinois/Urbana etc.).
- Val av optimeringskriterier.

Del 2: Redovisning av optimerade konventionella kylbatterier.

- Värmeöverföring och tryckfall bestäms för traditionella batterier vid olika driftsförhållanden och med olika köldbärare.
- Förhållandet mellan luftberörd och vätskeberörd yta optimeras för köldbärarkylning. Kapacitet och tryckfall beräknas.
- Optimerade batterier tillverkas och testas m.a.p. kyleffekt och tryckfall. Max ytbelastning innan påfrysning börjar undersöks för olika fukt/temperaturförhållanden. Jämförelse med standardbatterier och traditionell köldbärare (glykol, etanol).

Del 3: Redovisning av nya geometrier för flänsade rörbatterier.

- Värmeöverföring och tryckfall på köldbärarsidan undersöks för några olika rörtyper, t.ex. med olika form, ”invärtes” ytförstoringar, m.m. och några olika typer av köldbärare (vatten och släta rör som referens). Modeller för värmeöverföring och tryckfall anpassas.
- Kompletta batterier tillverkas för några lovande kombinationer, testas och jämförs med det optimala konventionella batteriet i del 2.
- Teoretisk bedömning av potentialen för användning av nya material (t ex polymera material).

Del 4: Redovisning av kanaler för laminär strömning

- Förutsättningarna att utnyttja tunna kanaler för laminär strömning analyseras.
- Tunna kanaler för laminär strömning tillverkas.
- Tuberna testas m.a.p. värmeöverföring och tryckfall.
- Matematisk modell jämförs med experimentella data.

Del 5: Redovisning av risker för strömningsinducerad korrosion

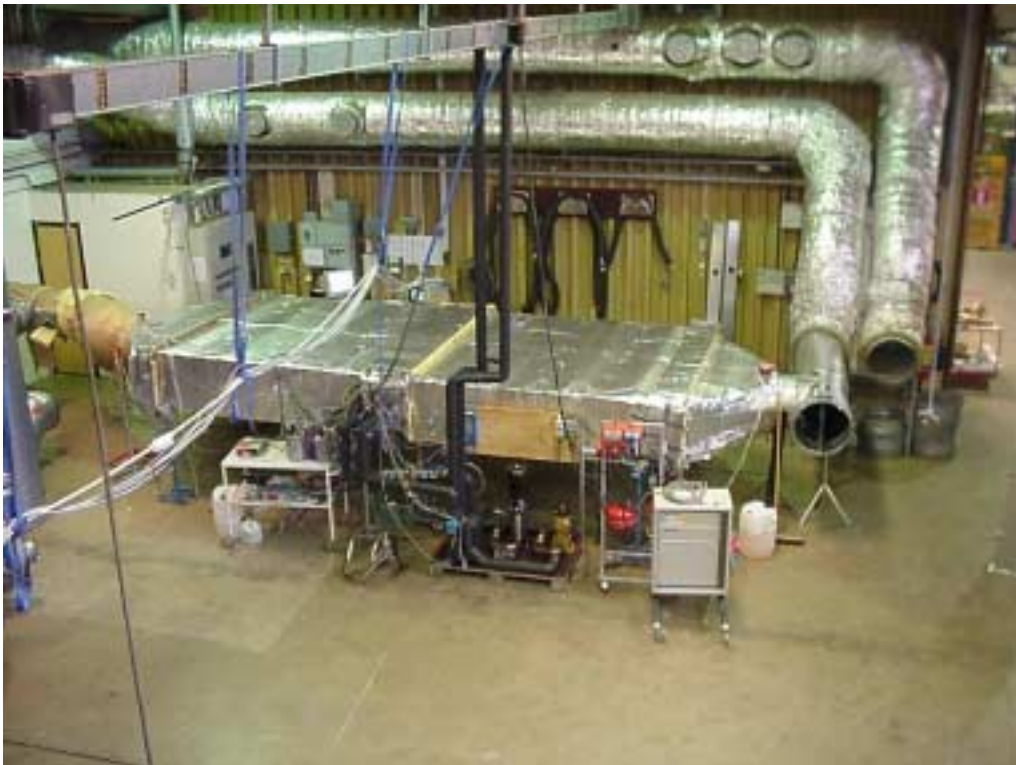
- Erfarenheter från fältet sammanställs.
- Teoretiska förutsättningar analyseras för användningen av organiska salter.

Del 6: Underlag för en licentiatavhandling.

