

Den energieffektiva kyldisken

Monica Axell
SP - Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut
Energiteknik
Box 857
501 15 Borås

Förord

Detta arbete har utförts inom eff-Sys, Energimyndighetens utvecklingsprogram Effektivare kyl- och värmepumpssystem. Programmet har pågått under en treårsperiod och startades i mars 2001 som en fortsättning på de tidigare kollektivforskningsprogrammen Klimat 21 och Alternativa köldmedier. eff-Sys är ett samarbete mellan statens energimyndighet, fyra svenska högskolor, ett fyrtiotal företag inom kyl- och värmepumpsindustrin och ett flertal energiföretag. Målet är att programmet på lång sikt ska bidra till en nationell utveckling på kyl- och värmepumpsområdet som karakteriseras av en hög energieffektivitet och liten miljöpåverkan till en låg kostnad.

Detta doktorandprojekt startade inom KLIMAT 21 och har sedan fortsatt inom eff-Sys med finansiering av statens energimyndighet, Sveriges Provnings- och forskningsinstitut AB, Svensk Fjärrvärme, Wica Cold AB, AIA AB, FRICO AB och Refcon AB.

Jag vill särskilt tacka min handledare Professor Per Fahlén på avdelningen för Installationsteknik på Chalmers Tekniska Högskola samt industrirepresentanterna Henrik Feldhusen, Svensk Fjärrvärme, Niklas Rindhagen och Birger Palmér, Wica Cold AB, Tord Engström, AIA AB, Mats Careborg, FRICO AB och Morgan Runesson, Refcon AB.

Sammanfattning

Det är intressant att studera öppna vertikala kyldiskar för att de är vanligt förekommande och för att de är stora energianvändare. Med målsättningen att minska köldmediemängderna har indirekta kylsystem kommit att dominera i Norden därför är detta arbete inriktat på kyldiskar som är indirekt kylda. Merparten av resultaten som redovisas är dock direkt tillämpbar både på kyldiskar som är kylda med direktexpansionssystem och indirekta kylsystem. Syftet med arbetet är att beskriva vilka faktorer som påverkar energianvändningen i vertikala öppna kyldiskar och identifiera viktiga åtgärder för att minska energianvändningen och förbättra det termiska klimatet inne i kyldisken.

En viktig del har varit att kartlägga kyldiskens energiflöden och därefter analysera förutsättningarna att minska dessa. En ökad kunskap om kyldiskens energiflöden och vilka yttre faktorer som påverkar kyldiskens prestanda har varit vägledande för de fortsatta studierna. Det absolut största bidraget till förlusterna i en kyldisk orsakas av infiltrationsförluster. Tyngdpunkten i arbetet har inriktats på analysen av luftströmningen i kyldisken och luftridån vars funktion är att bilda en barriär mellan den varma omgivningen och den kalla luften inne i kyldisken. En förbättrad luftströmning i disken är viktig för att förbättra temperaturkvaliteten i matvarorna och för att minska energiförlusterna. För att minska behovet av kyla måste kylan distribueras ut i disken på ett effektivt sätt så att temperaturdifferensen mellan kallaste och varmaste vara minskar.

Den öppna planlösningen är viktig för att exponera matvarorna samtidigt gör det kyldiskarna mer känsliga för omgivningsklimatet. Resultaten visar att en kyldisks kylbehov är linjärt beroende av skillnaden i specifik entalpi mellan omgivningsluften och den kalla luften inne i kyldisken.

Resultaten från experiment och CFD modeller på en referensdisk visar att en öppen vertikal kyldisk med bakkantsinblåsning påverkas av hur den är lastad och av hur ryggplåten är utformad. Hålens form, storlek och fördelning påverkar luftströmningen inne i hyllplanet. En viktig slutsats är att bakkantsinblåsning inte är den bästa metoden att kyla matvarorna eftersom den kalla luften förs in i kyldisken där behovet av att kyla matvarorna är som minst och att kylningen av matvarorna påverkas av hur kyldisken är lastad.

Resultaten av experiment och CFD modeller på luftridån visar att luftridån strävar av att vika av mot den kalla insidan. Matvarorna i hyllplanen fungerar som ett fysiskt hinder som gör att luftridån strömmar efter hyllornas framkant. Luftridån skall sluta tätt och kyla matvarorna i framkanten med minsta tillsats av energi. Saknas det last i något hyllplan är det risk att luftridån störs och funktionen försämras. Resultaten visar att det inte går att uppnå samma effektivitet med luftridåer som har samma höjd-bredd förhållande. En kortare luftridå är effektivare vid samma höjd-bredd förhållande än en lång luftridå.

Key words: *Display cabinet, display case, defrost, CFD, model, air distribution,*

Summary

Vertical display cabinets are responsible for a major share of the electricity used in the food retail sector. Key values for contemporary cabinets range between 4000-8000 kWh/m and year. With a total installation of around 100 km in Sweden, this corresponds to an annual use between 0.4 and 0.8 TWh. The technical procurement competition staged by Nutek has shown that this value can be halved. Even at this new level of efficiency there is still considerable room for improvement regarding both energy input and variations in temperature of the merchandise

Vertical display cabinets are major consumers of electricity. A significant reduction in the input to these cabinets affects directly both the energy use and the external environment. Working with indirectly cooled cabinets provides increased flexibility in the choice of refrigerant and the quantity of refrigerant in the system decreases.

The project aims at mapping the energy flows of display cabinets and subsequently analyzing the possibilities of reducing these flows. A combination of fluid dynamical modelling and experimental studies in a laboratory test cabinet shall provide improved knowledge about the air distribution inside the cabinet as well as the exchange with the ambience. The laboratory cabinet will also be used to investigate if an entirely new concept can reduce the energy use while simultaneously improving the temperature quality of the merchandise.

This work concerns investigations of the performance of vertical refrigerated display cabinets. Such cabinets are in widespread use and account for a considerable proportion of the energy used in shops. The open front is important for the shop-owner, who wants the chilled items in the cabinet to be well exposed and easily accessible.

The purpose of the work has been to analyse the energy flows in display cabinets and subsequently analysing the possibilities to reducing the cabinets' energy requirements while retaining or improving their performance.

The work has involved controlled investigations in a climate chamber in order to determine how the ambient climatic conditions and other factors affect energy use. The results show that the energy requirement of a display cabinet is linearly proportional to the difference in specific enthalpy between that of the ambient air and that of the cold air in the cabinet, which means that the cooling power requirement for any arbitrary climate can be determined from measurements of the energy requirements of two different ambient climates.

An analysis of energy flows shows that infiltration provides the greatest inward heat leakage in a display cabinet. Radiation and illumination also have a relatively substantial effect in comparison with other possible heat inputs, as they act on the most poorly cooled products in the cabinet. The overall energy requirement of a display cabinet is determined by the ambient climate and the tempera-

ture of the warmest item in the cabinet, which therefore in turn determines the mean temperature level in the entire cabinet.

Results from experimental measurements and CFD calculations show that the performance of an open vertical display cabinet with cold air blown in through the back is affected by how it is loaded and by how the perforations in the backplate are arranged. The conclusion is that cold air input through the backplate is not the best method of cooling the foodstuff packages, as the cold air is supplied where there need for cooling is least.

The air curtain is required to provide good enclosure, and also to cool the foodstuffs at the front of the shelves, all with the least input of energy. The results from the modelling show that it is not possible to achieve the same efficiency and function with air curtains having the same height/width ratio but with different heights. If the air curtain is to cool items at the front of shelves, while at the same time being stable, a shorter air curtain is more efficient than a heigher air curtain for the same height/width ratio. A thick air curtain is more efficient than a thin air curtain.

