

Den energieffektiva kyldisken

Monica Axéll, SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut AB
Per Fahlén, SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut AB

Abstract

The vertical open display cabinet is commonly used and is also a large energy consumer. Experimental studies have been performed in order to study the influence of the ambient condition and to generate data for energy models and CFD-models, (CFD = Computational Fluid Dynamics). The aim is to use the models to develop “**The energy efficient display cabinet**” with a new flow strategy.

Energy balance and experimental results show that infiltration is the predominant heat load factor. The experimental results also show that losses are most influenced by the dry temperature in the ambience. A night curtain saves energy but the curtain must seal at the edges to eliminate the risk for infiltration.

The cooling capacity is directly proportional to the enthalpy difference between the inner and outer atmosphere. Therefore it is probably possible to calculate the cooling capacity for different ambient conditions from experimental results performed at two different climate conditions.

The work with Computational Fluid Dynamics Models include both full-scale models and smaller sub-models. The display cabinet is influenced by load variations. The air curtain is the single most important component in the cabinet. The optimal design would be if the cooling supply could be separated from the function of the air curtain. Furthermore the air curtain should seal with a minimized heat transfer rate. The optimization of the air curtain should be performed at the highest expected dry temperature in the ambience.

Sammanfattning

Vertikala öppna kyldiskar är en vanligt förekommande typ av kyldisk och är samtidigt en stor energiförbrukare. Experimentella studier har utförts för att studera inverkan av omgivningsklimatet samt för att ta fram mätdata till energimodeller och strömningsmodeller (CFD). Målet är att modellerna skall användas som underlag för att ta fram en energieffektiv laboratedisk med en ny typ av luftströmning.

Energibalanser och experimentella resultat visar att infiltrationen dominerar. De experimentella studierna visar att den torra temperaturen är den faktor i omgivningsklimatet som påverkar förlusterna mest. Nattgardin sparar energi men den måste sluta tätt vid kanterna för att eliminera risken för infiltration av varm luft.

Kyldiskens kyleffektbehov är en funktion av entalpiskillnaden mellan kyldiskens inre kalla atmosfär och omgivningsklimatet. Kylbehovet bör därför kunna bestämmas vid ett godtyckligt klimat baserat på experimentella resultat från två olika omgivningsklimat.

Arbetet med CFD-modeller inkluderar både fullskalemodeller och mindre delmodeller. Resultaten visar att kyldiskarna påverkas av lastvariationer. Luftridån är den enskilt viktigaste komponenten i kyldisken. Luftridåns funktion bör separeras från funktionen att kyla matvarorna. Luftridån skall optimeras så att den är stabil med så liten värmetransport som möjligt. Dimensioneringen bör ske vid den högsta förväntade omgivningstemperaturen.

Innehållsförteckning

1.	Bakgrund och motiv för projektet	1
2.	Syfte och mål	1
3.	Forskare och industrirepresentanter som arbetat i projektet	2
4.	Projektets genomförande	3
5.	Resultat	4
5.1.	Resultat och erfarenheter från provning av kyldiskar	4
5.2.	Omgivningsklimatets inverkan på vertikala kyldiskar energiförbrukning och prestanda	5
5.3.	Energimodeller	6
5.4.	Luftridå	7
5.5.	Resultat från strömningsmodelleringen	9
5.6.	Överensstämmelse mellan projektansökan och resultat	10
6.	Energi- och miljöpåverkan	10
7.	Industriell relevans	11
8.	Examina	11
9.	Publicering	11
10.	Internationell samverkan	12
11.	Slutsatser och diskussion	12
12.	Referenser	15
13.	Bilagor	16
1.	Axell, M, Fahlén, P, 1998. Promotion of Energy efficient Display Cabinet (Refrigerated Transport & Retail Display, IIR Congress, mars 1998)	16
2.	Axell, M, Fahlén, P och Andersson, G, 1998, Den energieffektiva kyldisken (KLIMAT 21, Stockholm 1998)	16
3.	Axell, M, Fahlén, P och Haglund, C, 1999, Den energieffektiva kyldisken (KLIMAT 21, Göteborg 1999)	16
4.	Axell, M, Fahlén, P, och Touvinen, H, 1999. Influence of air distribution and load arrangement in display cabinets (XVth IIR Congress, september 1999).	16
5.	Axell, M, Fahlén, P, 2000. Display Cabinet (Workshop IEA Annex 26, oktober 2000)	16

1. Bakgrund och motiv för projektet

Vertikala kyldiskar svarar för en betydande andel av butikernas energiförbrukning. Ett nyckeltal för befintliga, moderna diskar är 4000 - 8000 kWh/m och år, Backström (1997), Axell och Fahlén (1995). Med ca 10 mil installerad disklängd i Sverige innebär detta en årlig energiförbrukning av storleksordningen 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 fortfarande utrymme för betydande förbättringar även från denna nivå samtidigt som variationerna i varutemperatur kan minskas.

2. 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 ökad kunskap om luftens fördelning internt i disken och luftutbytet med omgivningen. "Laboratedisken" ska dessutom användas för att undersöka om ett helt nytt koncept för diskens luftförsörjning kan minska energibehovet och förbättra varornas temperaturkvalité.

Delmål 1: Sammanställning av tidigare arbeten.

Delmål 2: Redovisning av kyldiskens energiflöden.

Delmål 3: Strömningsteknisk modell (CFD) av en kyldisk.

Delmål 4: Realisering av en "laboratedisk" som kan användas för validering av modeller och försök med helt nya koncept.

Delmål 5: En validerad strömningsmodell och en utprovad ny typ av disk.

Delmål 6: Underlag för en licentiatsavhandling.

