

Effektiva förångare till kyl- och frysskåp

Erik Björk,
Energiteknik, KTH
Brinellvägen 60, 100 44 Stockholm.
Telefon 08-7908653, E-post: bjork@egi.kth.se

Sammanfattning

Projektet målsättning är att finna korrelationer för värmeöverföring och tryckfall på köldmediesidan i kyl- och frysförångare. Härigenom skall ett designverktyg skapas för framtida förångare med överlägsna prestanda. Hittills har projektet karakteriserat normala arbetsförhållandena och påvisat svagheter hos dagens förångare. Bl.a. har det visats att betraktade förångare ej används effektivt som komponent. Under start lämnar en stor del av köldmediet förångaren i vätskeform utan att förångas. Dessutom används en relativt stor del (ca 10%) av förångaren till överhettning dvs används ej för aktiv köldastning. Ett tryckfall motsvarande 1-2°C har uppmätts över förångaren och ytterligare 1°C över sugledningen. Visualiseringar av temperatur- och hastighetsfält på och i förångaren har utförts. Från detta finns 10 timmar film med värmekamera och 7 timmar film av glasförångaren dokumenterade. En numerisk modell av förångarens temperaturfält har också utförts. Inom projektet har ett examensarbete utförts "Redistribution of migrated refrigerant. A study of migration related cycling losses" där det bl.a. visas hur förångaren efter start fylls upp med köldmedium.

Abstract

The targets of this project are to establish correlation for heat transfer and pressure drop at the refrigerant side of evaporators for domestic refrigerators and freezers. From this a design tool will be created to create tomorrows evaporators with superior performances. So far the project has characterised the normal working conditions and spotted weaknesses of today's evaporators. It has been showed that the evaporator is not working efficient as component. During start a large part of the refrigerant is pumped out from the evaporator without evaporation. Furthermore a relative large part of the evaporator (app 10%) is used only for superheating. A pressure drop corresponding to 1-2°C was measured over the evaporator and another 1°C over the suction line. Visualisations of the temperature- and velocity field have been made. From this 10 hours of film with IR-camera and 7 hours of film on the glass evaporator is documented. A numeric model of the evaporator's temperature field has also been done. Within the project a master thesis has been carried out " Redistribution of migrated refrigerant. A study of migration related cycling losses" where it for instance is showed how the evaporator is filled up with refrigerant during start-up.

Innehållsförteckning

Bakgrund och motiv för projektet.....	1
Syfte och mål.	2
Forskare och Industrirepresentanter i projektet	2
Projektets genomförande	2
Resultat	4
Energi och Miljö	5
Industriell Relevans	5
Examina	5
Publicering	6
Internationell Samverkan	6
Slutsatser och diskussion	6

Bakgrund och motiv för projektet

Trots att kyl- och frysskåp tillverkas i stora serier utformas dess förångare mestadels på fingertoppskänsla och tumregler. Hur stor potential det finns till energieffektivisering för dessa förångare är okänt. Vad som händer i dessa komponenter beskrivs som *"ett famlande i mörker"* och är i detalj okänt. Många problemställningar industrin tampas med är också relaterade till denna komponent. *"-var är köldmediet när?", "-kan fyllnadsmängden minskas med bibehållen prestanda?", "-var är oljan när?", "-varför pulserar flödet?", "-hur uppstår de störande oljuden?"*. m.m.

Det är känt från termodynamiken att kylmaskinens köldfaktor (dvs den kyleffekt man får per krona) ökas med minskande temperaturlyft. Ett minskande temperaturlyft kan bl.a. åstadkommas genom effektivare värmeväxlare och/eller ett minskande tryckfall genom dessa. För de förhållanden som gäller för hushållskyla motsvarar varje grad på förångartemperaturen ca 4% på köldfaktorn.