Key words: *air distribution, air curtain, CFD, display cabinet, display case, energy, infiltration, model, performance, simulation, supermarket*

Innehåll

Bakgrund och motiv	7
Syfte och mål	8
Deltagande parter	8
Projektets genomförande	9
Resultat	10
Kravspecifikation.....	10
Omgivningsklimatets inverkan på kyldiskens effektivitet.....	10
Kyldiskens energiflöden	11
Analys av luftfördelning i kyldiskar och luftridåns funktion	13
Parameterstudie på luftridåer	14
Laboratedisk	15
Industriell-, energi och miljörelevans	15
Examina	16
Internationell samverkan	16
Slutsatser och diskussion	16
Omgivningsklimatets inverkan på kyldiskens prestanda.....	17
Styrning och reglering av kyldiskar.....	17
Kyldiskens energiflöden	17
Viktiga komponenter i kyldisken.....	17
Luftströmningen inne i kyldisken	18
Krav på luftridån.....	18
Mätmetod för att kalibrera och validera CFD modeller	19
Inverkan av luftridåns bredd, höjd och inblåsningshastighet.....	19
Fjärrkyla.....	20
Spridning av resultat	20
Referenser	23
Bilaga 1: Sammanfattning av publicerade artiklar	25

Bakgrund och motiv

Öppna vertikala kyldiskar är intressant att studera för att de är vanligt förekommande och för att de är stora energianvändare. En av de viktigaste orsakerna till att vertikala kyldiskar används i så stor utsträckning ute i butikerna är att mycket matvaror kan exponeras på en liten yta i butiken. Valet av öppna kyldiskar motiveras av att dörrar ses som ett fysiskt hinder som minskar försäljningen.

Tidigare studier visar att energianvändning för befintliga, moderna diskar kan variera från 4000 till 8000 kWh/(meter installerad kyldisk och år), Backström and Westman [7], Axell and Fahlén [3]. Eltillförseln till 5 meter kyldisk är av samma storleksordning som eltilförseln till en eluppvärmd villa. Med ca 10 mil installerad disklängd i Sverige innebär detta en årlig energiförbrukning av storleksordningen 0,4-0,8 TWh bara för kyldiskar. Nutek genomförde 1997 en teknikupphandlingstävling för indirekt kylda diskar, Axell and Fahlén [4]. Resultaten visade att energianvändningen kan sänkas till < 2000 kWh/(meter installerad kyldisk och år). Det finns dock fortfarande utrymme för betydande förbättringar även från denna nivå samtidigt som variationerna i varutemperatur kan minskas.

Kyldiskar används i butiken för att förvara kylda livsmedel vid rätt temperatur. Undersökningar av temperaturkvalitén i de kylda livsmedlen visar att kyldisken är en svag länk i kylkedjan, Anema [1], Bobbo, Cortella et al. [8] och Nordvedt and Nordvang [11]. Torstveit and Magnussen [13] redovisar i en norsk fältstudie att problemet med övertemperaturer i kylda matvaror ute i livsmedelsbutikerna snarare har ökat än minskat.

Det är en utmaning att konstruera denna typ av kyldiskar där huvudkravet på en god temperaturkontroll på matvarorna måste uppfyllas med så liten tillsats av energi som möjligt. Samtidigt måste konstruktören ta hänsyn till butikernas krav på att kyldiskarna skall vara flexibla med stora möjligheter att variera inredning så att varorna kan exponeras på ett attraktivt sätt för kunderna. Butiksägaren vill kunna förändra i sin butik och använda samma kyldisk för olika typer av varor som ställer olika krav på exponering. Kravet på exponering är mycket viktigt för handlaren vars primära mål är att sälja varor. Butiksägaren vill därför ha diskar med stora öppningsytor, trots att en stor öppningsyta leder till att kyldisken blir känsligare för omgivningsklimatet i butiken och för störningar. Dessutom visar studier att kallrasen från kyldiskarna är stort, vilket kan upplevas som obehagligt av både kunder och personal. Att uppfylla alla dessa krav/önskemål vid konstruktion av en kyldisk är därmed en stor utmaning för konstruktören

Syfte och mål

Syftet med detta arbete har varit att analysera energiflödena i öppna vertikala kyldiskar och därefter identifiera viktiga åtgärder för att minska energianvändningen i öppna vertikala kyldiskar med bibehållen eller förbättrad prestanda.

En ökad kunskap om kyldiskens energiflöden och vilka yttre faktorer som påverkar kyldiskens prestanda har varit vägledande för de fortsatta studierna. Det absolut största bidraget till förlusterna i en kyldisk orsakas av infiltrationsförluster därför har tyngdpunkten i arbetet med inriktats på analysen av luftströmningen i kyldisken och lufridån vars funktion är att bilda en barriär mellan den varma omgivningen och den kalla luften inne i kyldisken. En förbättrad luftströmning i disken är viktig för att förbättra temperaturkvalitén i matvarorna och för att minska energiförlusterna. För att minska behovet av kyla måste kylan distribueras ut i disken på ett effektivt sätt så att temperaturdifferensen mellan kallaste och varmaste vara minskar. En kombination av strömningsteknisk modellering och experimentella studier ska ge ökad kunskap om luftens fördelning internt i disken och luftutbytet med omgivningen. Baserat på framtagen kunskap skall ett helt nytt koncept för kyldiskens luftförsörjning utarbetas för att minska energibehovet och förbättra varornas temperaturkvalité.

Deltagande parter

Projektet ”Den energieffektiva kyldisken” startades inom KLIMAT 21 med en projektgrupp bestående av SP, CTH, Wica Cold AB och AIA AB. Resultaten från projektet visade att det fanns ett behov av ett fortsatt arbete. Projektet har därför fortsatt inom eff-Sys med en utökad projektgrupp bestående av SP, CTH, Wica Cold AB, AIA AB, FRICO AB, REFCON AB och Svensk Fjärrvärme AB. Projektledaren Monica Axell från SP har varit forskningsutförare och professor Per Fahlén från Chalmers Tekniska Högskola (CTH) har ansvarat för den vetenskapliga handledningen. Lennart Rolfman från York AB har under hela projektets gång varit controller för projektet.

Projektorganisation:

Monica Axell, SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut
Per Fahlén, Installationsteknik, Chalmers Tekniska Högskola
Niklas Rindhagen WICA COLD AB
Birger Palmér WICA COLD AB
Tord Engberg, AIA, Asarums Industri AB
Henrik Feldhusen, Svensk Fjärrvärme AB
Morgan Runesson, REFCON AB
Mats Careborg, FRICO AB

Controller:

Lennart Rolfman, York AB

Projektets genomförande

Arbetet har innefattat både experimentella studier och teoretiskt arbete med analytiska modeller för att beskriva kyldiskens energiflöden. För att studera luftströmningen i disken används strömningstekniska modeller av typen, CFD, Computational Fluid Dynamics.

Arbetet kan delas in i följande moment:

- Experimentella studier av ett antal kyldiskar. Dessa studier har bildat ett underlag för det fortsatta arbetet och gett en baskunskap om hur en vertikal kyldisk fungerar.
- Litteraturstudie.
- Litteraturstudien och slutsatserna från de experimentella studierna på kyldiskar har används som underlag för att definiera viktiga krav på en vertikal kyldisks funktion samt för att beskriva yttre faktorer och komponenter i kyldisken som påverkar en vertikal kyldisks energianvändning.
- Kravspecifikation för en ny typ av kyldisk har utarbetats under arbetets gång.
- Mera detaljerade experimentella studier har genomförts på en referensdisk för att beskriva hur omgivningsklimatet påverkar kyldiskens energi användning samt för att ta fram indata till de analytiska energimodellerna.
- Fältstudier har utförts ute i butiker. Syftet har varit att beskriva hur omgivningsklimat och energianvändningen varierar ute i en butik och koppla dessa resultat till resultaten från mätningarna som utförts i en klimatkammare under kontrollerade förhållanden. Fältmetoder har utvecklats och utvärderats dels för att mäta temperaturen i matvarorna och dels för att beräkna de olika bidragen till värmeinläckningen i en kyldisk.
- Kyldiskens energiflöden har analyserats med en stationär energibalans för att kvantifiera de olika värmestörningsstorlekens storlek och analysera hur de påverkar en vertikal kyldisks energianvändning.
- Strömningstekniska modeller (CFD) av luftströmningen inne i kyldisken och luftridån i kyldiskens framkant. En kombination av strömningsteknisk modellering och experimentella studier i en ”referensdisk” används för att ge ökad kunskap om luftens fördelning internt i disken och luftutbytet med omgivningen. Arbetet innefattar både fullskalemodeller och mindre delmodeller.
- Mätningar och CFD modellering på luftridån. Arbetet innefattar en parameterstudie av hur luftridåns höjd/bredd förhållande påverkar luftridåns effektivitet.
- Doktorsavhandling
- Konstruktion av en laboratoriedisk baserat på den kunskap som tagits fram i projektet

Resultat

Resultaten från samtliga punkter av projektet utom den sista delen som innefattar konstruktion av en laboratoriedisk finns redovisade i Axell's [2] doktorsavhandling samt i vetenskapliga artiklar listade under rubriken spridning av resultat.