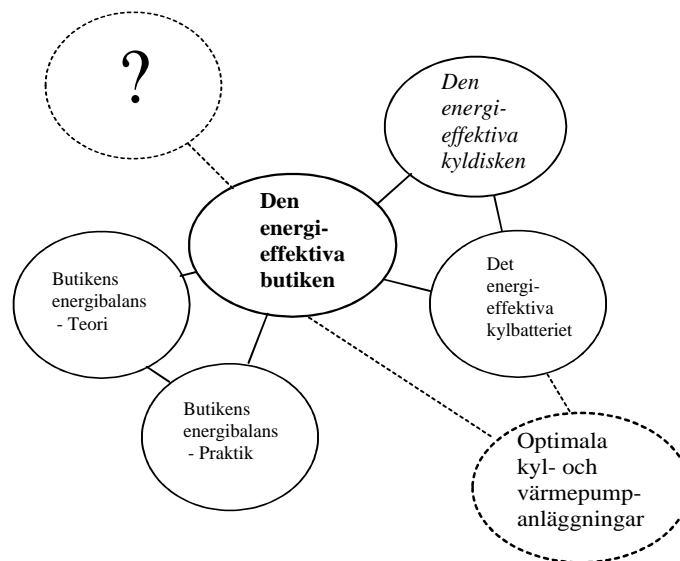
Slutmålet är att ytterligare sänka energibehovet med 25 % från nivån för den vinnande disken i Nutek's tävling samtidigt som differensen mellan kallaste och varmaste vara är mindre än 5 K (max 8°C, min -1°C ger 9 K i Nutek's tävling). Ett önskemål är att kunna minska differensen ända till 3 K.

3. Forskare och industrirepresentanter som arbetat i projektet

Projektet genomförs i samarbete mellan SP, Wica AB och AIA. SP svarar för delmål 1-3 och 5 medan Wica ansvarar för delmål 4. AIA medverkar huvudsakligen i del 2 och 4. Eftersom arbetet har stark koppling till SP-projekten "Det energieffektiva kylbatteriet" och "Den energieffektiva butiken" sker ett samråd mellan dessa tre projekt.

Två högskolor är involverade i projektet. KTH driver det övergripande projektet "Den energieffektiva butiken", som kommer att utnyttja en del av resultaten från detta projekt. KTH svarar även för den övergripande administrationen av Klimat 21.

CTH, Installationsteknik, är examinator för projektets doktorand. Per Fahlén, SP är handledare för doktoranden.



Projektorganisation:

Monica Axell, SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut

Per Fahlén, SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut

Enno Abel, Installationsteknik CTH

Niklas Rindhagen WICA COLD AB

Måns Rudbacken, AIA, Asarums Industri AB

Controller:

Lennart Rolfsman, York AB

Samarbete

Inom projektet har regelbundna möten hållits både på SP och hos WICA AB. Förutom Niklas Rindhagen (Teknisk chef) från WICA har Jan Kronstedt (VD) och Birger Palmér (Konstruktionschef) deltagit. Den kunskap som tas fram inom projektet förmedlas till industrideltagarna i samband med projektmöten. Framtagna publikationer distribueras till projektdeltagarna.

Både SP och WICA har deltagit i nationella möten inom IEA Annex 26, Stockholm. En nationell dag har organiserats på SP för intressenter inom området butikskyla.

4. Projektets genomförande

Projektet initierades under 1997 och den formella ansökan var klar 98-02-08. Litteraturstudien är genomförd och en rapport planeras vara klar till årsskiftet. Erfarenheten från tidigare experimentella studier har visat att vertikala kyldiskars funktion och prestanda påverkas av både omgivningsklimatet och hur kyldisken lastas med varor. Därför har omfattande mätningar utförts på en referensdisk för att studera hur 1) fukthalt och torr temperatur i omgivningsklimatet och 2) lastvariationer påverkar kyldiskens funktion.

Syftet med mätningarna har varit följande;

1. Att ta fram indata till energimodeller.
2. Att ta fram indata till strömningsmodeller, CFD.
3. Att ta fram mätdata för att validera strömningsmodeller.
4. Att ta fram samband mellan omgivningsklimat och kyleffekt.

Mätningarna har utförts enligt den Europeiska provningsstandarden EN 441 kompletterat med ett utökat antal mätpunkter för att leverera mätdata både till energimodeller och strömningsmodeller.

I arbetet med strömningsmodellerna används CFD-koden SOFIE. Under arbetet med CFD modellerna har det visat sig att det är omöjligt att endast använda varmtrådsanemometrar för validering av modellerna på grund av att hastigheterna är så låga (cm/s). Därför används i första hand temperaturprofiler för att validera modellerna. Mätningar i ett stort antal punkter har utförts med termoelement och en metodik har utarbetats för att göra helfältsmätningar med IR-kamera.

Arbetet med CFD modellerna inkluderar följande moment:

1. Fullskalemodell av en kyldisk under isoterma förhållanden. I detta fall har inverkan av lastvariationer studerats. Slutsatsen är att både kylningen av maten och luftridåns funktion påverkas av hur kyldisken är lastad.
2. Fullskalemodell under icke-isoterma förhållanden. Modellen är validerad mot uppmätta temperaturprofiler i luftridån.
3. Traditionellt fördelas den kalla luften i en kyldisk genom ryggpartiets perforerade plåt och i en luftridå i framkanten på kyldisken. Luften från ryggpartiet har följande två funktioner; 1) kyla varorna och 2) stabilisera luftridån. Med en mindre modell för ett hyllplan har inverkan av lastvariationer samt hålens storlek, fördelning och form studerats. Slutsatsen är att luftflödet från ryggen och lufthastigheten från ryggen påverkas av både lastvariationer och ryggplåtens utformning.
4. I mindre modeller har CFD koden validerats för att studera hur den beräknar tredimensionell uppvärmning/kylning av matvarorna dels genom ledning och dels genom strålning.

Kylbatteriet

Kylbatteriet är ytterligare en intressant komponent i kyldisken. Genom att höja köldbärartemperaturen minskar energibehovet och avfrostningar kan undvikas. För detta krävs att temperaturvariationen i matvarorna minimeras, förlusterna minimeras och kylbatteriets effekti-

vitet maximeras. Med en högre köldbärartemperatur minskar energiförbrukningen dels på grund av att kyldisken inte behöver avfrostas och dels på grund av att kylmaskinens köldfaktor ökar.

Arbetet med kylbatteriet utförs i samarbete med projektets industripartners och projektet "Det energieffektiva kylbatteriet". Målsättningen är att optimera valet av kylbatteri. Kylbatteriet skall väljas ur det standardsortiment av kylbatterier som finns idag. Framtagen kravspecifikation för kyldisken bildar ett underlag för valet av kylbatteri. AIA har räknat på olika batterier och två batterier är utvalda. Batterierna är valda så att pump- och fläktarbete minimeras.