Dagens energisnåla produkter åstadkoms huvudsakligen genom tjockare och bättre isolering, effektivare kompressorer (mer koppar i motorn) och större värmeväxlarytor. Dessa systemförändringar kostar dock pengar. Störst möjlighet till framgång på marknaden har naturligtvis sådana effektiviseringar som kan utföras till minsta möjliga merkostnad. En optimal geometri på förångarens köldmediesida är en sådan åtgärd.

Electrolux tillverkar totalt cirka 10 miljoner kompressordrivna kyl/frysskåp per år. Med en genomsnittlig livslängd på åtminstone 10 år kan man anta att minst 100 miljoner Electroluxskåp finns i bruk runt om i världen. På lång sikt ska därför varje sparad Watt i dessa produkter multipliceras med 10^8 .

Drivkrafterna för ökad energieffektivisering kommer från olika håll. Ur kundens perspektiv är det en minskad elräkning, ur företagets en konkurrensfördel. En ytterligare drivkraft är myndighetskrav som omfattar vitvarors energibehov. I Europa har dessa redan fått stort genomslag både hos producenter och konsumenter. En liknande utveckling pågår i USA. Inom EU finns krav på hur stort energibehov ett kyl eller frysskåp får ha för att få säljas. Som exempel får ett kylskåp med innervolymen 250 liter (vilket är en ganska stor kyl) ha en medeleffekt på lite knappt 31 W.

En analys av ett kyl- och frysskåp med sk. livscykelanalys visar att huvuddelen av ett kylskåps negativa inverkan på miljön beror på energibehovet under drift. Miljöinverkan från tillverkning och skrotning/återvinning utgör endast en bråkdel.

Electroluxkoncernens centrala forsknings och utvecklingscenter för kylteknik, värmetransporter och strömning är beläget i Stockholm nära KTH. Electrolux, KTH och Sverige har därmed ett gemensamt ansvar för att kommande generationer av dessa produkter är energieffektiva.

Igenom högskolans självständiga roll kan en långsiktig kunskapsuppbyggnad ske skilt från industriellt kortsiktiga mål men styrt av dess grundläggande frågeställningar.

Härigenom kan industrin så småningom berikas med licentierad/doktorerad personal samt kunskap som gör morgondagens produkter energieffektivare.

Historiskt har Electrolux och KTH haft ett fruktbart utbyte. Det klassiska examensarbetet av Platen Munters gav Electrolux dåtidens storsäljare absorptionskylskåpet utan rörliga delar. Electrolux bekostade senare den professur åt Mats Bäckström som blev till dagens "Avdelningen för tillämpad termodynamik och kylteknik." där många kyltekniker fått sin skolning: En del av dessa har slutit cirkeln och jobbar idag för Electrolux.

Syfte och mål.

Syftet med projektet är att finna samband för värmeöverföring och tryckfall i den typ av kanalgeometrier och under de arbetsförhållanden som är karaktäristiska för kyl- och frysskåp.

Målet är att skapa ett (beräknings) verktyg för optimal dimensionering av förångarkanalerna.

Utöver dessa mål skall projektet generera en ökad förståelse av fenomen relaterade till förångaren.

Forskare och Industrirepresentanter i projektet

Följande personer har varit aktiva i projektet:

KTH:

Björn Palm, Projektledare

Erik Björk, Doktorand

Johan Nordenberg, Examensarbetare

Electrolux:

Per Wennerström, Handledare

Klas Andersson (t.o.m. -99) Handledare

Klimat 21 programstyrelse:

Mats Fehrm, Controller.

Projektets genomförande

Projektet har genomförts genom olika studier av existerande system dels för att karaktärisera typiska arbetsförhållanden, dels för att öka förståelsen för de mekanismer som inverkar och dels för att ringa in områden där potential för energieffektivisering finns. Ett examensarbete har utförts inom projektet med goda erfarenheter. Härutöver har en litteratursökning utförts. En rigg är under uppbyggnad för att experimentellt undersöka renodlade raksträckor av de förekommande kanalgeometrierna.