Kravspecifikation

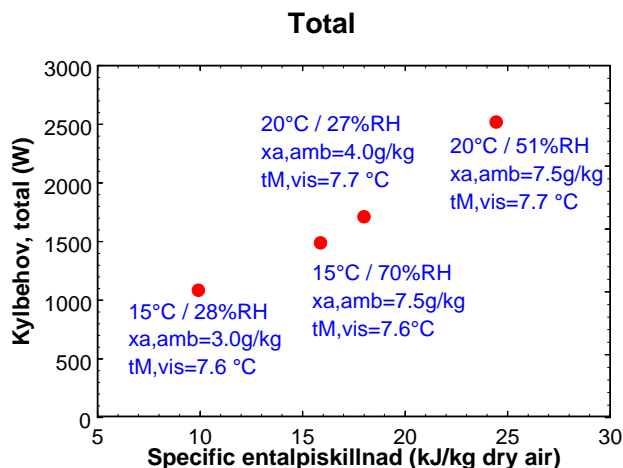
En kyldisk är en "försäljningsapparat för kylda matvaror". Det innebär att exponering av matvarorna och tillgängligheten för kunderna skall vara lika bra eller bättre än i dagens vertikala kyldiskar. Energieffektivisering innebär att matvarorna skall lagras vid rätt temperatur med minsta tillsats av elenergi. Kyldisken skall vara ansluten till ett indirekt system. Motivet är att indirekta system är vanligt förekommande i Sverige.

Utifrån dessa grundförutsättningar har projektgruppen utarbetat en kravspecifikation för kyldisken. Den öppna fronten är viktig för exponeringen av matvarorna därför beslutades det initialt i detta projekt att kyldiskens front skall vara öppen samt att förändringar av kyldiskens konstruktion inte får medföra att öppningens storlek minskar. Tidigt i projektet utarbetades en separat kravspecifikation för kylbatteriet. Ett kylbatteriet monterat inne i kyldisken får inte vara mer utrymmeskrävande än dagens kylbatterier därför definierades en maximalt tillåten volym som begränsar kylbatteriets yttermått. Det minsta acceptabla flänsavståndet valdes till 4 mm. Motivet till denna begränsning är att igensättning av kylbatteriet orsakat av försmutsning skall undvikas. Det slutgiltiga valet av kylbatteri till laboratoriedisken skall baseras på den kunskap som tas fram i det parallella projektet F5 "Det energieffektiva kylbatteriet". Den energieffektiva kyldisken tillsammans med ett energieffektivt kylbatteri skall resultera i en kyldisk där påfrysning och därmed även avfrostning kan undvikas. Detta innebär att temperaturskillnaden mellan den kalla luften som blåses in i kyldisken och temperaturen i varmaste matvara skall minimeras. Framledningstemperaturen på köldbäraren skall vara så hög som möjligt för att undvika påfrysning, minska pumparbetet och förbättra kylmaskinens effektivitet. Det innebär att temperaturskillnaden mellan den kalla luften som distribueras in i kyldisken och köldbärarens framlednings-temperatur skall minimeras.

Omgivningsklimatets inverkan på kyldiskens effektivitet

Axell [2] visar med kontrollerade försök utförda i en klimatkammare att en kyldisks kylbehov är en direkt funktion av skillnaden i specifik entalpi mellan omgivningen och den kalla luften inne i kyldisken, se figur 1. Därmed kan kylbehovet vid ett godtyckligt omgivningsklimat fastställas med hjälp av mätresultat vid två olika omgivningsklimat. Eftersom kylbehovet även beror av den högsta tillåtna varutemperaturen hölls denna konstant när omgivningsklimatet förändrades. Det är mest energieffektivt att styra mot den dimensionerande högsta tillåtna varutemperaturen när omgivningsklimatet förändras. Detta innebär att den

kylande luftens temperatur varierar med omgivningsklimatets torra temperatur. Resultatet visar att en konstant varutemperatur kan uppnås genom att temperaturskillnaden mellan inblåsnings- och returtemperatur varierar med omgivningens torra temperatur.

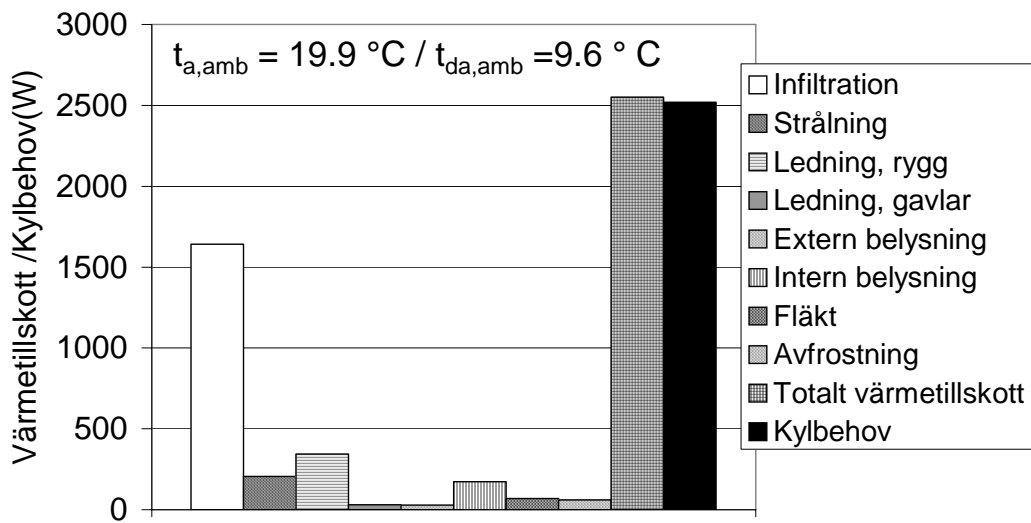


Figur 1 Kyldiskens kylbehov som funktion av den specifika entalpiskillnaden mellan omgivningsluften och den kalla luften inne i kyldisken.

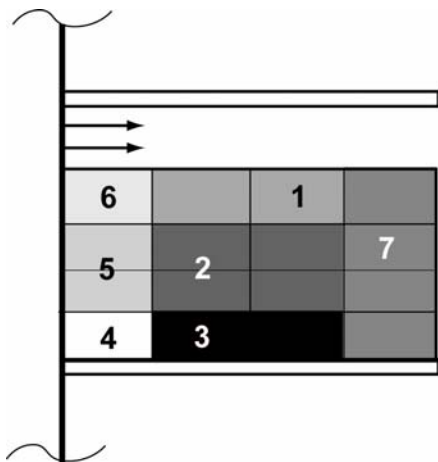
För att uppnå högsta energieffektivitet på systemnivå måste kylsystemet bestående av kylmaskin, kyldiskar och kylsystemet för kylmaskinernas kondensorer analyseras tillsammans med HVAC systemet. Därför att omgivningsluftens specifika entalpi har en tydlig inverkan på energianvändningen och det termiska klimatet i varorna samt att det även kan påverka den termiska komforten för människorna som vistas i butiken. För att nyttiggöra de fördelar som kan uppnås med ett mer gynnsamt omgivningsklimat med lägre specifik entalpi är det viktigt att hela kylsystemet är effektivt och att styr- och reglerstrategin för den aktuella kyldisken tar hänsyn till 1) det verkliga kylbehovet samt 2) det verkliga avfrostningsbehovet.