Samarbete med industripartners

Projektgruppen har behandlat följande punkter;

1. Resultat från mätningar, energimodeller och CFD-modellering
2. Diskussioner om viktiga komponenter i kyldisken
3. Underlag till kravspecifikation på laboratoriedisken
4. Tillverkarna har bidragit med erfarenheter, kunskap om marknaden och idéer om framtida trender.
5. Hanteringen av kyldiskar ute i butiken
6. Drift och skötsel av kyldiskar
7. Erfarenheter från andra länder.

5. Resultat

5.1. Resultat och erfarenheter från provning av kyldiskar

SP har genomfört en teknikupphandling på kyldiskar finansierad av Nutek. Erfarenheten från detta projekt bildar ett viktig databas och kunskapsunderlag för detta projekt, Axell och Fahlén (1995), Axell och Fahlén (1998). Resultaten kan sammanfattas i följande punkter:

1. Försöken visade att en del av kyldiskarna inte klarade de uppsatta temperaturkraven i matvarorna i samtliga omgivningsklimat.
2. Ett sätt att spara energi är att utrusta kyldisken med en nattgardin. Besparingen var i storleksordningen 25-40 % för en provningsscykel bestående av 12 timmar dag och 12 timmar natt jämfört 100 % dagdrift. Ett viktigt resultat är dock att utformningen av nattgardinen måste vara bra. Flera av kyldiskarna hade problem med förhöjda temperaturer vid kyldiskens kanter nattetid på grund av infiltration av varm omgivningsluft.
3. Försöken visade att kyldiskar är mer eller mindre känsliga för förändringar i omgivningsklimatet. Två olika klimat jämfördes 22°C / 65% relativt ångtryck och 20°C / 51% relativt ångtryck. Energibesparingen med det mer gynnsamma omgivningsklimatet varierade från 39 % ned till 21 % för de olika kyldiskarna.
4. Försöken visade att mängden smältvatten varierade med 50 % mellan de olika provobjekten vid samma omgivningsklimat, vilket tyder på att infiltrationsgraden kan variera med i storleksordningen 50 % mellan olika kyldiskar.

5. I kyldiskarna kan temperaturskillnaden vara stor mellan kallaste och varmaste vara. Generellt gäller att de varmaste varutemperaturen uppstår längst ner längst fram och de kallaste varutemperaturerna uppstår längst bak mot rygpartiet.
6. Resultaten från vinnardisken visade att det går att driva en kyldisk utan avfrostning. För att åstadkomma detta krävs mindre infiltration in i disken och högre köldbärartemperatur. Temperaturdifferensen mellan varmaste vara och köldbärartemperaturen är fortfarande 9,5 K. Resultaten från vinnardisken bildar underlag till de mätbara mål som är uppsatta i detta projekt. Att ytterligare sänka energibehovet med 25 % från nivån för den vinnande disken i Nutek's tävling samtidigt som differensen mellan kallaste och varmaste vara är mindre än 5 K (max 8°C, min -1°C ger 9 K i Nutek's tävling). Ett önskemål är att kunna minska differensen ända till 3 K. I vinnardisken hade energiförbrukningen halverats från de interna elförbrukarna (fläkt, belysning).

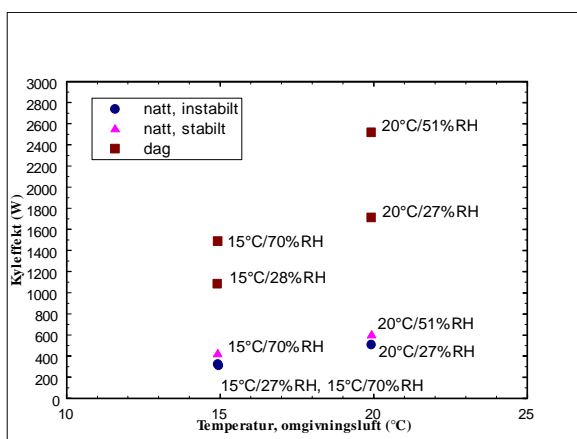
5.2. Omgivningsklimatets inverkan på vertikala kyldiskar energiförbrukning och prestanda

Resultaten från tidigare provningar av kyldiskar och från andra undersökningar visade att kyldiskar påverkas av omgivningsklimatet. För att separera inverkan av torr temperatur från inverkan av luftens fukthalt har två olika torra temperaturer och två olika fukthalter valts ut för försöken enligt tabell 1. Provnings utfördes enligt EN 441. Provnings utfördes både med dagdrift och med nattdrift med nattgardin. Resultaten redovisas i figur 1 och 2.

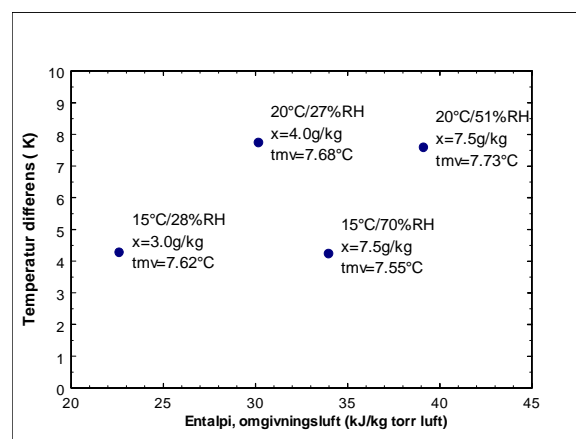
Tabell 1. Redovisning av omgivningsklimat som ingår i försöksserien.

Försök	Torr temperatur (t_o) °C	Relativ ångtryck (RH_o) %	Ångkvot (x_o) 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.



Figur 1. Kyleffekt som funktion av omgivningsklimatets torra temperatur



Figur 2. Temperaturdifferens mellan inblås- och returtemperatur som funktion av omgivningsluftens entalpi

Resultaten visar att av fukthaltens inverkan på kyleffektbehovet är liten med nattgardin. Nattgardinens funktion har optimerats genom att försegla den utefter kanterna. Försöken visar att

besparingen med nattgardin ökar med ökande torr temperatur och fukthalt. 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.