Projektet har ägnat tid åt visualiseringar av dels temperaturfältet genom IR-kamera och Termokroma Flytande Kristaller och dels hastighetsfältet med glasförångare. Olika mätningar med enbart termoelement och trycksensorer har därutöver utförts.

De flesta mätningarna har utförts på ett typkylskåp som tidigt identifierades. Att observera och mäta på ett så ostört system som möjligt ger relevant information på ett kostnadseffektivt sätt.

Ett angreppssätt som projektet försöker följa är att bygga korrelationer utifrån kunskap om hastighetsfältet (flödesregimen) och ej genom att betrakta förångaren som en svart låda. Att kunna förutsäga flödesregimen och därifrån beräkna tryckfall respektive värmeöverföring ger en djupare förståelse och resultat som blir mer allmängiltiga t.ex. vid framtida förändringar av förutsättningarna.

Under projektets gång har vissa resultat som framkommit funnits så intressanta att fokus tidvis förskjutits från de ursprungliga målen. Detta har lett till förseningar men har samtidigt gett viktiga resultat som säkerställer kvalitén i slutmålet. T.ex. har [observationer i glasförångaren](#) visat att en förekommande flödesregim är stratifierad men med överlagrade störningar av vätskepluggar som byggs upp intill krökar. Dessa leder till en fullständigt vätt kanalarea i den verkliga förångaren men hade mycket väl kunnat leda till en uttorkad kanal i överkant under laboratorieförsök med en renodlad raksträcka och med helt andra testresultat till följd. Vissa av de funna resultaten har också lett till att intresse riktats mot andra fenomen hos förångaren som också rymmer en potential för energieffektivisering.

Andra uttalade mål inom projektet har varit att besvara frågor såsom *var befinner sig köldmediet när?*

Detta har lett till undersökning av andra komponenter i kylsystemet än förångaren men också till undersökning av den dynamiska processen vid cyklisk drift. Även frågor om ljud och hur de uppkommer i förångaren har varit intressanta och iakttagelser i glasförångaren (återigen) har gett förklaringar till vissa ljud.

En litteraturundersökning har utförts där en omfattande samling av artiklar och konferensbidrag har insamlats. Här har en ganska bred sökstrategi tillämpats. Förutom skrifter om ren tvåfas strömning och dess mest närbesläktade områden såsom inverkan av olja har även skrifter om små kapillärrösstrypta kylsystem och dess komponenter inhämtats. Dessutom har de flesta skrifter som påträffats om kyl- och frysskåp som behandlar kylsystemet insamlats.

Förutom en numerisk modell över temperaturfältet på en vanlig s.k. roll-bond förångare har projektet ej ännu föreslagit beräkningsmodeller för tryckfall/värmeöverföring i de förekommande förångartyperna

Här ligger projektet sent med avseende på experimentella resultat. Ur litteraturen finns föreslagna korrelationer som främst gäller för cirkulära kanaltvårsnitt. Dessas tillämplighet skall undersökas mot experimentella resultat från en rigg som är under uppbyggnad. För de icke-cirkulära kanaltvårsnitten kan som en första approximation korrelationerna från de cirkulära tvärsnitten användas men med diametern utbytt mot hydrauliska diametern. Här återstår också experimentella resultat för att finna

tillämpliga samband. En metod har utvecklats att forma kopparrör till önskade kanalvärsnitt för experimentella studier. Uppskattningsvis är projektet försenat med ca 0,5 år med avseende på dessa experiment.

