

Den energieffektiva kyldisken

Monica Axell

Per Fahlén

Caroline Haglund

SP (Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut)

Sammanfattning

Vertikala kyldiskar är den vanligast förekommande kylmöbeln i butikerna och samtidigt den mest energislukande. Denna typ av kylmöbel gör det möjligt för butiken att lagra stora varuvolymer på en liten butiksytta. Butikerna vill exponera varorna på ett attraktivt sätt och stora öppningsytor är högt prioriterade. Infiltration av omgivningsluft ger därför ett stort bidrag till energiförlusterna i denna typ av diskar. I detta projekt studeras kyldiskens luftströmning och energiflöden.

En experimentell studie har utförts på en referensdisk. Målsättningen med experimenten har varit att studera inverkan av omgivningens klimat samt att generera indata till en energimodell av kyldisken och till en strömningsteknisk CFD-modell (CFD = Computational Fluid Dynamics) av luftridån. Erfarenheter från pågående projekt har visat att hastighetsmätningar (under 0,1 m/s) med traditionella varmtrådsgivare måste ersättas med mer avancerad mätteknik, t.ex. LDA (Laser Doppler Anemometri). För att kalibrera CFD-modellen har en mätmetodik utvecklats baserad på temperaturmätning, dels med termoelement och dels med värmekamera.

Resultaten visar en kvalitativt god överensstämmelse. Värmekameran är ett snabbt och effektivt sätt att studera inverkan av olika strömningstekniska modifieringar.

Tre olika ansatser till energimodell jämförs och diskuteras. Den bästa överensstämmelsen nås i den modellansats där infiltrationen baseras på en värmebalans över luftridån. Den experimentella studien visar att både temperatur och fukt påverkar kyleffekten.

Nyckelord: energibalans, luftridå, CFD, kyldiskar, infiltration, SOFIE

Introduktion

Vertikala kyldiskar svarar för en betydande andel av butikernas förbrukning av el. Ett nyckeltal för befintliga moderna diskar är 4000-8000 kWh /år. Med ca 10 mil installerad disklängd i Sverige innebär det en årlig energiförbrukning på 0,4-0,8 TWh bara för kyldiskar. Nutek's teknikupphandlingstävling för indirekt kylda diskar har visat att detta värde kan sänkas till < 2000 kWh/m och år. Det finns dock utrymme för ytterligare förbättringar. Undersökningar visar att de öppna kyl- och frysdiskarna är en svag länk i temperaturkedjan.

Syfte och Mål

Projektet avser att kartlägga kyldiskens energiflöden och därefter analysera förutsättningarna att minska dessa. En kombination av strömningsteknisk modellering och experimentella studier i en "laboratedisk" ska ge kunskap om luftens fördelning internt i disken och luftutbytet med omgivningen: "laboratedisken" ska dessutom användas för att undersöka om ett helt nytt koncept för kyldiskens luftförsörjning kan minska energibehovet och förbättra varornas temperaturkvalité.

Experimentella studier

En försöksserie har utförts på en referensdisk för att:

- Ta fram indata till en strömningsteknisk modell (CFD) av kyldiskens luftridå.
- Ta fram indata till en energimodell.
- Studera inverkan av omgivningsklimatet.

Försöken har utförts enligt den Europeiska standarden, EN 441. De mätpunkter som finns i standarden har utökats med följande provpunkter för att generera indata till energi- och CFD-modellerna: Luftens tillstånd i hyllplanen, inblås- och returtemperaturer, luftens tillstånd före och efter kylbatteriet, smältvattenmängd, temperatur på kyldiskens och klimatkammarens ytor samt temperaturprofilen i luftridå. För att kunna jämföra inverkan av olika klimat måste varutemperaturen vara samma vid försöken. Vid försöken har stabilitet definierats av att medelvärdet i samtliga synliga paket är $t_{mv} = 7,5 \pm 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$. Resultat från dagfallet baserar sig på en provningscykel med 24 timmar dagdrift. Avfrostningen utförs med varm köldbärare var fjärde timme och avbryts när in och utgående köldbärare är lika. Målsättningen med försöken är att generera indata till modelleringen och få en ökad kunskap om olika parametrars inverkan på kyldiskens energiflöden. De aktuella provpunkterna redovisas i tabell 1.

Tabell 1. Redovisning av omgivningsklimat som ingår i försöksserien.