Kyldiskens energiflöden

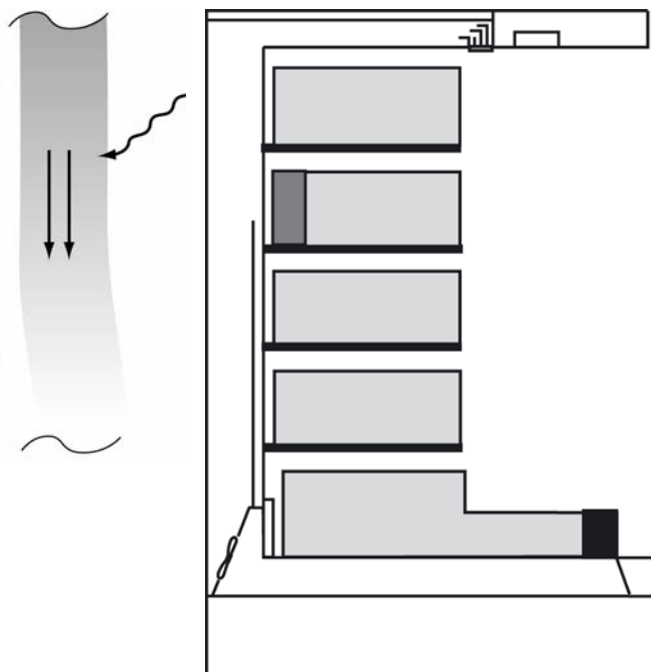
Axell [2] visar i en analys av energibalansen att infiltrationen är det dominerande bidraget till värmestillskottet i en öppen vertikal kyldisk, vilket styrker den ursprungliga målsättningen att arbeta med att förbättra luftfördelningen i kyldisken och luftridån är helt rätt. Analysen visar dock att även belysning och strålning är viktiga bidrag eftersom de verkar på de matvaror som är sämst kylda. Summeras bidragen orsakade av infiltration, strålning och belysning i figur 2 svarar de tillsammans för ca 80 % av det totala värmestillskottet i en vertikal kyldisk. Axell and Fahlén [3] och Axell and Fahlén [4] visar att det är matvarorna längst fram på hyllplanet, se figur 3, och längst ner i kyldisken som är varmest, se figur 4. Det faktiska kylbehovet i en kyldisk påverkas av 1) högsta tillåtna varutemperatur, 2) kyldiskens effektivitet och 3) omgivningsklimatet .



Figur 2 Resultat från energibalans över en vertikal kyldisk baserad på mätresultat och beräkningar för omgivningsklimatet $t_{a,amb}=20 \text{ } ^\circ\text{C}$ och $t_{da,amb}=9,6 \text{ } ^\circ\text{C}$. Infiltrationen har beräknats som en energibalans över luftriddån. Det totala värmetillskottet till kyldisken jämförs med det uppmätta kylbehovet.



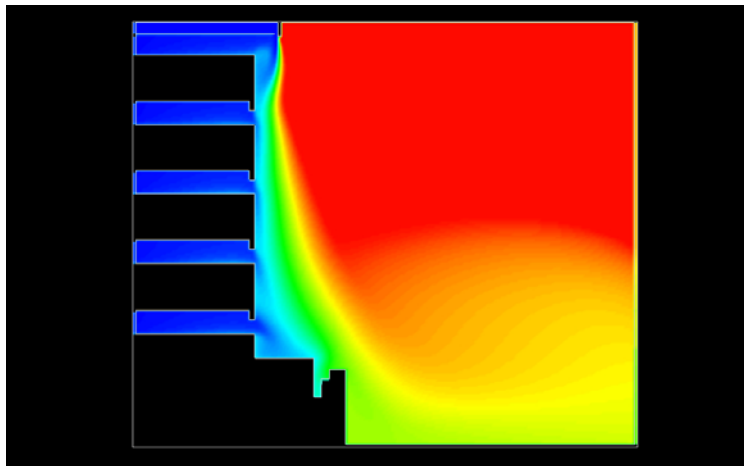
Figur 3 Matpaketen längst fram på hyllan i position 7 utsätts för det största värmetillskottet.



Figur 4 Kyldisk med matvaror. Det kallaste matpaketet (grå) och det varmaste matpaketet (svart) visas i figuren.

Analys av luftfördelning i kyldiskar och luftridåns funktion

Resultat från mätningar och CFD modellering visar att luftridån vill vika av mot det kalla utrymmet inne i kyldisken, se figur 5. Orsaken är att temperaturskillnaden mellan den varma omgivningen och den kalla luften inne i kyldisken ger upphov till en tryckskillnad över luftridån som resulterar i att luftridån strävar efter att vika av inåt.



Figur 5 Resultat från CFD modellering på luftridån. Luftridån viker in mot det kylda utrymmet inne i kyldisken.

En kombination av simuleringar (CFD) och experimentellt arbete har visat sig vara ett effektivt sätt att arbeta. Fullskalemodeller av kyldiskar kräver både mycket arbete under preprocessing stage och lång beräkningstid. En av de största orsakerna är att kyldisken har yttermått för höjd och bredd i meter-skala samtidigt som hål, slitsar och andra strömningsdetaljer måste beskrivas i mm-skala för att erhålla relevanta resultat. Antalet celler i fullskalemodellen som används i detta arbete är ca 100.000, vilket skall jämföras med att andra CFD-modeller, ca 10.000-20.000celler, som använts i andra arbeten. Ingen av dessa modeller har emellertid simulerat hela kyldisken inklusive luftkanaler i ryggpartiet. Fullskalemodellen i detta arbete omfattar hela kyldisken.

Resultat från CFD-beräkningarna visar att det är viktigt att återge små strömningstekniska detaljer så korrekt som möjligt annars kan hastighetsprofilerna påverkas i stor utsträckning. Det är tidskrävande att utveckla och kalibrera fullskalemodeller under dessa förutsättningar. Mätningarna och beräkningarna visar att det krävs en hög detaljeringsgrad för att beskriva strömningen i hela kyldisken. Metodiken att arbeta med små delmodeller för att studera olika strömningstekniska fenomen är därför ett effektivt sätt att arbeta, som till exempel detaljstudier av ett hyllplan där inverkan av ryggplåtens utformning studeras. En delmodell visar vilka konsekvenser olika förenklingar kan ha för slutresultatet med en fullskalemodell.

CFD modellering och mätningar visar att lastvariationer och utformning av ryggplåten i en kyldisk med rygginblåsning påverkar kyldiskens funktion och effektivitet. Storleken, formen och fördelningen på öppningsarean i kyldiskens ryggparti påverkar hastighetsprofilen inne i hyllplanen. Resultaten visar att för studier av

luftridåns funktion är det godtagbart att använda en enklare ansats för strömningen från ryggpartiet. Skall däremot luftfördelningen och kylningen av matvarorna inne i hyllplanet studeras är det mycket viktigt hur inloppstillståndet i ryggpartiet modelleras.

Detta arbete visar att en traditionell kyldisk med rygginblåsning påverkas av lastvariationer. Variationerna i lufthastighet från ryggpartiet som uppstår på grund av lastvariationer är så pass stora att de påverkar både matvarornas temperatur i hyllplanen och luftridåns stabilitet. I en kyldisk är hastigheten i luftridån låg och storleken på hastigheten från ryggen kan ej försummas. Modelleringen av hela kyldisken visar att luftströmningen ifrån ryggen i en kyldisk kan vara viktig för att klara temperaturen i de yttersta matpaketen som vetter mot den varma omgivningen. Luften från ryggen bör distribueras på ett sådant sätt att hastighetskomponenten i vertikal led nedåt dominerar när luften strömmar ut ur hyllplanet. Den kalla luften från hyllplanet skall bidra till kylningen av matpaketen i den främsta raden ut mot omgivningen genom att öka värmeöverföringskoefficienten och sänka temperaturen i luftskiktet närmast paketen. Därmed förbättras den konvektiva värmetransporten från matvarorna.

Inverkan av mängden inlastade matvaror har studerats experimentellt och med CFD. Resultatet visar att både varutemperaturen och kylbehovet påverkas av hur kyldisken är lastad. Slutsatsen är att kyldiskar bör konstrueras så att kylningen av matvarorna och luftridåns funktion inte påverkas av mängden inlastade matvaror.