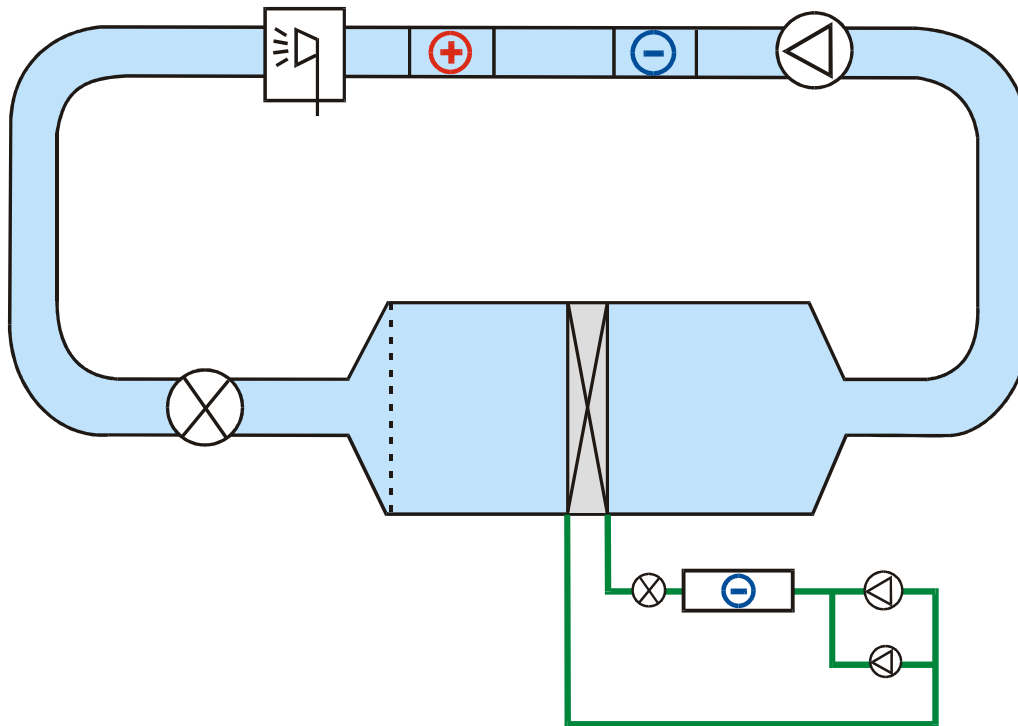
5 Resultat

Projektet startade i augusti 2000.

Försöksutrustning för fullskaleprovning av konventionella kylbatterier avsedda för indirekt kylda kyldiskar har byggts upp (se figur 2 och 3) och försöken har påbörjats. I denna försöksutrustning ska till att börja med två olika kylbatterier med olika konfiguration provas vid olika flöden på både luft- och köldbärarsidan. Försök planeras dessutom med olika typer av köldbärare.



Figur 2. Försöksutrustning för fullskaleprovning av konventionella kylbatterier



Figur 3. Principskiss över försöksutrustning för fullskaleprovning av konventionella kylbatterier.

Parallellt med detta arbete pågår en litteraturstudie för att samla upp befintlig kunskap och utgå från denna i det vidare arbetet. Det går snabbt att konstatera att betydligt mer arbete är gjort för att undersöka och förbättra värmeöverföringen på värmeväxlarens luftsida jämfört med vad som är gjort på vätskesidan, se Brauer (1964), Jang and Yang (1998), Madi and Heikal (1998) and Valencia *et al.* (1996). Detta har sin förklaring i att den största delen av värmeöverföringsmotståndet i många applikationer är på luftsidan. I de fall en vätska med hög viskositet, såsom t.ex. propylenglykol, används som köldbärare på vätskesidan kan emellertid värmeöverföringsmotståndet på rörsidan bli av betydande storlek. Det finns ett flertal studier av både experimentell och numerisk karaktär där värmeöverföringen på rörsidan vid laminär strömning har förbättrats på olika sätt (Bergles and Joshi, 1983). Ett sätt är att försöka öka den relativa längden på inloppssträckan, d.v.s den sträcka där gränsskikten inte är fullt utbildade, med hjälp av modifiering av rörinloppet. Ett annat sätt är att införa så kallade "twisted tape inserts" eller invärtes ytförstorningar såsom longitudinella flänsar (Marnier and Bergles, 1978; Soliman and Feingold, 1978). Värmeöverföringen på rörsidan vid laminär strömning kan också ökas genom att försöka skapa sekundära strömmar för att bryta upp de bildade gränsskikten. Detta kan åstadkommas genom att införa rörkrökar etc. (Snyder *et al.*, 1993; Choi and Anand, 1993). Även om rektangulära, ovala eller platta tuber använts i många olika värmeväxlarapplikationer (Chang *et al.*, 1997), t.ex. i radiatorer i bilar, finns det få studier som behandlar värmeöverföring kontra tryckfall vid laminär enfas strömning inuti rören för olika tvärsnittsgeometrier.

6 Energi, miljö samt industriell relevans

Arbetet har en inriktning som ger underlag för att minska elanvändningen och den indirekta miljöbelastning som följer av elproduktion. Direkta miljövinster kan göras genom minskad hantering av köldmedier vid en övergång till indirekta system under förutsättning att lämpliga köldbärare används.