Försök	Torr temperatur (t_o)	Relativ ångtryck (RH_o)	Ångkvot (x_o)
	$^\circ\text{C}$	%	g vatten/ kg torr luft
1	20	51	7,5
2	20	Torrt *	Torrt*
3	15	70	7,5
4	15	Torrt *	Torrt *

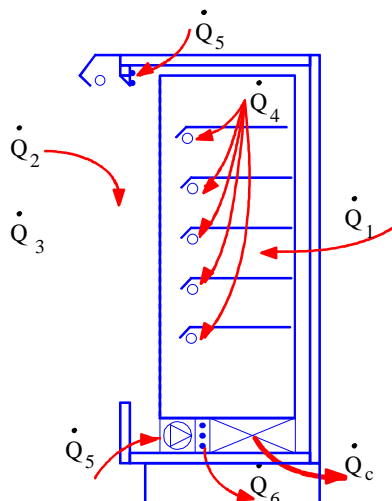
* Luftens daggpunkt är lägre än lägsta köldbärartemperatur.

Försök har även utförts med nattgardin. I EN 441 pågår nattcykeln i 12 timmar och föregås av dagdrift i 12 timmar. I detta fall har nattfallet körts längre tid för att studera nattdrift under ett fortvarighetstillstånd. Varutemperaturen har sjunkit något under natten, $t_{mv} = 7,0 \pm 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$. Luftläckage har minimerats genom att försegla nattgardinen med tejp.

Energibalans

Värmeförluster som ingår i energibalansen redovisas i figur 1. Tre olika ansatser för att beräkna dessa värmeförluster jämförs. Följande förlustbidrag är samma i modellerna: avfrostning, interna fläktar, intern belysning, ledning genom gavlar, extern belysning och strålning. I modell 1 och 2 beräknas ledning genom tak och rygg genom att beräkna väggarnas värmemotstånd, areor samt temperaturdifferens mellan uppmätt ytemperatur på rygg respektive tak och lufttemperaturen i luftkanalen efter kylbatteriet. I modell 3 beräknas ledning som en entalpiförändring orsakad av luftens temperaturhöjning från positionen efter batteriet till inblås. Luftens ångkvot antas konstant och mäts efter batteriet. Halva massflödet passerar ut genom ridån, resten blåses ut genom ryggen på vägen upp. 75 % av luften antas värmas till utblåstemperaturen. Infiltrationsgraden beräknas på olika sätt i modellerna enligt följande:

- Modell 1, Billiard (1993): Infiltration baseras på uppmätt smältvattenmängd under ett dygn
- Modell 2, Fahlén (1999): Infiltration baseras på fuktbalans i luftridå. Ridån antas vara symmetrisk och uppvärmning av den interna luften sker endast genom infiltration.
- Modell 3, Infiltration baseras på energibalans över luftridå.



Figur 1. Energimodell

Värmeförluster fördelas på följande bidrag :

- Avfrostning av kylbatteriet
- Infiltration genom luftridån.
- Förluster på grund av ledning genom gavlarna, värmning av matvaror
- Förluster på grund av ledning och extern belysning, värmning av luftkanal
- Förluster på grund av strålning, värmning av matvaror
- Förluster på grund av extern belysning värmning av matvaror
- Förluster, interna fläktar.
- Förluster, intern belysning

CFD-modell av kyldisk

En tvådimensionell CFD-modell med CFD-koden SOFIE, Welch and Rubini (1996), har tagits fram för att studera inverkan av luftridån under icke isoterma förhållanden. Modellen är en fullskalemodell av kyldisken. Beräkningarna utförs med följande ansatser: stationär drift och turbulensmodell enligt k- ϵ . Beräkningsgeometrin omfattar hela kyldisken och ett fritt område på 1,5 m utanför kyldisken. Ett konstant tryck användes som randvillkor mot yttre atmosfär. Alla hyllor modelleras inledningsvis som isoterma blockeringar, vilka hindrar luftflödet.