Parameterstudie på luftridaer

I parameterstudien studeras endast hur luftridåns effektivitet påverkas av luftridåns bredd, höjd och inblåsningshastighet. En av de viktiga frågeställningarna var om det för samma höjd- bredd förhållande går att uppnå samma effektivitet med olika höjd i ridån. En metodik presenterades för att utvärdera luftridåns effektivitet där 1) kylningen av matvarorna ska garanteras och 2) luftridån ska vara stabil. Är dessa kriterier uppfylla identifieras den luftridå som medför den minsta energianvändningen. Resultaten visar att en kort luftridå är effektivare än hög luftridå vid samma höjd-breddförhållande. Detta arbete visar också att luftridåerna i dagens kyldiskar med största sannolikhet förlorar avsevärt i effektivitet när de inte är fullastade. Både Europeiska och Amerikanska standarder förutsätter provning med en idealt lastad kyldisk (fullastad). De flesta experimentella studierna som finns publicerade utgår från dessa standarder, vilket har stora fördelar eftersom det är viktigt att utföra försök under förhållanden som gör att resultaten är repeterbara. Vid försök på kyldiskar är det speciellt viktigt med en väl definierad position för mätning av omgivningsklimatet eftersom kyldisken själv genererar stora temperaturgradienter framför kyldisken. Merparten av de tidigare publicerade studierna som syftar till att optimera en kyldisk som idealt lastad. Syftet med metodik som presenterats i detta arbete är att den skall ta hänsyn till luftridåns stabilitet för att identifiera den energieffektivaste luftridån som fungerar och är energieffektiv även när det saknas last i vissa hyllplan. Det finns en risk med att utföra optimeringar enbart med en fullastad kyldisk. En optimering som enbart inriktas på energieffektivitet kan leda till att inblåsningshastig-

heten väljs så pass låg att luftridån funktion och energieffektivitet försämras vid dellast.

Laboratoriedisk

Baserat på den kunskap som tagits fram i projektet har en laboratoriedisk konstruerats och tillverkats. Kyldisken är indirekt kyld och kylbatteriet har valts baserat på den kunskap som tagits fram i projektet ”Det energieffektiva kylbatteriet”, se Haglund, Fahlén et al. [9]. Vi har valt ett konventionellt baserat på de ovannämnda slutsatserna med färre parallella slingor för att upprätthålla en tillräckligt hög temperaturdifferens på vätskesidan. Detta motiveras av att det är viktigt att kunna garantera en tillräckligt god mätnoggrannhet vid den experimentella utvärderingen av kyldisken. Laboratoriedisk är 2,5 m lång kyldisk. De värmestillskott som är viktigast att begränsa i en kyldisk är infiltrationen, strålningen och belysningen eftersom de verkar på de varmaste matvarorna. Studien har visat att det är svårt att begränsa värmestillskott orsakat av strålning om den öppna frontens storlek skall bibehållas. Det som bör undvikas är att det nedersta hyllplanet är djupare än övriga hyllplan. Kyldisken skall konstrueras så att värmestillskottet orsakat av infiltration minimeras och så att kyldiskens funktion och effektivitet inte påverkas av den mängd matvaror som är inlastade i hyllplanen. Laboratoriedisken är därför konstruerad med en helt ny typ av luftströmning utan inblåsning av kall luft från ryggpartiet. Kyldisken är utrustad med energieffektiva fläktar och energieffektiv belysning av typen LED. De interna elförbrukarna i kyldisken är viktiga eftersom att el måste tillföras ”två gånger” dels för att driva komponenterna och dels för att kompensera för det extra kylbehov de förorsakar. Analysen visar att belysningen är speciellt viktig eftersom de verkar på de matvaror som är varmest i kyldisken och som endast kan kylas av luftridån. Naredran and Raghavan [10] har utfört försök med att installera LED belysning i kyldiskar. Studien visar att kunderna föredrar denna typ av belysning samt att energianvändningen med dagens LED teknik kan reduceras med 5 %. Författaren uppskattar att det finns en potential att förbättra tekniken så att besparingarna kan ökas till 70 %. Studien har visat att det är energieffektivt att täcka kyldisken under den period när butiken är stängd. Kyldisken är därför utrustad med en energieffektiv nattgardin som sluter tätt vid kanterna.

Industriell-, energi och miljörelevans

Vertikala kyldiskar är storförbrukare av el. En kraftigt minskad elanvändning i dessa diskar har direkta effekter både på energianvändningen och den yttre miljön. Genom arbetet med indirekt kylda diskar ökar flexibiliteten vid val av köldmedium och mängden köldmedium i anläggningen minskar. Den industriella relevansen säkras huvudsakligen genom kunskapsöverföring till och ett aktivt samarbete med projektets industripartner.

Examina

Projektledaren Monica Axell försvarade den 17 december 2002 sin doktorsavhandling med titeln ” Vertical display cabinets in supermarkets – Energy efficiency and the influence of air flows”. Opponent var Professor Predrag Hrnjak från University Illinois.

Internationell samverkan

Projektledaren haft kontakter med andra forskargrupper som arbetar med kyldiskar och CFD från Italien (Università degli Studi di Udine), Frankrike (Ecoles de Mine), USA (University of Illinois Urbana-Champaign samt Oak Ridge Laboratory) och Storbritannien (University of Bristol). Projektgruppen har deltagit i ett nationellt möte inom IEA Annex 26 samt bidragit med en presentation och en artikel på en workshop inom IEA Annex 26 arrangerad av KTH. Projektet har även resulterat i att Monica Axell från och med 2004 sitter med som nationell representant inom IIR i subcommission D1. Ett besök har gjorts på University of Illinois Urbana-Champaign i samband med en konferens. I samband med IIR konferensen i Washington startades ett samarbete med en amerikansk forskargrupp som arbetar med ett systerprojekt där målsättningen är att utveckla ett koncept för en energieffektiv kyldisk.

Slutsatser och diskussion

Konkreta resultat från projektet är en doktorsexamen, en prototyp av en kyldisk i fullskala med ett helt nytt koncept för luftströmningen och en validerad CFD-modell av en vertikal kyldisk. Arbetet har varit inriktat på kyldiskar som är kylda med ett indirekt system men huvudparten av slutsatserna är även direkt tillämpbara på kyldiskar som är kylda med ett direktexpansionssystem. Energimässigt kan en öppen vertikal kyldisk betraktas som ett system som kommunicerar med både HVAC systemet och kylsystemet i butiken. En inledande jämförande laboratorieundersökning av olika vertikala kyldiskar visar att det går att minska deras energianvändning radikalt. Den energieffektivaste kyldisken av de kyldiskar som ingick i den inledande studien hade en välfungerande luftrida och ett kylbatteri med låg ybelastning. De interna elanvändarna var effektivare än för de övriga kyldiskarna och nattgardinen var konstruerad så att den slöt tätt vid kyldiskens gavlar.

Omgivningsklimatets inverkan på kyldiskens prestanda

Axell, Fahlén et al. [6] och Axell and Fahlén [5] visar i en analys att kyldiskens kylbehov är linjärt beroende av entalpiskillnaden mellan den kalla luften inne i kyldisken och den varma luften utanför kyldisken. Därmed kan kylbehovet vid ett godtyckligt omgivningsklimat fastställas med hjälp av mätresultat vid två olika omgivningsklimat. Axell and Fahlén [5] visar från fältmätningarna visar att denna ansats är tillämpbar även i fält.

Styrning och reglering av kyldiskar

För att minska användningen av el bör systemets köldbärartemperatur variera med omgivningsklimatets temperatur så att kylmaskinen alltid arbetar med högsta möjliga förångningstemperatur. En ökning i luftridåns returtemperatur kan vara en indikator på att luftridån försvagats och att kyldisken bör avfrostas. Resultaten visar att det krävs helt andra reglervillkor när kyldisken täcks nattetid, värmeinstrålning minimeras och den interna belysningen är släckt. För att minimera energianvändningen bör varutemperaturen bibehållas nattetid även om resultaten från fältmätningar i butiker visar att temperaturen i matvarorna sänks nattetid för att klara temperaturkraven under dagen. För att uppnå energieffektiva och tillförlitliga system i butiken bör kyldiskarna klara temperaturkraven utan att använda matvarorna som ett termiskt lager.