Resultat

Inom projektet har följande resultat framkommit:

IR-mätningar –99 ([Temperature measurement on Z-bond evaporator using IR-camera. Erik Björk 990630](#)) Förångaren i ett vanligt kylskåp (typkylskåpet) filmades med en IR-kamera. Resultatet var att förångaren under stationära förhållanden blev så isoterm att IR-kamerans temperaturupplösning ej räckte till för att urskilja de individuella köldmediekanalerna. Ett annat resultat var att förångaren under start töms på köldmedium som sedan successivt återfyller förångaren. Denna typ av cykliska förlust har kommit att undersökas ytterligare i [examensarbetet “Redistribution of migrated refrigerant. A study of migration related cycling losses”](#) Nordenberg –00 (obs ej slutgiltig version). Ytterligare ett resultat var att den vita lackfärgen som används på förångaren var relativt termiskt transparent. En enkel och billig effektivisering av förångaren kan alltså åstadkommas med förändrat ytskikt. Inget arbete har hittills utförts i detta spår men tester finns planerade för att fastställa potentialen.

TLC-mätningar -99. Förångaren i ett kylskåp målades med s.k. termokroma flytande kristaller (som ändrar färg med temperatur). Här valdes ett smalt omslagsintervall på 2 grader mellan $-17,9^{\circ}\text{C}$ till $-19,9^{\circ}\text{C}$. Resultatet från mätningarna blev att temperaturdifferensen mellan köldmediekanal och dess beflänsade omgivning var ca $0,2^{\circ}\text{C}$.

Glasförångare –00. Förångarkanalerna i typkylskåpet öppnades upp och täcktes med glasfront så att visuella observationer av köldmediet möjliggjordes. Ett traverserande kamerastativ möjliggjorde filmning av köldmediet under relativt ostörda förhållanden. Ca [7 timmar videofilm](#) finns dokumenterade från cykliska och stationära förhållanden.

Resultat

- [-identifiering av de förekommande flödesregimerna.](#)
- köldmediet pumpas ut ur förångaren under start för att successivt återfylla den (jämför IR –99 och Examensarbete-00).
- ljudfenomen kunde beskrivas. (t.ex. kunde det visslande ljud som uppstår under uppstart förklaras av att stående köldmedievätska bildar en förträngning ”vätskeflöjt” intill sugledningen som gas med hög hastighet passerar)

IR-mätningar –00. Här filmades förångaren och kondensorn separat under cykliska förhållanden. Filmerna sammanställdes och synkroniserades så att temperaturfältet i hela kylsystemet kunde åskådliggöras i en [animation](#). Filmerna gav en bra förståelse för systemets dynamik Ca [10 timmar film](#) finns dokumenterat. Resultat visar hur köldmediet efter start flyttas från förångaren till kondensorn där det backas upp (underkyls) innan det successivt återvänder och fyller upp förångaren.

[Tryck och temperaturmätning på standard kylskåp](#) -00. Typkylskåpet utrustades med tryckgivare för absolutmätning av tryck på kondensor och förångarsida samt med differenstryckgivare för mätning av tryckfall över förångare, kondensor och sugledning. Resultat från mätningar visar att tryckfallet över förångaren är ca 4 kPa (motsvarande ca 1 grad) under stationära förhållanden och ungefär det dubbla under uppstarten. För sugledningen och kondensorn låg tryckfallet också på ca 4 kPa vardera. Resultaten sammanställdes i h-logp diagram som gav en illustration av processen under statiska och dynamiska förhållanden ([animation](#)).

[Numerisk modellering av rollbondförångare](#). -00

En del arbete har gjorts för att modellera en rollbondförångare och härigenom erhålla ytans temperaturfält. Modellen är 2-dimensionell i förångarens plan men kommunicerar även värme till omgivande luft. Resultatet stämmer relativt bra med uppmätta värden och [IR-bild](#) över förångaren.

Diverse mätningar med termoelement

I ”[Försök för att avgöra uppfyllningstid](#)” framkommer att ca 7-14% av kompressorns gångtid används till att fylla undre delen av förångaren med köldmedium. I ”[Test to explore temperature gradient on heat exchangers](#)” undersöks inverkan av höjd belastning på förångare respektive kondensor.