Mätningar och beräkningar har utförts för tre olika driftsfall:

- Kyldisk olastad, isotermt
- Kyldisk lastad enligt EN 441, isotermt
- Kyldisk lastad enligt EN 441, icke isotermt

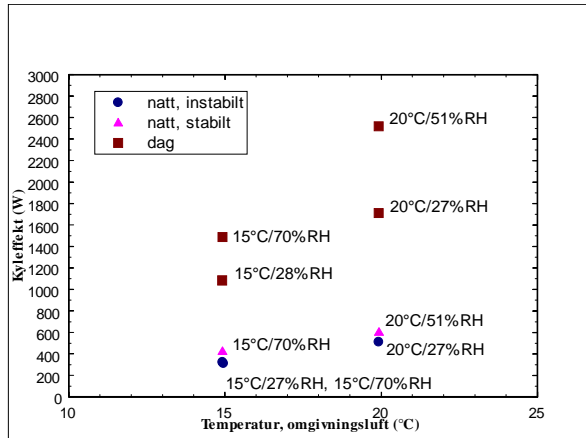
Totalt luftflöde och luftflödet genom luftridå baseras på uppmätta resultat. Hastighetsprofilen antas vara symmetrisk från centrum och ut mot sidoplåten. Hastighetsprofilen i hyllplanen baseras på tidigare uppmätta och modellerade resultat enligt Axell (1998). Den icke isoterma modellen är utförd för driftsfallet 20 °C och torr luft. Indata till detta driftsfall är baserat på uppmätta resultat. Varorna ansätts som inaktiva blockeringar och en yttemperatur ansätts för varorna baserat på uppmätta resultat. Erfarenheten från pågående projekt har visat att det är svårt att arbeta med varmtrådsanemometrar vid låga hastigheter (< 0,1 m/s). Därför har en ny metodik tagits fram för att kalibrera CFD-modellen. Denna metodik är baserad på temperaturmätningar i luftridån och omgivande luft.

Följande två mätmetoder för temperaturen används:

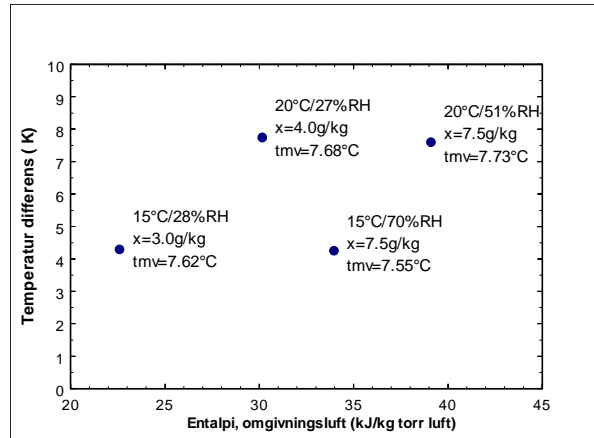
1. Traditionell mätning med tunna termoelement monterade på en tunn bakelitstav med 10 mm avstånd mellan termoelementen. Bakelitstaven förflyttas i djupled och höjdled
2. Temperaturmätning av luftridån med värmekamera. Ett svart papper monteras vinkelrätt in i luftridån och papprets yttemperatur representerar temperaturfördelningen i luftridån.

Resultat

Kyleffekten som funktion av omgivningsluftens temperatur visas i figur 2. Notera att försöken som var planerade att köras i ett absolut torrt omgivningsklimat i praktiken innehåller en del fukt i luften men att vatteninnehållet i försök 2 och 4 är ungefär lika stora. Spridningen i resultat med nattgardin är liten. De förluster som påverkar kyldisken med en optimalt fungerande nattgardin är värmning genom ledning och extern belysning, vilket värmer luften i luftkanalen, samt från värmeförluster från den interna fläkten.



Figur 2. Kyleffekt som funktion av omgivningsklimatets torra temperatur



Figur 3. Temperaturdifferens mellan inblås- och returtemperatur som funktion av omgivningsluftens entalpi

För att studera kyldiskens funktion är det vanligt att inblås- och returtemperaturen samt temperaturen i omgivningen mäts. I figur 3 redovisas denna temperaturdifferens som funktion av omgivningsluftens entalpi. Figurerna visar att en tolkning av infiltrationsförlusterna endast baserad på torr temperatur före och efter batteriet kommer att resultera i en underskattning av förlusterna vid fuktigt omgivningsklimat.

Resultaten från de tre modellansatserna visas i figur 4. Modell 3 ger den bästa överensstämmelsen med uppmätt kyleffekt. Värmeförlusterna överskattas med 7,6 %. Sämst överensstämmelse fås med modell 2, vilken är tänkt för enkla fältmätningar (temperatur och/eller fuktmätning). Metoden fungerar bäst vid symmetrisk ridå och litet strålningsutbyte, vilket inte gäller för denna disk.