Kyldiskens energiflöden

Detta och många andra arbeten visar att infiltration av omgivande luft motsvarar ca 65 % av de totala förlusterna. Den bästa metoden att bestämma värmeflödesstorleken orsakat av infiltration är att sätta upp en energibalans över luftridån. Resultaten visar att infiltrationsgraden kan variera avsevärt med omgivningsklimatet på grund av frostillväxt i kylbatteriet även vid relativt moderata ångkvoter i omgivningen.

Viktiga komponenter i kyldisken

Utöver en väl fungerande luftströmning i en kyldisk är det ytterligare tre komponenter som är viktiga för en kyldisks termiska prestanda och energieffektivitet.

Ett effektivt kylbatteri med låg ytbelastning tillsammans med en effektiv luftridå innebär att köldbärarens framledningstemperatur kan höjas så pass mycket att kylbatteriet inte behöver avfrostas och det latent kylbehovet minskar. Det viktigaste argumentet för att installera ett effektivt kylbatteri med låg ytbelastning i en kyldisk är att luftridåns stabilitet inte riskerar att försämrats. Påfrysning i kylbatteriet kan påverka lufthastigheten i luftridån och kan därmed indirekt leda till att luftridåns effektivitet sjunker med risk för höjda matvarutemperaturer.

Utöver infiltrationen är det värmeinstrålningen och den interna belysningen som är de bidrag som påverkar kyldiskens kylbehov mest. Värmestrålningen och den interna belysningen verkar direkt på de varmaste matvarorna i kyldisken genom

den öppna ytan i kyldiskens front. Temperaturen i dessa matvaror dimensionerar hela kyldiskens kylbehov. Värmeinstrålningen kan minskas genom att matvarorna förses med emballage med låg emissivitet eller om öppningsytan minskas. Det första kommer att begränsa sortimentet av matvaror som kan lagras i kyldisken och det senare kommer att försämra kyldisken exponeringsförmåga. För att minimera värmeinläckningen orsakad av belysning bör denna placeras utanför det kylda utrymmet, bästa möjliga teknik användas samt om möjligt även begränsa den installerade ljuseffekten per yta.

Täckning av en öppen kyldisk nattetid när butiken är stängd är ett effektivt sätt att minska energianvändningen. För att gardinen skall ge ett optimalt resultat skall gardinen vara diffusionstät, materialet skall ha låg emissivitet och gardinen skall sluta tätt. Resultaten från mätningarna i klimatkammaren visar att den relativa minskningen i kylbehov är konstant, ca 75 %, när omgivningsklimatet ändras medan minskningen uttryckt i absoluta tal ökar när entalpiskillnaden mellan omgivningsluften och luften inne i kyldisken ökar. Fältmätningarna visar att nattäckning minskar elanvändningen med 55 % och att nattäckning av kyldiskarna är nödvändig för att klara de lagstadgade temperaturkraven för matvarorna. Vid fältmätningarna utfördes mätningar på tillförd elenergi till de centrala kylmaskinerna. En av förklaringarna till den stora skillnaden är att det till dessa kylmaskiner var anslutna till kylrum och kyldiskar. Den andra förklaringen är att temperaturen i matvarorna var lägre vid nattäckning och matvarorna användes för att ackumulera kyla.

Luftströmningen inne i kyldisken

Slutsatsen är att om kall luft skall tillföras inne i kyldisken bör tillförseln av kall luft förändras. Det finns inget behov att tillföra kyla längst bak i hyllplanet där kylbehovet är minst. Luften bör tillföras på ett sådant sätt att luftströmningen inte påverkas av lastvariationer i hyllplanen och så att hastighetskomponenten i vertikal riktning dominerar vid utloppet ur hyllplanet. Ett alternativt sätt att kyla inne i hyllplanen är att endast kyla via strålningsutbyte med omgivande kalla ytor. Hastigheten inne i hyllplanen är låg och den konvektiva värmeöverföringskoefficienten är av samma storleksordning som den relativa värmeöverföringskoefficienten för strålning.

Krav på luftridån

En luftridå i en kyldisk skall sluta tätt och kyla matvarorna i framkanten i kyldisken. Är hastigheten låg vill ridån vika av mot det kalla utrymmet inne i kyldisken. I en fullastad kyldisk behöver detta inte vara ett så stort problem eftersom matvarorna samtidigt fungerar som en fysisk blockering. I praktiken är det inte realistiskt att förutsätta att en kyldisk alltid är fullastad med matvaror. Därför måste luftridån fungera och sluta tätt även om kyldisken inte är fullastad och den skall kyla de främre matvarorna i hyllplanen.

Mätmetod för att kalibrera och validera CFD modeller

De vanligaste mätmetoderna som används vid kalibrering och validering av CFD modeller på kyldiskar är varmtrådanemometer, rök och termoelement. Vanligtvis kan inte temperaturmätningar användas för att studera strömningstekniska fenomen men luftströmningen i en kyldisk karaktäriseras av en temperaturdriven luftströmning som gör att temperaturvariationerna speglar hastighetsvariationerna. Termoelement är endast möjliga att använda under icke isoterma förhållanden. Det finns även beröringsfria metoder att mäta hastighet. Några exempel på sådana metoder är PIV, Laser Tomografi och Laser Doppler teknik. Dessa mätmetoder är mer resurskrävande än traditionella anemometrar men ger en högre mät noggrannhet och kan användas vid låga lufthastigheter. En alternativ metod som kan användas för att validera modellen är att arbeta med energibalanser, vilket har stora fördelar då det kräver mycket mindre mättekniska resurser. Ytterligare en metod har presenterats som kan användas för att studera luftströmningen i en luftridå. I detta fall mäts temperaturfördelningen i luftridån indirekt genom att mäta temperaturen på en pappskiva instucken i luftridån. Denna metod bör dock karaktäriseras som en kvalitativ metod. Fördelen med metoden är att den är snabb och att ett strömningsförlopp kan följas kontinuerligt.

Slutsatsen är att valet av mätmetod för att validera modellerna beror på vad syftet är med modelleringen. Är målet att detaljstudera strömningstekniska fenomen i luftridån krävs det beröringsfri mätteknik. Är däremot målet med modelleringen att utföra beräkningar för att studera luftridåns och kyldiskens effektivitet är det möjligt att arbeta med temperaturmätningar och energibalanser.

Resultaten visar att CFD modellen som används i detta arbete underskattar luftridåns bredd jämfört med de temperaturmätningar som utförts i luftridån. Jämförs värmestillskottet genom ridån uppnås en överensstämmelse inom 7 % mellan beräknat och uppmätt resultat. CFD modellen underskattar värmeinläckningen. En förklaring till avvikelsen mellan beräknat och uppmätt resultat är att modellen är tvådimensionell och därmed inte kan ta hänsyn till den longitudinella luftströmningen i klimatkammaren under ett försök. Resultatet ger en så pass god överensstämmelse att modifierade modeller sedan kan användas för att genomföra parameterstudie på luftridån.

Inverkan av luftridåns bredd, höjd och inblåsningshastighet

Litteraturstudien visar att det är luftridåns höjd, bredd och hastighet som har den största inverkan på kyldiskens effektivitet. Parameterstudien visar att det för varje kombination av bredd och höjd finns en lägsta hastighet när kylningen av matvarorna kan garanteras och där luftridån sluter tätt. Studien visar dessutom att en kort luftridå är mer energieffektiv än en lång luftridå.