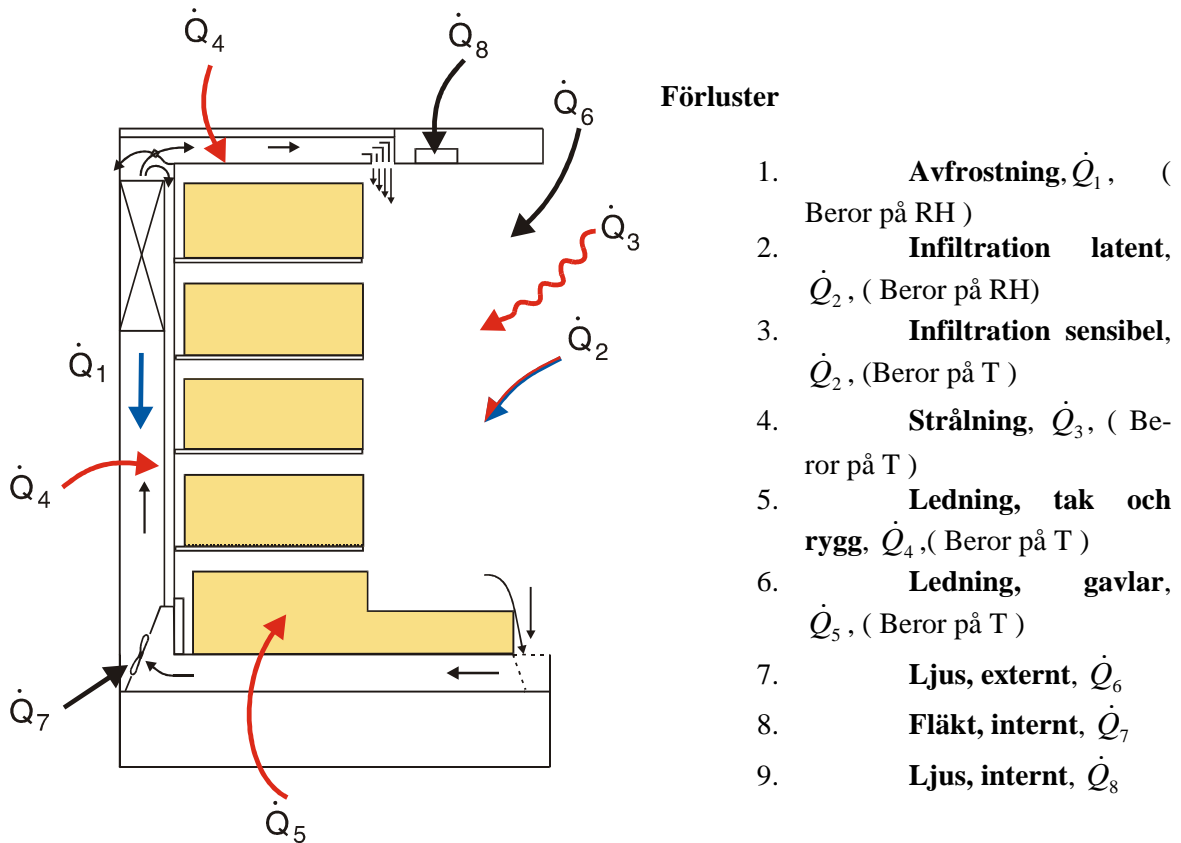
För att studera kyldiskens funktion är det vanligt att inblås- och returtemperaturen samt temperaturen i omgivningen mäts. I figur 3 redovisas denna temperaturdifferens som funktion av omgivningsluftens entalpi. Figurerna visar att en tolkning av infiltrationsförlusterna endast baserad på torr temperatur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

5.3. Energimodeller

Tre olika energimodeller har jämförts baserat på uppmätta data. Resultaten visar att infiltration av omgivande luft motsvarar ca 65 % av de totala förlusterna. 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 entalpibalans i luftridå. Ridån antas vara symmetrisk och uppvärmning av den interna luften sker endast genom infiltration.
- Modell 3, Infiltration baseras på energibalans över luftridå.

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 och kräver egentligen ett iterativt förfarande samt mätning av både temperatur och fukt. Figur 4 visar bara den första approximationen baserad enbart på fuktmätning.

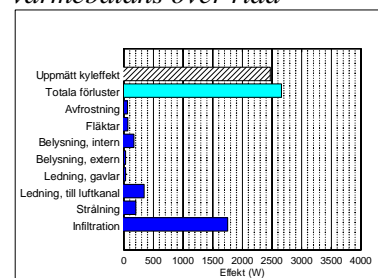
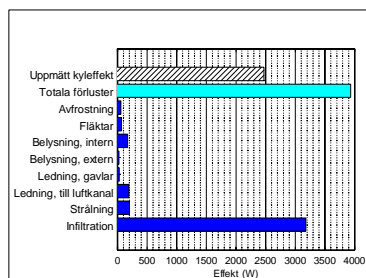
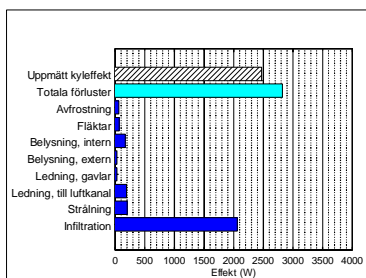


Figur 3. Energimodell

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%

5.4. Luftridå

För att minska infiltrationen måste luftridån optimeras. Luftridåns funktion beror av följande parametrar:

1. Inloppsbredd, b_o
2. Höjd, H
3. Inblåshastighet, u_o
4. Turbulensintensitet, TI
5. Ridåns vinkel vid inloppet, α_o

Luftflödet i ridån kan delas upp i följande tre regimer:

1. Omslags zonen ($u = u_o$; $x < 5.2b_o$; Schlichting (1955); $u = u(x, y, b_o, u_o)$)

2. Fullt utbildad zon ($u < u_o$; $x < 5.2b_o$; Schlichting (1955); $u = u(x, y, b_o, u_o)$)
3. Återhämtningszon (Fullt utvecklad hastighetsprofil)

Van (1976) visade att längden på omslagszonen närmast utloppet, där momentet är konstant, beror på turbulensintensiteten, TI , vid utblåset. Omslagszonens längd kan definieras som

$$x = 5.39 - 0,266(TI) \quad (1)$$

I en kyldisk har ridån två viktiga funktioner: den skall sluta tätt och den skall minimera värmetransporten in till det kylda utrymmet i kyldisken. Förmågan att sluta tätt beror på momentet vid inblåset, $u_o b_o \rho_o$, i ridån och storleken på krafterna som verkar vinkelrätt mot ridån. Hayes (1969), definierar ett dimensionslöst tal som beskriver förmågan att sluta tätt deflektionsmodul, D_m .

$$D_m = \text{Moment i luftridån} / \text{Vinkelräta krafterna} \quad (2)$$

$$D_m = \frac{\rho_o \cdot b_o \cdot u_o^2}{g \cdot H^2 \cdot (\rho_c - \rho_w)} \quad (3)$$

De vinkelräta krafterna är en funktion av den totala tryckskillnaden. Den totala tryckskillnaden beror på Δp_s , skorstenseffekten orsakad av densitetsskillnaden i luften på den kalla och varma sidan av ridån och skapad trycksskillnad som uppstår på grund av momentet som adderas till den kalla sidan på ridån, Δp_a . Hayes and Stoecker visade att $\Delta p_a \ll \Delta p_s$, vilket innebär att Δp_a kan försummas.

$$\Delta p = \Delta p_a - g \cdot (\rho_c - \rho_w) (x - x_o) \quad (4)$$

Skorstenseffekten skapas av tryckskillnaden från inblåset till den neutrala zonen, x_o , vilket är positionen i höjdded där tryckskillnaden på grund av skorstenseffekten är noll.