Energi och Miljö

Som redan nämnts i bakgrund och motiv tillverkas de undersökta kylsystemet i stora mängder. En liten energibesparing per enhet blir här snabbt till en stor totalt sett. Projektet har hittills pekat på brister hos förångaren som komponent. Under en normal gångtid används ca 10% av förångarens yta till överhettning och deltar alltså ej aktivt i köldalstringen. Med ökande kunskap kan förhoppningsvis en energiminuskning erhållas på framtida kylsystem.

Industriell Relevans

Det kan tyckas märkligt att massproducerade kylsystem ej i högre utsträckning dimensioneras på vetenskaplig grund utan snarare på tumvärden och empiriska kunskaper. Detta är dock en del av industrins villkor där vinsten oftast prioriteras och resurserna först och främst sätts in för att hålla produktionen igång. Produkter som utvecklas skall snabbt ut på marknaden och ofta finns det ej tid för optimering av komponenter. Igenom högskolans självständiga ställning kan en långsiktig kunskapsuppbyggnad ske som i slutändan kan leda till kortare utvecklingstider (mindre trial and error) och energieffektivare produkter. Detta är av betydelse för svenskt näringsliv.

Examina

Arbetet förutsätts fortsätta i ett nytt projekt för att avslutas med en doktorsavhandling om ca 3 år.

Alla berörda parter har preliminärt visat intresse för en sådan fortsättning.

Publicering

“Flow regimes in a domestic refrigerator with roll-bond evaporator.” ExHFT-5, 5th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics. Thessaloniki, Greece, September 24-28, 2001.

Denna artikel beskriver observationer från ett kylskåp utrustat med glasförångare. De påträffade flödesregimerna var stratifierat, “churn” och annulärt.

“Two-phase flow in a domestic refrigerator with roll bond evaporator”, ICMF-2001 4th International Conference on Multiphase Flow, May 27-june 1, 2001, New Orleans, USA.

Denna artikel presenteras resultat från glasförångare version 2. För olika stationära driftfall har tryckfall, massflöde och temperaturer uppmätts samt videofilmer tagits.

“Redistribution of migrated refrigerant. A study of migration related cycling losses” Examensarbete av Johan Nordenberg, KTH, Stockholm -00

Arbetet har behandlat de cykliska förluster som uppstår till följd av omfördelning av köldmediet i ett cykliskt arbetande kapillärrensstrypt kylsystem. Mätningar har utförts med termoelement, IR-kamera och tryckgivare på olika kylskåpsmodeller. Resultat från mätningar visar hur stor del av förångaren som används till överhettning under cykliska förhållanden. Jämförelse görs mellan två olika förångartyper och förslag till förbättringar görs.

Internationell Samverkan

Projektet har ännu inte deltagit i någon internationell samverkan men kontakter är tagna med besläktade forskningsprojekt och fortsatta kontakter kommer att knytas vid kommande internationella konferenser. En förångarfabrik i Tyskland har hjälpt till med provmaterial. Projektets resultat har också visats upp på Electrolux fabriker i Italien.

Slutsatser och diskussion

Projektets mål är ännu ej uppfyllda. Efter inledande studier visades att en förmodligen större potential till energieffektivisering rymdes i de cykliska förlusterna kopplade till förångaren än de rent stationära tryckfallet och värmemotståndet som projektet ursprungligen siktat mot. Korrelationer för tryckfall och värmeöverföring är dock nyckeln för att komma vidare. Rätt använda kan dessa ge framtida förångare som närmar sig idealet där kokning sker i hela förångaren under hela kompressorns gångtid med ett högt vämeövergångstal och till ett lågt tryckfall. För att nå dit krävs dock ytterligare kännedom om inverkan mekanismer såsom oljan, krökar, lokala yteffekter, void fraction m.m. Ett rimligt slutmål är ett datorprogram för design av kanalmönster där konstruktören direkt kan se hur temperaturfältet ändras med kanaldragning.