Ansats 1: Billiard (1993)

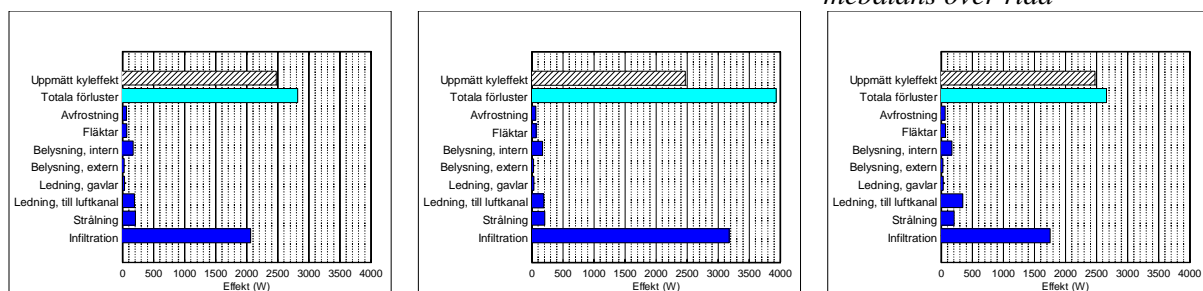
Infiltration beräknas från smältvattenmängd

Ansats 2: Fahlén (1998)

Infiltration beräknas från fuktbalans för symmetrisk ridå

Ansats 3: Från mätningar (1999)

Infiltration beräknas från värmebalans över ridå

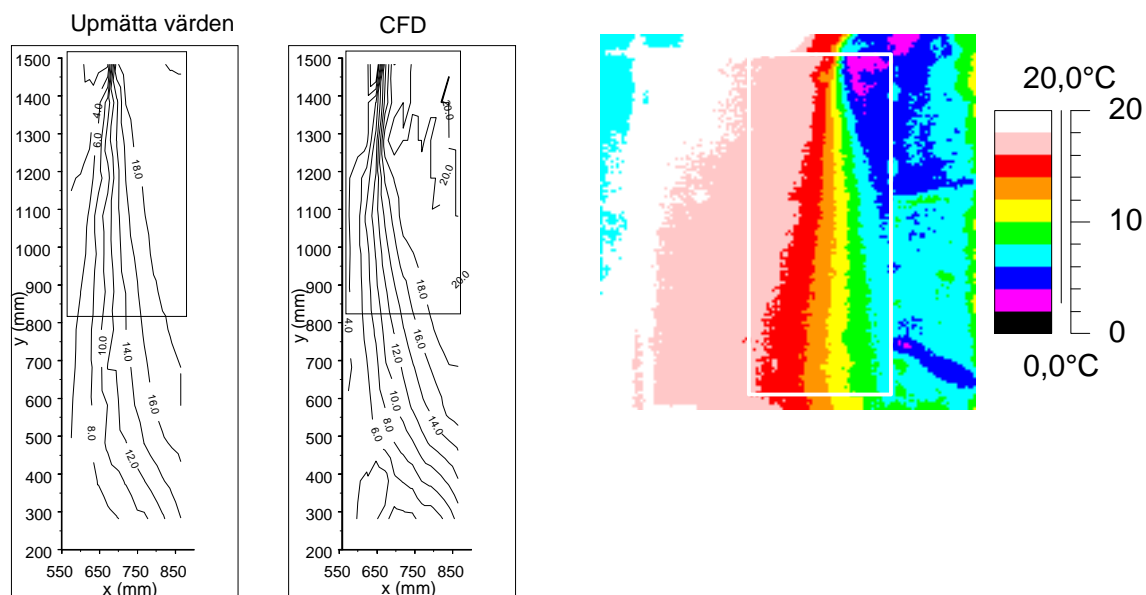


Figur 4. Jämförelse mellan tre olika ansatser för beräkning av värmeförlusterna. Beräkningar är utförda för försök1, 20°C och RH=51%

I figur 5 jämförs modellerad temperaturprofil av lufridån med uppmätt temperaturprofil, dels med termoelement och dels med värmekamera. Indata till modellen och uppmätta resultat är hämtade från försök 2, 20 °C och torrt. Resultaten visar en kvalitativt god överensstämmelse. Den beräknade modellen underskattar kylridåns bredd och temperaturen i returluften är 2 °C för hög. Arbete pågår med att kalibrera modellen. Uppmätta temperaturprofiler visar en relativt god överensstämmelse.