Fjärrkyla

I projektet har ingått att bedöma om fjärrkyla kan vara ett alternativ till dagens traditionella system med kylmaskiner i livsmedelsbutiker. De tekniska förutsättningarna för att använda fjärrkyla begränsas av den högsta tillåtna varutemperaturen och lägsta möjliga framledningstemperatur som kan levereras med ett fjärrkylsystem. Matvarornas temperatur regleras av lagstiftning, SLV FS 1996:5 [12]. Tre temperaturnivåer är aktuella i Sverige +8 °C, +4 °C och +2 °C. Den teoretiskt lägsta temperaturnivån på den levererade fjärrkylan begränsas i dagsläget av valet av köldbärare som i dagens system vanligtvis är vatten och produktionsmetoden för fjärrkylan. Denna studie visar att det finns en potential för att använda fjärrkyla ute i livsmedelsbutiker både till kyldiskar kanske då framförallt för livsmedel med ett temperaturkrav på + 8°C men även för komfortkyla. Då denna studie visar att kyldiskarnas erforderliga kylbehov är direkt proportionellt mot den specifika entalpin i inomhusluften.

Spridning av resultat

Kunskapsöverföring från detta projekt har skett genom vetenskaplig publicering och genom publicering i branschtidskrifter. Projektledaren har hållit ett antal föredrag riktat till olika målgrupper såsom de årliga eff-Sys dagarna (forskare och industri), föredrag för VVS-tekniska och Kyltekniska föreningen (industri) samt internationella konferenser/workshops (forskare). En mycket viktig del av kunskapsöverföringen är det kontinuerliga informationsutbyte som skett inom projektgruppen vid projektgruppens möten. Industripartnerna har bidragit med information från sina specialistområden, erfarenheter från olika butiksinstallationer, information från mässor de deltagit i samt redovisat resultat från genomförda delprojekt inom projektets ramar. Projektledaren (forskaren) har vid dessa möten redovisat resultat från det pågående arbetet men även försett projektgruppen med information om andra forskares resultat dels genom litteraturstudien men även med muntliga resuméer från vetenskapliga konferenser. Industripartnerna kontinuerliga omvärldsbevakning av trender och teknikutvecklingen inom området har varit ytterligare ett viktigt bidrag till projektet. Nedan anges en lista på den informationsspridning i form av föreläsningar och publikationer som skett inom detta projekts ramar. Granskade bidrag är markerade med en asterix (*). Sammanfattningar av de granskade artiklarna redovisas i bilaga 1. Notera att det endast är informationsinsatser under perioden 2001 till 2004 som finansierats inom eff-Sys ramar. Artikeln Climatic influence on display cabinet performance som publicerades på den International Conference "New Technologies in Commercial Refrigeration", IIF-IIR Commissions B2 and D1 kommer att översättas i sin helhet till en italiensk tidskrift "Industria & Formazione" på rekommendation av IIR's president F. Billiard.

Doktorsavhandling

Axell, M., 2002. Vertical display cabinets - Energy efficiency and the influence of air flows. Department of Building Services Engineering, Chalmers University of Technology, p.239, D 66:2002, Gothenburg, Sweden. *

Artiklar

Axell, M. and Fahlén, P., 1995. Evaluation of commercial refrigerated cabinets - Experience from laboratory tests according to prEN 441. 19th International Congress of Refrigeration, vol.2, p. 673-680, August 20-25 1995, The Hague, The Netherlands. *

Axell, M. and Fahlén, P. 1998. Promotion of energy-efficient display cabinets. International Conference "Refrigerated transport, storage and retail display" of IIR D1, D2/3., March 1998, Cambridge, United Kingdom. *

Axell, M., Fahlén, P., et al. 1999. Influence of Air Distribution and Load Arrangement in Display Cabinets. 20th International Congress of Refrigeration, September 19-24 1999, Sydney, Australia. *

Axell, M. and Fahlén, P., 2000. Vertical Display Cabinets. Workshop IEA Annex 26, Advanced Supermarket Refrigeration, August 2000, Stockholm, Sweden.

Axell, M. and Fahlén, P. 2001. Vertical display cabinets - Influence of air distribution in and around a display cabinet. Nordiska kyl- och värmepumpsdagarna, August 2002, Copenhagen Denmark.

Axell, M. and Fahlén, P. 2002. Climatic influence on display cabinet performance. International Conference "New Technologies in Commercial Refrigeration", IIF-IIR Commissions B2 and D1, July 22 and 23, 2002, p. 175-184, Urbana, USA. *

Axell, M. and Fahlén, P. 2003. Design criteria for energy efficient vertical air curtain in display cabinets. 21th International Congress of Refrigeration, August 18-22 2003, Washington, US. *

Övriga publikationer

Axell, M., Andersson, G., et al. 1997. CFD- modelling of a display cabinet - A comparison between model and experiment. (In Swedish.) SP AR 1997:44, pp. 41, 1997, Borås, Sweden.

Publikationer och presentationer inom forskningsprogrammen, KLIMAT 21 och eff-Sys:

Axell, M., Fahlén, P. and Andersson, G. 1998. Den energieffektiva kyldisken. KLIMAT 21, 1998. Stockholm, Sweden.

Axell, M., Fahlén, P. and Haglund, C. 1999. Den energieffektiva kyldisken, KLIMAT 21, 1999, Gothenburg, Sweden.

Axell, M. and P. Fahlén. 2000. Den energieffektiva kyldisken. KLIMAT 21, 2000. Eskilstuna, Sweden.

Axell, M. and P. Fahlén. 2002. Den energieffektiva kyldisken. First eff-Sys meeting. 2002, Stockholm, Sweden.

Axell, M. and P. Fahlén. 2003. Den energieffektiva kyldisken. Second eff-Sys meeting. 2003, Göteborg, Sweden.

Axell, M. and P. Fahlén. 2004. Den energieffektiva kyldisken. Third eff-Sys meeting. 2004, Eskilstuna, Sweden.

Populärvetenskapliga publikationer

Axell, M., 2000. Varutemperaturfilm. Swedish National Energy Agency and SP, 2000, Borås, Sweden.

Axell, M., 2001. Butikskyla. EFFEKTIV 2001:6, 2001, Borås, Sweden.

Axell, M., 2002. Behovet av butikskyla ökar. Energi- och Miljö, nr 5, Sweden.

Dahlberg, O., 2003. Svensktillverkade kylmöbler från Vislanda. Scanref, nr 1, februari 2003.

Referenser

1. Anema, P. J. 1995. The chilled cabinet essential in the food chain. 19th International Congress of Refrigeration, August 20-25, 1995, vol.2, p.665-669, The Hague, The Netherlands.
2. Axell, M. 2002. Vertical display cabinets - Energy efficiency and the influence of air flows. Department of Building Services Engineering, Chalmers University of Technology, p.239, Ph.D-Thesis, D66:2002, 17 December, 2002, Gothenburg, Sweden.
3. Axell, M. and Fahlén, P. 1995. Evaluation of commercial refrigerated cabinets- Experience from laboratory tests according to prEN 441. 19th International Congress of Refrigeration, vol.2, p. 673-680, August 20-25, 1995, The Hague, The Netherlands.
4. Axell, M. and Fahlén, P. 1998. Promotion of energy efficient display cabinets. International Conference "Refrigerated transport, storage and retail display" of IIR D1, D2/3, March, 1998, Cambridge, United Kingdom.
5. Axell, M. and Fahlén, P. 2002. Climatic influence on display cabinet performance, (in English). International Conference "New Technologies in Commercial Refrigeration", IIF-IIR Commissions B2 and D1, July 22 and 23, 2002, p.175-184, Urbana, USA.
6. Axell, M., Fahlén, P. O., et al. 1999. Influence of Air Distribution and Load Arrangement in Display Cabinets. 20th International Congress of Refrigeration, September 19-24, 1999, Sydney, Australia.
7. Backström, C. and Westman, O. 1997. Effektiva kyldiskar, NUTEK's teknikupphandlingsprojekt. (In Swedish). NUTEK-report, August 1997, Stockholm, Sweden.
8. Bobbo, S., Cortella, G., et al. 1995. The temperature of frozen foods in open display freezer cabinets: simulation and testing. 19th International Congress of Refrigeration, vol.2, p. 697-704, August 20-25, 1995, The Hague, The Netherlands.
9. Haglund, C., Fahlén, P., et al. 2002. Enhancement or performance of indirect cooling-coils for display cabinets. Internatinal conference "Zero leakage-minimum charge" IIR commissions B/E, August 26 -28, 2002, vol.1, p.263-270, Stockholm, Sweden.
10. Naredran, N. and Raghavan, R. 2002. Solid-state lighting for refrigerated display case. International Conference "New Technologies in Commercial Refrigeration" IIR-IIF-Commission D1/B1, July 22 and 23, 2002, vol.1, p.64-69, Urbana-Champaign, USA.
11. Nordvedt, T. S. and Nordvang, H. 1995. Fresh and frozen fish in Norwegian supermarkets, at which temperature is it bought? 19th International Congress of Refrigeration, August 20-25, 1995, vol. 2, p.744-751, The Hague, The Netherlands.
12. SLV FS 1996:5 1996. Statens livsmedelverks kungörelse med föreskrifter och allmänna råd om hantering av livsmedel. Statens Livsmedelsverk, Sweden.

