

Den energieffektiva kyldisken

Monica Axell
Gunilla Andersson
Per Fahlén

SP (Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut)

Sammanfattning

Vertikala kyldiskar är den mest installerade typen av kylmöbel i butikerna och samtidigt den mest energislukande. I projektet studeras kyldiskens energiflöde och luftströmning.

En tvådimensionell CFD-modell (CFD = Computational Fluid Dynamics) har tagits fram med programkoden SOFIE. Under den första fasen förutsätts stationära och isoterma förhållanden. I en fullskalemodell studeras lastens inverkan på luftströmningen. I en mindre tredimensionell modell för ett snitt av ett hyllplan har inverkan av hålgeometrin i luftutblåset i ryggpartiet studerats med och utan last i hyllplanet. Parallellt har hastighetsprofiler och fördelning av luftflöde i kyldisken uppmätts.

Modellerade och uppmätta resultat överensstämmer kvalitativt väl. Luftströmning och luftfördelning påverkas av hur kyldisken är lastad. Utformningen av hålgeometrin i ryggpartiet påverkar strömningen inne i hyllplanet. Skall detaljer utanför hyllplanet studeras, t ex luftridån, kan en enklare hålgeometri ansättas för att spara beräkningstid. Mätning av låga lufthastigheter (under 0,1 m/s) är svårt.

En första ansats till en energimodell har tagits fram och beräkningar har utförts. För att gå vidare krävs ett större experimentellt underlag som indata till modellen.

Nyckelord: energibalans, luftfördelning, CFD, kyldiskar, SOFIE

Introduktion

Vertikala kyldiskar svarar för en betydande andel av butikernas förbrukning av el. I en teknikupphandlingstävling för kyldiskar lyckades vinnaren sänka den årliga energiförbrukningen med ca 50 % jämfört med tidigare nivåer. Samtidigt visar undersökningar att de öppna kyl- och frysdiskarna är en svag länk i temperaturkedjan (Camporese 1991; Anema 1995; Bobbo, Cortella et al. 1995; Nordtvedt and Nordvang 1995). Projektet avser att kartlägga kyldiskens energiflöden och undersöka möjligheterna att minska dessa ytterligare med bibehållen varukvalité. Arbetet utförs i en kombination av teoretiska och experimentella studier. Inom projektets ram skall en laboratedisk tas fram för att utföra experimentella studier under kontrollerade förhållanden.

Energibalans

Det finns energibalanser framtagna för kyldisken och undersökningar gjorda på hur kyldisken samverkar med sin omgivning. Modellerna är relativt lika varandra och förutsätter ofta ett fortvarighetstillstånd, se fig.1 (Billiard and Gautherin 1993). Modellen tar inte hänsyn till att varor tas ur disken eller att nya varor lastas in. Billiards beräkningar utförda på en öppen frys-disk ger en avvikelse på 7 % mellan tillförd kyleffekt och den beräknade summan av värmeförluster. Det dominerande bidraget är värmeförluster på grund av infiltration genom luftridån. Beräkningar med denna modell på ett antal kyldiskar med olika omgivningsklimat, baserade på tidigare laborieprovningar, resulterade i relativt stora avvikelser mellan tillförd

och avgiven effekt. Detta beror på att viktiga mätdata saknas och ersatts med antagna värden (hastigheten på luften i ridån och luftens tillstånd inne i disken).

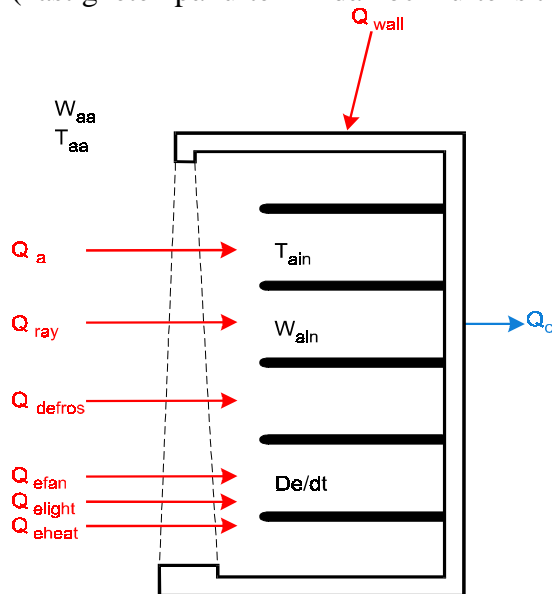


Fig. 1 Energimodell

Värmeförluster fördelas på följande bidrag:

- Avfrostning av kylbatteriet
- Infiltration genom luftridån. Massflödet genom ridån beräknas genom att mängden smältvatten, vatteninnehållet i omgivningsluften respektive inne i kyldisken samt drifttiden är kända.
- Förluster på grund av ledning.
- Förluster på grund av strålning.
- Förluster pga diskens interna fläktar.
- Förluster pga sargvärme.
- Förluster pga diskens interna belysning.

Beräkningarna visar att infiltrationen dominerar, vilket också framgår av de laboratorieförsök som utförts på SP. Skillnaden mellan ett fall med ren dagdrift och ett fall med kombinerad dag- och nattdrift med nattäckning är av storleksordningen 25 till 40 % (Axell and Fahlén 1995; Axell and Fahlén 1998).

Howell har studerat hur de omgivande luftens fukthalt påverkar kyldiskens energiförbrukning. I denna modell är även utbytesfrekvensen av varor i disken införd som en parameter (Howell 1993). Förlusterna delas upp i två kategorier.

Fuktberoende:

- Avfrostning,
- Infiltration (latent)
- Sargvärme

Fuktoberoende:

- Ledning
- Strålning
- Infiltration (sensibelt)
- Lastens utbytesfrekvens
- Belysning och fläkt

Det finns en stark samverkan mellan kyldisken och klimatet i butiken och Brolls anger t ex vilka faktorer som beror på kylsystemet och faktorer som beror på vilka rutiner man har i butiken (Brolls 1986). Han lyfter även fram de parametrar som kan hänföras till kyldiskens omgivning (omgivningklimat, skötsel av kyldisken, placering av disken i butiken och kylsystemets regleringsystem). I fig. 2 visas omgivningklimatets inverkan på kylbehovet.

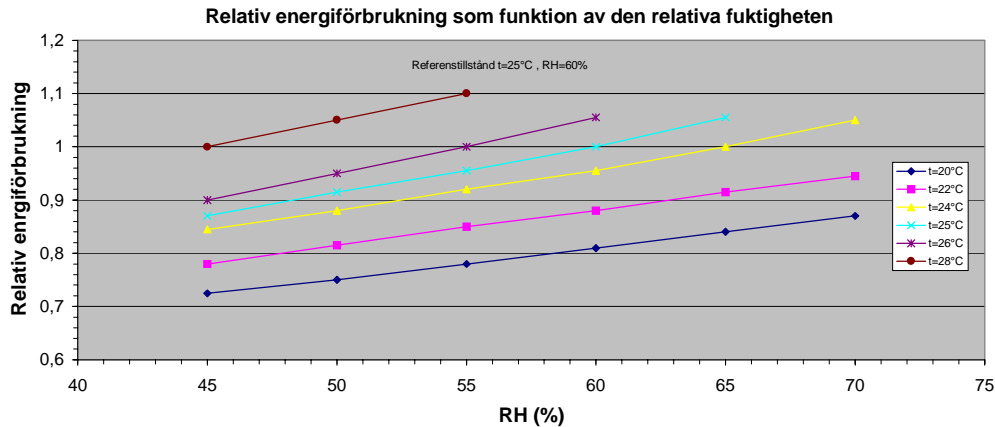


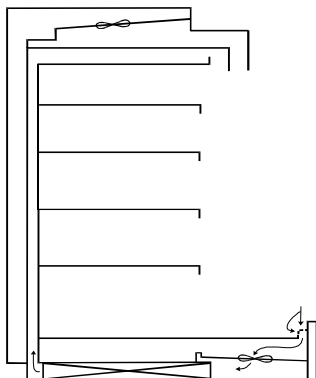
Fig. 2. Klimatets inverkan på kylbehovet i en kyldisk (25°C och $60\% \text{RH}$, ISO 3).