Om momentet är för litet bryts ridån och ett utbyte av varm och kall luft uppstår. På grund av densitetsskillnaden strävar ridån efter att böja sig mot den kalla sidan. Ett stort moment, dvs mycket högre än det som krävs för att ridån skall sluta tätt, resulterar i för stor värmetransport på grund av ökad omblandning mellan den kalla ridån och omgivningsluften. Ridån skall optimeras så att momentet är så stort att det övervinner de vinkelräta krafterna. Hayes and Stoecker rekommenderar att momentet skall fördubblas från miniminivån, vilket innebär att hastigheten vid inblåset, u_o skall multipliceras med en faktor $2^{0.5} = 1.4$.

Howell (1980) rapporterar att det bästa sättet att bestämma den lägsta deflektionsmodulen är med experiment, ($0.8 \text{ m/s} < u_o < 5.2 \text{ m/s}$). Han visade att;

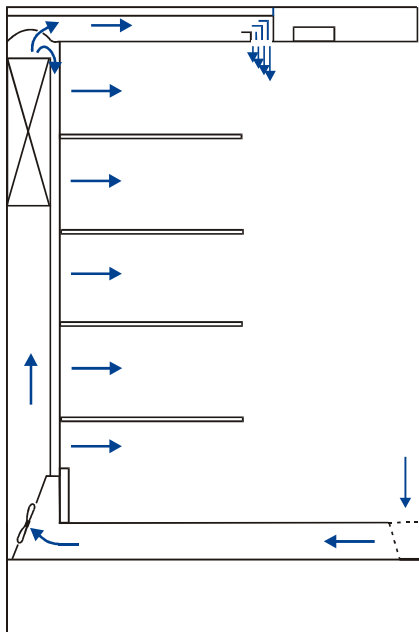
- det finns en brytpunkt för deflektionsmodulen när ridån inte längre sluter tätt.
- det för varje unik konfiguration på luftridån existerar ett värde på deflektionsmodulen där värmetransporten minimeras.
- värmetransporten är direkt proportionell utblåshastigheten och temperaturdifferensen genom ridån.

För ett givet omgivningstillstånd kan ridåns stabilitet beskrivas med deflektionsmodulen som är en funktion av b_o , H and u_o . Värmeöverföringen kan uttryckas som $Nu / (Re Pr)$ och är en funktion av b_o , H and u_o .

Hayes (1969) visade att värmetransporten påverkas mest av ridåns H/b_0 . Vinkeln vid utblåset och deflektionsmodulen har en liten inverkan vid höga deflektionsmoduler. Däremot vid låga deflektionsmoduler, för ridåer där värmetransporten skall minimeras kan varken deflektionsmodulen eller vinkeln vid ridåns inlopp försummas.

5.5. Resultat från strömningsmodelleringen

I en konventionell kyldisk blåses kall luft in i kyldisken dels genom ryggpartiet och dels som en luftrida i framkanten. Luften från ryggen skall kyla matvarorna och stabilisera luftridan som vill vika in mot den kalla atmosfären inne i kyldisken. Luftridans uppgift är att separera den varma luften från den kalla luften inne i kyldisken, se figur 5.



Figur 5. Principbild på luftströmningen i en kyldisk

I en fullskalemodell och en delmodell för ett hyllplan har inverkan av lasten i kyldisken studerats. Resultaten visar att kyldisken påverkas av lastförändringar. Den jämnaste hastighetsfördelningen som funktion av höjden och de högsta hastigheterna från luften i ryggpartiet uppnås med fullastad kyldisk. Uppmätta och beräknade resultat visade en kvalitativt god överensstämmelse. Camporese (1991) har visat att lastning påverkar temperaturkvalitén i matvarorna både med och utan nattgardin.

Utformningen av ryggplåten har studerats i en mindre tredimensionell modell för ett hyllplan. Resultaten visar att hålens storlek, form och fördelning påverkar hastighetsprofilen i hyllplanet och det är först längst ut vid hyllans framkant som den glömt hur den distribuerades in i disken.

En fullskalemodell för kyldisken har tagits fram och under isoterma och icke isoterma förhållanden. Modellen har verifierats under icke isoterma förhållanden genom att mäta temperaturprofiler med två olika mätmetoder (termoelement och IR-kamera), se figur 6.

Mindre delmodeller för ett matpaket har tagits fram för att undersöka studera följande:

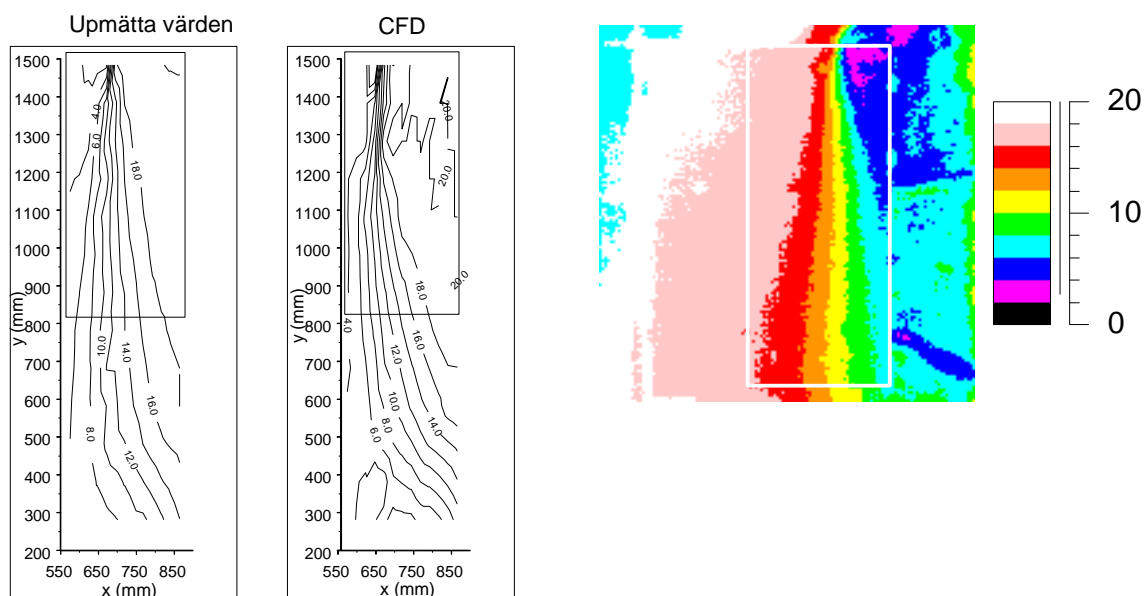
1. Hur SOFIE hanterar värmeledning i tre dimensioner. Resultatet visade att det går att använda SOFIE för beräkning av värmeledning i matpaketen.
2. Hur matpaketen påverkas av värmestrålning från omgivande varma väggar. I detta fall utfördes en studie av gridkänsligheten. Resultaten visar att det går att studera värmeövergången till och ledningen i matpaketen med SOFIE.

Uppmätt temperaturprofil i luftridå med thermo-element

Beräknad temperaturprofil i luftridå

Uppmätt temperaturprofil i luftridå med värmekamera. Bilden visar övre delen av ridån närmast inblås.

Notera att denna bild är spegelvänd



Figur 6. Temperaturprofil i luftridå. Jämförelse av modellerade och uppmätta resultat. Försök 2, 20°C och torrt.

5.6. Överensstämmelse mellan projektansökan och resultat

Delmål 1 till 3 kommer att vara uppfyllda inom uppsatt projekttid. Delmål 4 (realiseringen av laboriedisken) och delmål 5 (valideringen av de CFD beräkningar som ligger till grund för laboriediskens konstruktion) planeras att realiseras under år 2001. Målet är att projektet skall leda fram till en doktorsexamen.

6. Energi- och miljöpåverkan

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 öppna planlösningen hos en vertikal kyldisk gör den mycket känslig för störningar från det yttre systemet butiken. Målet är att ta fram en ny typ av kyldisk med förbättrad luftströmning som är mindre känslig för yttre störningar. Lägre energiförbrukning och bättre prestanda innebär besparingar både ur energi- och miljösynpunkt. Stora mängder kylda livsmedel omsätts i handeln idag och trenden är att andelen kylda varor kommer att öka.

7. Industriell relevans

En stor del av de diskar som installeras i Sverige tillverkas av små och medelstora företag, vilka inte har möjlighet att själva bedriva kvalificerad FoU-verksamhet. Projektet har därmed stort intresse även ur ett SMF-perspektiv (SMF = små och medelstora företag; prioriterad inriktning för tillämpad forskning). Den industriella relevansen säkras huvudsakligen genom medverkan av svensk industri.

Industriparterna får del av den generella kunskap som tas fram inom projektet. Konstruktionsprinciper som används i laboratedisken kan i ett senare skede användas i utvecklingen av nya kyldiskar. Kombinationen av modellering och mätning är speciellt intressant då provning av kyldiskar är mycket tidskrävande på grund av den stora last som finns i en kyldisk (> 1 ton). Provning enligt EN 441 sker under stationära förhållanden och insvängningsförloppen är långa på grund av den stora termiska massan. Slutmålet är att framtagna teoretiska modeller skall kunna användas i utvecklingsarbetet med nya kyldiskar.

8. Examina

I den ursprungliga projektansökan var det planerat att arbetet skulle resultera i en licentiats examen. Planerna är ändrade och en doktorsexamen planeras med detta projekt som underlag. Detta innebär att examen är senarelagd. En doktorsexamen kräver mer detaljerade studier i de enskilda stegen.

9. Publicering

1. Axell, M, Fahlén, P, 1998. Promotion of Energy efficient Display Cabinet (Refrigerated Transport & Retail Display, IIR Congress, mars 1998).
2. Axell, M, Fahlén, P och Andersson, G, 1998, Den energieffektiva kyldisken (KLIMAT 21, Stockholm 1998).
3. Axell, M, Fahlén, P och Haglund, C, 1999, Den energieffektiva kyldisken (KLIMAT 21, Göteborg 1999).
4. Axell, M, Fahlén, P, och Touvinen, H, 1999. Influence of air distribution and load arrangement in display cabinets (XVth IIR Congress, september 1999).
5. Axell, M, Fahlén, P, 2000. Display Cabinet (Workshop IEA Annex 26, oktober 2000).

Planerade publikationer:

1. Litterature survey – Display Cabinets
2. Air Curtain and Air Distribution
3. Ph.D. Thesis “The Energy efficient Display Cabinet”

10. Internationell samverkan

SP har deltagit i ett internationellt Round Robin test med 17 deltagare i Europa (TNO, University of Bristol och Cemagref deltar bl.a. i detta projekt) organiserat av den Europeiska branschorganisationen CECOMAF. Syftet med Round Robin testet är att utvärdera den Europeiska standarden EN 441 för laboratorieprovning av kyldiskar. Detta projekt ingår inte i Klimat 21 men har direkt koppling till det aktuella forskningsprojektet då utvärderingen av resultaten innefattar en analys av kyldiskens samverkan med den yttre miljön. SP deltar i IEA arbetet inom Annex 26 i ett nationellt team tillsammans med KTH som är nationell koordinator. Resultaten från projekten i KLIMAT 21 skall användas som ett nationellt bidrag till Annex arbetet.

Monica Axéll är nationell representant i subcommission D1 "Refrigerated display cabinets".

11. Slutsatser och diskussion

Provning av kyldiskar är tidskrävande. I en 2,5 m lång kyldisk lastas ca 1 ton standardiserade matpaket in. Mätperioden är en 24 timmars cykel och innan det skall temperaturen i matpaketen vara stabil. Den stora termiska massan gör att detta tar lång tid. Det är hårda krav på strömningen i klimatkammaren. Hastigheten får inte överstiga 0,2 m/s. Detta ställer stora krav på tillverkarnas provningsutrustning. För att effektivisera provning av kyldiskar och utvecklingen av nya produkter är det därför viktigt att utveckla teoretiska modeller som kan kombineras med experimentella studier.