Uppmätt temperaturprofil i lufridå med termoelement
Beräknad temperaturprofil i lufridå

Uppmätt temperaturprofil i lufridå med värmekamera. Bilden visar övre delen av ridån närmast inblås.
Notera att denna bild är spegelvänd

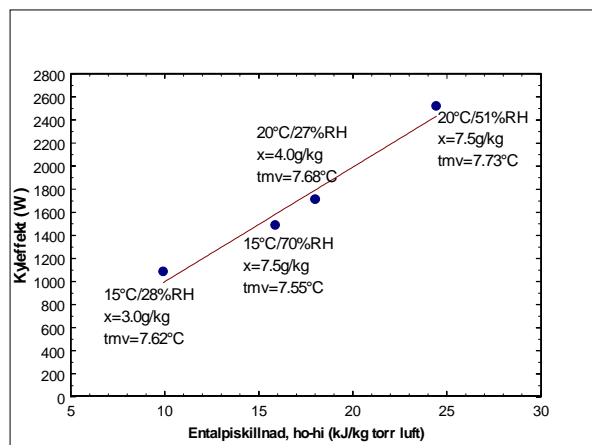


Figur 5. Temperaturprofil i lufridå. Jämförelse av modellerade och uppmätta resultat. Försök 2, 20°C och torrt.

Slutsatser

Ledning, strålning och den sensibla delen av infiltrationen är samtliga en funktion av den torra temperaturen. Den latent delen av infiltrationen och avfrostningen påverkas av fukttätheten i omgivningsluften. Inverkan av extern belysning samt de interna elförbrukarna fläkt och belysning är oberoende av klimatet. Dessa bidrag kommer att få en större procentuell inverkan på förlusterna när kyldisken förbättras och den totala kyleffekten sjunker. Omgivningens torra temperatur är den viktigaste parametern. I figur 6 visas kyleffekten som funktion av entalpskillnaden mellan kyldiskens inre och yttre atmosfär. Kurvan visar att kyleffektbehovet är direkt proportionellt mot entalpidifferensen mellan inre och yttre atmosfär i kyldisken det bidrag som dominerar. Kurvan visar att man sannolikt kan förutsäga kyleffektbehovet vid ett godtyckligt tillstånd utifrån två provade omgivningsklimat.

Vid nattäckning består förlusterna endast av ledning och bidrag från extern belysning som värmer luften i luftkanalen samt värmeförluster från den interna fläkten. Inverkan av fukt kan försummas och kyleffekten är en funktion av temperaturen. Summeras dessa förlustbidrag i energimodellerna fås den bästa överensstämmelsen med modell 3.



Figur 6. Kyleffekt som funktion av entalpi-differensen mellan inre och yttre atmosfär.

Vid jämförelse av uppmätt smältvattenmängd och fuktutfällningen i batteriet baserad på temperatur och fuktmatning före och efter batteriet, underskattas fuktutfällningen med smältvattenmetoden med 19 %. Modell 1 baserad på smältvattenmängd ger en kvalitativt god bedömning av värmeförlusternas fördelning men metoden ökar i osäkerhet med sjunkande fukthalt i omgivningsluften. Modell 2 baseras på ett antagande att all uppvärmning av luften sker genom inblandning av extern luft i ridån. Infiltrationsgraden beräknas från en fukt- och/eller temperaturl balans i luftridån. Infiltrationsbidraget från inre och yttre atmosfär antas vara lika stora. Med beräknad infiltrationsgrad och värmebalans från modell 3 fås att 16 % av den medryckta luften kommer från den interna luften och 53 % kommer från den externa luften. Resultaten visar att fältmetoden modell 2 ganska enkelt kan modifieras för att gälla för godtyckliga diskar.

Att studera luftridåns temperaturprofil med värmekamera är ett snabbt sätt att studera inverkan av olika strömningstekniska förändringar.

Referenser

- Axell, M, Andersson, G.P. Fahlén, (1998). Den energieffektiva kyldisken, Klimat 21, STEM, Stockholm.
- Billiard, F, Gautherin, W, (1993), Heat balance of an open-type frozen food display cabinet., C.R. Reun. Palmerstone, IIF / Proc. Meet. Palmerstone North 1993-3: 322-331.
- Fahlén, P(1999), Butikskyla, CTH Installationsteknik 1999, Göteborg.
- Welch, S and Rubini, P, (1996), SOFIE-Simulation of Fires in Enclosures, Users Guide, Cranfield University.