CFD-modell av kyldisk (CFD = Computational Fluid Dynamics)

CFD är ett viktigt verktyg för att undersöka hur strömningen fungerar i och runt en kyldisk. De stora varumängder som lastas in i disken gör stabiliseringen av lastens temperatur och provningscykeln tidskrävande. Därför är ett parallellt arbete med experimentella och teoretiska studier det mest optimala. Arbete med CFD-modellering pågår på flera håll med olika programkoder (Hu, Fan et al. 1993; Baloe, Guyonnaud et al. 1995; Stribling, Tassou et al. 1997).

CFD-modellering och experimentella studier

Inom detta projekt har en tvådimensionell CFD-modell tagits fram med CFD-koden SOFIE (Welch and Rubini 1996). I den första fasen antas följande förhållanden: isotermt och stationärt, turbulensmodell enligt k- ϵ . I nästa fas kommer modellen att anpassas även för varierande temperatur. Kyldisken antas ha varit i drift en tid med stabil varutemperatur medan inverkan av avfrostning och påfrysning är minimal. Beräkningsgeometrin omfattar hela kyldisken och ett fritt område på 60 cm utanför kyldisken. Ett konstant tryck användes som randvillkor mot yttre atmosfär. Alla hyllor och laster modelleras inledningsvis som inaktiva blockeringar, vilka hindrar luftflöde men inte utbyter värme. En principskiss på en kyldisk visas i fig.3.



Mätningar och beräkningar har utförts för tre olika driftsfall:

- Olastad kyldisk
- Kyldisk lastad enligt EN 441
- Kyldisk delvis lastad (ingen last i hyllplan 2 och 4)

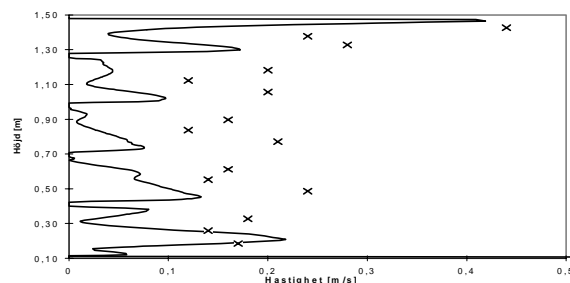
Fig. 3. Kyldisk

Kyldiskens fläktkurva har mätts upp och det uppmätta flödet är ingångsdata till modellen. För att bestämma fördelningen mellan ridån och ryggpartiet har hastigheten bestämts i luftridån med en anemometer. Flödet i ridån beräknas och resterande flöde antas gå ut genom ryggpartiet. För samtliga driftsfall har hastighetsprofilen mätts upp i varje hyllplan i fem punkter i höjdlängd och i fem punkter i sidled samt två positioner i djupled. Hastighetsprofilen antas vara symmetrisk från centrum och ut mot sidoplåten. Hastighetsmätningar har utförts dels med anemometer och dels med termistorer.

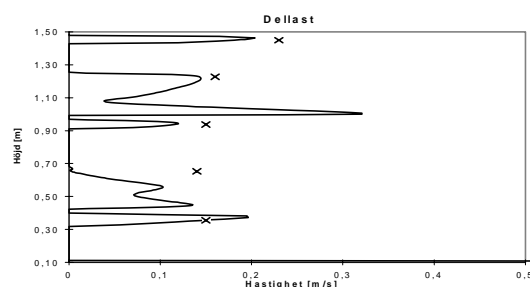
Modellen kräver ett relativt stort antal kontrollvolymer, i storleksordningen 100 000, vilket innebär att beräkningarna är tidskrävande. För att undersöka vilka förenklingar som kan göras har en liten tredimensionell modell tagits fram för ett snitt av ett hyllplan. I modellen har det undersökts om det är möjligt att ersätta den verkliga håldelningen i ryggpartiet med en enklare hålgeometri som inte kräver en lika fin indelning. Den första modellen bygger på att hålraderna med runda hål ersätts med kvadratiska hål med samma hydrauliska diameter. Den andra modellen är en smal slits vars bredd är vald så att öppningsarean i varje hålrad är lika stor som slitsens area. Den tredje modellen bygger på den grövsta approximationen. Här ersätts varje hålrad med en bred slits med samma bredd som hålets diameter.