Försöken visade att inverkan av omgivningsklimatet är stor. Både den torra temperaturen och fukthalten påverkar kyldiskens prestanda. De förluster som kyleffekten skall kompensera för kan indelas i följande tre grupper, se tabell 2:

Tabell 2. Förluster i en kyldisk

<i>Beroende av omgivningens torra temperatur</i>	<i>Beroende av fukthalten i omgivningen</i>	<i>Oberoende av omgivningsklimatet</i>
Infiltration (sensibel)	Infiltration (latent)	Intern belysning
Ledning	Avfrostning	Extern belysning
Strålning		Intern fläkt

Howell (1991), (1993)och(1993)har studerat fukthaltens inverkan på kyldiskens prestanda och visat att det går att spara energi i butiken med torrare omgivningsluft. Detta är intressant för det större systemet butiken. Fukten i omgivningsluften kan behandlas med följande två principiella strategier:

1. Fukthalten i lokalen kontrolleras med butikens luftbehandlingsaggregat.
2. Fukten fälls ut i kyldiskar och frysmöblers kylbatterier/förångare.

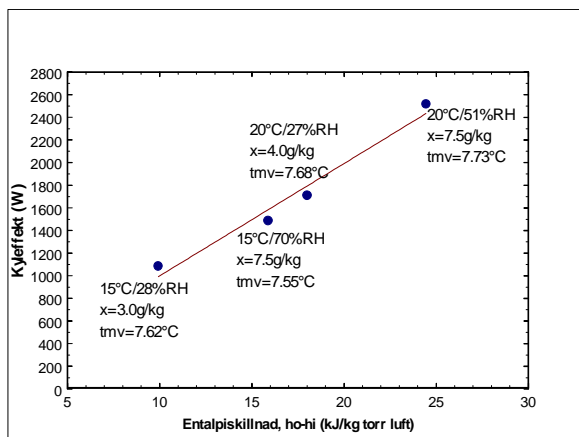
Howell (1993) redovisar en butiksmodell och mätningar på olika typer av diskar. För att få indata till butiksmodellen krävs att mätningar vid olika fukthalter görs på minst två typer av kyldiskar i butiken. Axell och Fahlén (1998) visade att infiltrationsgraden kan variera med upp till 50% mellan olika kyldiskar. Redovisade energimodeller och resultaten från mätningarna visar att en ökande infiltrationsgrad i kyldisken innebär att fukthalten i omgivningsluften får en allt större inverkan. Det krävs en kyldiskmodell för varje typ av kyldisk som är installerad i butiken. Utförda försök och energibalanser i detta projekt visar att omgivningens torra temperatur är den viktigaste parametern.

I figur 7 visas kyleffekten som funktion av entalpiskillnaden mellan kyldiskens inre och yttre atmosfär. Kurvan visar att kyleffektbehovet är direkt proportionellt mot entalpisdifferensen 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. Observera att kurvan inte går genom origo. 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.

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.

Resultaten visar att öppna vertikala kyldiskar bör installeras med nattgardin för att minska energiförbrukningen. Det är dock viktigt med väl fungerande nattgardiner som sluter tätt efter kyldiskens kanter.

Besparingarna med nattgardin talar för att öppna kyldiskar borde ersättas med kyldiskar med dörrar. Det bör dock noteras att dagtid kommer dessa dörrar att öppnas. Trenden är att butikerna blir större och att kundgenomströmningen ökar. Detta innebär att öppningsfrekvensen kommer att vara hög. Varje gång dörrarna öppnas kommer det att ske ett luftutbyte i kyldisken. Om dörrar skall installeras måste dessa kombineras med en ridå för att minska energiförbrukningen och för att upprätthålla temperaturkvalitén i varorna.



Figur 7. Kyleffekt som funktion av entalpiskillnaden mellan inre och yttre atmosfär.

Vid jämförelse av uppmätt smältvattenmängd och fuktutfällningen i batteriet baserad på temperatur och fuktmetning 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 temperaturlinje 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. Slutsatsen är att samtliga tre modeller är tillämpbara. Den tredje metoden ger den bästa noggrannheten.

ten men är samtidigt den metod som är kräver mest mätningar för att få fram ett dataunderlag. Den viktigaste slutsatsen från beräknade modeller är att det är infiltrationen som dominerar.

Det principiella arbetet med CFD har gått från att arbeta med fullskalemodeller till mindre delmodeller för att studera olika intressanta frågeställningar. Ett annat sätt att illustrera CFD arbetet är följande;

Steg 1) Verklighet \Rightarrow CFD-modell

Steg 2) CFD-modell \Rightarrow Nytt koncept \Rightarrow "Verklighet"

Arbetsmetodiken har gått från steg 1; där det varit centralt att visa att verkligheten kan beskrivas med en CFD modell till steg 2; där modellen används för att studera olika fenomen och lösningar som sedan kan realiseras i laboratoriedisken. Denna arbetsgång är principiellt viktig.

Luftridån är den enskilda komponent som är viktigast för att förbättra kyldiskens prestanda och minska energiförbrukningen.