13. Torstveit, A. K. and Magnussen, O. M. 1998. Temperature conditions in refrigerated counters in Vest Agder, Norway. IIR Symposium Nantes, September 16-18, 1998, p.15 p., Nantes, France.

Bilaga 1: Sammanfattning av publicerade artiklar

Dessa sammanfattningar avser endast artiklar.

Axell, M. and Fahlén, P., 1995. Evaluation of commercial refrigerated cabinets - Experience from laboratory tests according to prEN 441. 19th International Congress of Refrigeration, vol.2, p. 673-680, August 20-25 1995, The Hague, The Netherlands.

To promote development of energy efficient commercial refrigeration NUTEK of Sweden is staging a competition. As a first step, SP has assessed present state-of-the-art by testing 5 vertical display cabinets in accordance with prEN441. Results include the effect on energy usage by changes in temperature, humidity and velocity. Also, the effects of night curtains and air infiltration have been studied. The paper will specifically address the problems related to methods and control strategies for defrosting indirect systems. Regarding indirect systems, one important aspect is the lack of reliable information regarding physical properties of commercial secondary coolants. Also, in general the manufacturers set values for temperature and flowrate agree poorly with the actually required values. This may lead to uneven frosting of the coil and a large scatter of temperatures in the refrigerated load.

Finally, the paper will discuss a number of important aspects of the proposed European standard. In particular there are problems in obtaining the specified clearance in loading the cabinet. Commercially available test packages are not on a par with the required dimensional tolerances.

Axell, M. and Fahlén, P. 1998. Promotion of energy-efficient display cabinets. International Conference "Refrigerated transport, storage and retail display" of IIR D1, D2/3., March 1998, Cambridge, United Kingdom.

To promote energy efficient commercial refrigeration, NUTEK of Sweden has staged a competition for indirectly cooled vertical display cabinets. The primary target was to decrease the use of electricity while retaining sales performance and fulfilling requirements on product temperature.

Annual electric input was stipulated to be lower than 2600 kWh/m cabinet (25 % less than the best result of a market screening test). The winner achieved 1745 kWh/m, 50 % less than the best screening result. The direct electric input to this cabinet, i.e. to fans, lighting and frame heating, was down to less than half the screening level. Nevertheless, it still had the highest value of illumination.

The new designs have much improved night coverage, reducing problems with air infiltration. Furthermore, attention to coils and air curtains permit operation with a warmer brine. This reduces temperature gradients as well as defrosting and total energy input.

Axell, M., Fahlén, P., et al. 1999. Influence of Air Distribution and Load Arrangement in Display Cabinets. 20th International Congress of Refrigeration, September 19-24 1999, Sydney, Australia.

The vertical open display cabinet is a common type of cabinet which has a high energy consumption. This paper discusses energy models and air distribution in the cabinet. Energy balance considerations and experimental results show that infiltration is the predominant heat load factor. Computational Fluid Dynamics (CFD) is used in order to study the air distribution. Different models are presented and discussed and the influence of the load inside the cabinet is investigated. The research also deals with the difficulties of measuring low air velocities (< 0.1 m/s).

Axell, M. and Fahlén, P., 2000. Vertical Display Cabinets. Workshop IEA Annex 26, Advanced Supermarket Refrigeration, August 2000, Stockholm, Sweden.

The vertical open display cabinet is commonly used and is also a large energy consumer. This paper discusses energy models and air distribution in the cabinet. Energy balance considerations and experimental results show that infiltration is the predominant heat load factor. Computational Fluid Dynamics (CFD) is used in order to study the air distribution and the influence of the load. The function of air curtain is discussed.

Axell, M. and Fahlén, P. 2001. Vertical display cabinets - Influence of air distribution in and around a display cabinet. Nordiska kyl- och värmepumpsdagarna, August 2002, Copenhagen Denmark.

Vertikala kyldiskar förbrukar mycket energi. Samtidigt är de attraktiva för handlaren på grund av att de exponerar mycket varor på en liten butiksyta. [Axell, 1995 #632] redovisade i en förstudie till en teknikupphandlingstävling att energiförbrukningen kan variera från 3500 kWh/m²/år upp till 8000 kWh/m²/år. Axell and Fahlén [4] rapporterade senare att vinnaren i tävlingen lyckades att halvera energiförbrukningen jämfört med de bästa diskarna i förstudien. Trots den markanta förbättringen finns det fortfarande utrymme för att minska både energiförbrukningen och temperaturspridningen bland varorna i kyldisken.

Anema [1] bland många andra har rapporterat att kyldiskarna är en svag länk i kylkedjan och Torstveit and Magnussen [13] har i en fältstudie visat att problemet med övertemperaturer har ökat. Kyldiskens skall lagra kylda varor inom förskrivet temperaturintervall och exponera varorna på ett sätt som är attraktivt för kunden. Det viktigaste målet för butiken är att sälja varor därför prioriterar handlaren öppna kyldiskar där kunden obehindrat kan plocka varor utan några fysiska barriärer. Utmaningen för kyldisktillverkarna är att utveckla öppna, flexibla, energieffektiva kyldiskar som kan lagra varorna inom förskrivet temperaturintervall. I ett pågående forskningsprojekt studeras vertikala indirekt kylda kyldiskar. Ökad kunskap om diskens energiflöden och luftströmningen i

synnerhet förväntas leda till lägre energiförbrukning, jämnare varutemperatur och förbättrad termisk komfort ute i butiken.

Axell, M. and Fahlén, P. 2002. Climatic influence on display cabinet performance. International Conference "New Technologies in Commercial Refrigeration", IIF-IIR Commissions B2 and D1, July 22 and 23, 2002, p. 175-184, Urbana, USA.

Storage of cold and frozen food accounts for approximately half of the electricity use in a supermarket. Open vertical display cabinets are commonly used and are also large energy consumers. The present work looks at the influence on the performance of display cabinets by variations in load, customer frequency and ambient conditions. For this purpose we carried out measurements of temperature, relative humidity and electrical energy in two Swedish supermarkets. Measurements indicate that the use of electrical energy increases by more than 70 % during summer and day operation compared with a winter week. The problem with spillage of cool air in front of the cabinet is worse during the summer. The temperature difference from top to bottom in front of one of the cabinets increases from 3.3 K (winter) up to 6.7 K (summer). Finally, some simplified methods to calculate the heat exchange caused by infiltration are compared.

Axell, M. and Fahlén, P. 2003. Design criteria for energy efficient vertical air curtain in display cabinets. 21th International Congress of Refrigeration, August 18-22 2003, Washington, US.

Open vertical refrigerated display cabinets are in widespread use and account for a considerable proportion of the energy used in shops. An analysis of energy flows shows that infiltration provides the greatest inward heat leakage in a display cabinet. The air curtain is required to provide good enclosure, and also to cool the foodstuffs at the front of the shelves, all with a minimum input of energy. The purpose of the present work has been to describe a method to evaluate the air curtain efficiency taking storage temperature and the stability of the air curtain into account. Furthermore, the influence of the air curtain height, width and inlet velocity on the efficiency has been described. The work has been performed in a combination of experimental work and simulation with Computational Fluid dynamics (CFD). The result shows that wide air curtains are more efficient than narrow ones.