Vertikala kyldiskar är storförbrukare av el och kylbatteriet är en nyckelkomponent i dessa diskar. Värmeåtervinning med hjälp av frånluftsvärmepump eller vätskekopplade värmeväxlarsystem är viktiga hjälpmedel för att minska behovet för värmning av fastigheter. Samtidigt ökar behovet av komfort- och apparatkyla stadigt. Indirekta kylsystem har stora möjligheter att utnyttja olika former av frikyla och därmed minska drivenergi-behovet till kylkompressorer. Genom arbetet med indirekt kylda kylbatterier ökar flexibiliteten vid val av köldmedium och mängden köldmedium i anläggningen minskar.

Kylbatterier tillverkas i Sverige av små och medelstora företag, vilka inte har möjlighet att själva bedriva kvalificerad FoU-verksamhet. Projektet har därmed stort intresse även ur ett SMF-perspektiv (SMF = små och medelstora företag; prioriterad inriktning för tillämpad forskning). Den industriella relevansen säkras huvudsakligen genom medverkan av ett antal svenska industriföretag.

7 Examina

Licentiatexamen kommer att avläggas inom ramen för en fortsättning av projektet. Datum för detta är inte fastlagt.

8 Publikationer

Inga publikationer är gjorda inom ramen för detta projekt. Caroline Haglund har dock medverkat i publikationen "Den energieffektiva kyldisken" (M. Axell, P. Fahlén, C. Haglund, Klimat 21-dagen november 1999), vilken berör förutsättningarna för kylbatteriets funktion.

9 Internationell samverkan

Internationell samverkan planeras med University of Illinois/Urbana i USA, Bristol University i England, DTI i Danmark, Cetiat i Frankrike och TNO i Holland.

10 Slutsats och diskussion

Kylsystem i livsmedelsbutiker och liknande har under lång tid optimerats för direktexpansion. Det faktum att indirekt kylning skapar helt andra förutsättningar för optimering av energiförbrukning gör att undersökningar för att anpassa kylsystemets olika komponenter, såsom till exempel kylbatterierna, för dessa förutsättningar är nödvändiga. Vätskeströmningen i indirekta kylsystem är ofta laminär på grund av att många av de köldbärare som används idag, exempelvis propylenglykol, har hög viskositet vid låg temperatur. Fördelen med formiat- och acetatbaserade köldbärare är att de har betydligt lägre viskositet, men det finns uppgifter från fältet att problem med strömningsrelaterad korrosion kan uppstå vid användandet av denna typ av köldbärare. Detta gör att alltför höga flödes hastigheter samt generering av sekundära strömmar för destabilisering av gräns-

skikten i rören bör undvikas. Detta talar för att den bästa metoden att förbättra värmeöverföringen på vätskesidan i indirekta kylsystem förmodligen är införandet av kanaler med små hydrauliska diametrar.

11 Referenser

M. Axell and P. Fahlén, Promotion of energy efficient display cabinets, *Joint international conference of IIR D1, D2/3. Refrigerated transport, storage and retail display, Cambridge, United Kingdom* (1998)

H. Brauer, Compact heat exchangers, *Chemical Process Engineering*, 45, 451-460 (1964)

A. E. Bergles and S. D. Joshi, Augmentation techniques for low Re in tube flow, *Low-Reynolds Number Flow Heat Exchanger*, 694-720 (1983)

Y. P. Chang, R. Tsai and J. W. Hwang, Condensing Heat transfer characteristics of aluminium flat tube, *Applied Thermal Engineering*, 17, 1055-1065 (1997)

J. M. Choi and N. K. Anand, Heat transfer in a serpentine channel with a series of right-angle turns, *Numerical Heat Transfer, Part A*, 23, 189-210 (1993)

P. Fahlén, Frosting and defrosting of air-coils, *Document D36:1996*, Chalmers University of Technology (1996)

P. Fahlén¹, Luftkylare med påfrysning och avfrostning (2000)

P. Fahlén², Butikskyla (2000)

J.-Y. Jang and J.-Y. Yang, Experimental and 3-D numerical analysis of the thermal-hydraulic characteristics of elliptic finned-tube heat exchangers, *Heat Transfer Engineering*, 19, 55-67 (1998)

M. A. Madi, R. A. Johns and M. R. Heikal, Performance characteristics correlation for round tube and plate finned heat exchanger, *International Journal of Refrigeration*, 21, 507-517 (1998)

J. Marner and A. E. Bergles, Augmentation of tube side laminar flow heat transfer by means of twisted tape inserts, static mixer inserts, and internally finned tubes, *Proceedings Sixth International Heat Transfer Conference* (Toronto), 2, 583-588 (1978)

B. Snyder, K. T. Li and A. Wirtz, Heat transfer enhancement in a serpentine channel, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 36, 2965-2976 (1993)

M. Soliman and A. Feingold, Analysis of heat transfer in internally finned tubes under laminar flow conditions, *Proceedings Sixth International Heat Transfer Conference* (Toronto), 2, 571-576 (1978)

A.Valencia, M. Fiebig and N. K. Mitra, Heat transfer enhancement by longitudinal vortices in a fin-tube heat exchanger element with flat tubes, *ASME Journal of Heat transfer*, 118, 209-211 (1996)