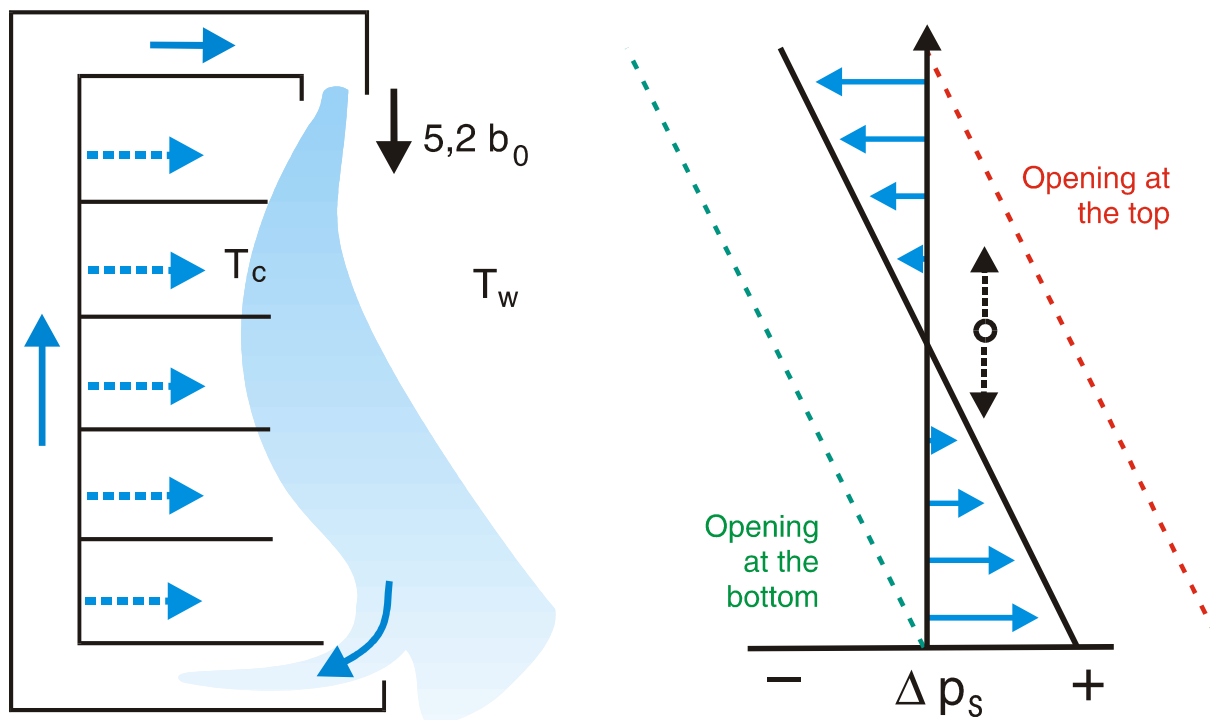
Deflektionsmodulen är relationen mellan utloppsmomentet och de horisontella krafter som verkar på ridån. I tidigare resonemang har endast de horisontella krafter som orsakas av temperaturskillnaderna mellan den kalla inre atmosfären och den varma omgivningen beaktats.

Ridån strävar efter att vika in mot det kalla utrymmet inne disken. I omslagszonen är momentet konstant. Positionen i höjddled när momentet börjar att minska beror av turbulensintensiteten vid utblåset. Deflektionsmodulen kan betraktas som ett globalt mått för ridån. Studeras istället den lokala kraftbalansen i höjddled från utblåset ned mot returen bör det motverkande momentet från ryggen inkluderas. Luftströmning och hastighetsfördelning från ryggpartiet påverkas av lastvariationer och av hålens storlek, form och utformning. Luftflödet från ryggen skall kyla varorna och stabilisera luftridån.

Om hastigheten från ryggen ändras kommer "den lokala balanspunkten att ändras".

De varmaste varorna är placerade längst ner och längst fram i kyldisken. Vid retur inloppet är det principiella utseendet på ridån sådant att det vill vika ut från kyldisken. Detta innebär att behovet av kyla inte sammanfaller med behovet av stabilisering av luftridån. Därför bör luftridåns funktion separeras från kylningen av matvarorna. Figur 9 illustrerar det principiella formen på ridån och indikerar att det inte bör tillföras en stabiliserande kraft med luft från ryggpartiet i botten på kyldisken.

Det fortsatta arbetet fokuseras på att optimera luftridåns stabilitet och minimera infiltrationen. Försöken har visat att det är viktigt att förändra luftströmningen så att den blir oberoende av förändringar i lasten. Kylningen av varor bör separeras från luftridåns funktion. För varje luftridå vid ett givet omgivningsklimat existerar en optimal utblåshastighet när ridån är stabil och värmetransporten minimeras. En ridå skall dimensioneras för det varmaste omgivningsklimatet. Med sjunkande temperatur kommer ridåns stabilitet att öka på grund av att de horisontella krafterna orsakade av densitetsvariationer minskar.



Figur 8. Principbild på luftströmmen i en kylskåp och de krafter som verkar på strömmen.

12. Referenser

Axell, M. and P. Fahlén (1995). Evaluation of commercial refrigerated cabinets- Experience from laboratory tests according to prEN 441. The 19th International conference of refrigeration, Haag, The Netherlands.

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

Backström, C., Westman, O NUTEK's technical procurement competition - Electricity efficient display cabinet. NUTEK.

Camporese, R., AL (1991). Effects of the load arrangement on thermal performances of the open display cabinets. 18th Int. Congr. Refrig., Montreal.

Hayes, F. C., and Stoecker, W. F., (1969). "Design data for air curtain." ASHRAE Trans. 75(II): 168-180.

Hayes, F. C., and Stoecker, W. F., (1969). "Heat transfer Characteristics of the Air Curtain." ASHRAE Trans.(2120): 153-167.

Howell, R., H (1993). "Calculation of humidity effects on energy requirements of refrigerated display cases." Ashrae Trans 99(N.1): 679-693.

Howell, R., H (1993). "Effects of store relative humidity on refrigerated display case performance." ASHRAE TRANS 99: 667-678.

Howell, R. H., and Shiabata, M (1980). "Optimum Heat Transfer Through Turbulent Recirculated Plan Air Curtains." ASHRAE Transactions 86, Part 1(2567): 188-200.

Howell, R. H., Adams, P. Jr (1991). Effects of indoor space conditions on refrigerated case performance, ASHRAE.

Van, N. Q., and Howell, R. H., (1976). "Influence of initial turbulence intensity on the development of plane air-curtain jets." ASHRAE Trans. 82(2121): 208-228.

13. Bilagor

1. [Axell, M, Fahlén, P, 1998. Promotion of Energy efficient Display Cabinet \(Refrigerated Transport & Retail Display, IIR Congress, mars 1998\).](#)
2. [Axell, M, Fahlén, P och Andersson, G, 1998. Den energieffektiva kyldisken \(KLIMAT 21, Stockholm 1998\).](#)
3. [Axell, M, Fahlén, P och Haglund, C, 1999, Den energieffektiva kyldisken \(KLIMAT 21, Göteborg 1999\).](#)
4. [Axell, M, Fahlén, P, och Touvinen, H, 1999. Influence of air distribution and load arrangement in display cabinets \(XVth IIR Congress, september 1999\).](#)
5. [Axell, M, Fahlén, P, 2000. Display Cabinet \(Workshop IEA Annex 26, oktober 2000\).](#)