Beräkningarna har utförts för ett hyllplan utan last och med 200 mm hög last som varierar i djupled (olastad, lastad 100 %, 95 % i djupled räknat från framkanten, samt 75 % och 50 %). Modellen antar att flödet ut genom ryggpartiet fördelar sig jämnt över hela ytan, vilket innebär att flödet anpassas till öppningsarean i ryggen i det aktuella hyllplanet.

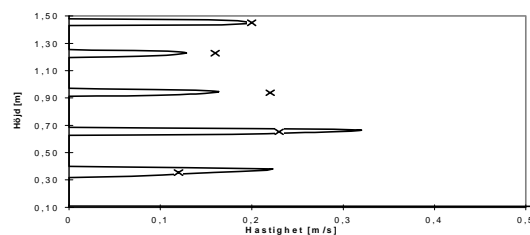
Resultat



*Utan last
250 mm från ryggplåt*



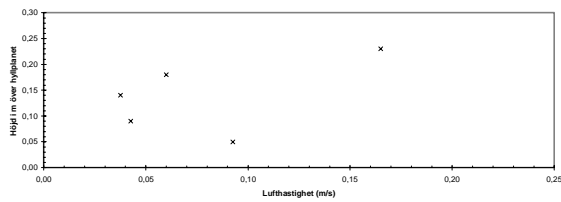
*Dellast
350 mm från rygg*



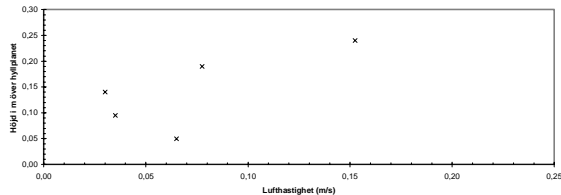
*Fullast
350 mm*

*Fig.4. Jämförelse mellan simulerade och uppmätta lufthastigheter som funktion av höjden. Heldragna linjer anger simulerade resultat och kryss (*x*) anger uppmätta värden.*

Den tvådimensionella modellen för hela kyldiskens geometri ger en kvalitativt god överensstämmelse mellan mätningar och modell. Utan någon last i hyllplanen var medelhastighetens variation i horisontell led inne i ett hyllplan relativt liten. Däremot var variationen mellan de enskilda hyllplanen kraftig (i storleksordningen $\pm 50\%$; 0,1 till $> 0,3$ m/s). Det var även markanta hastighetsvariationer i vertikal led. Med lastade hyllplan ändrades både förhållandet mellan de olika hyllplanen och absolutvärdet, se fig. 4.



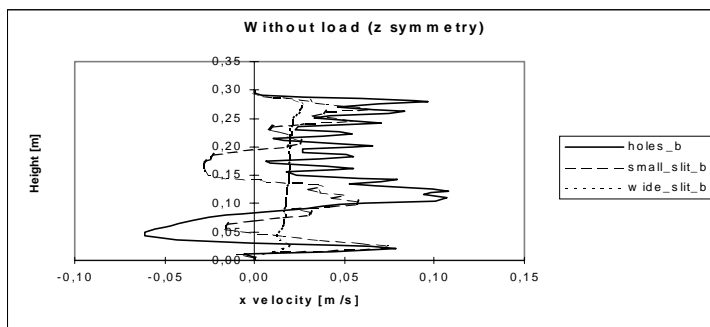
250 mm från rygglåt
Utan last



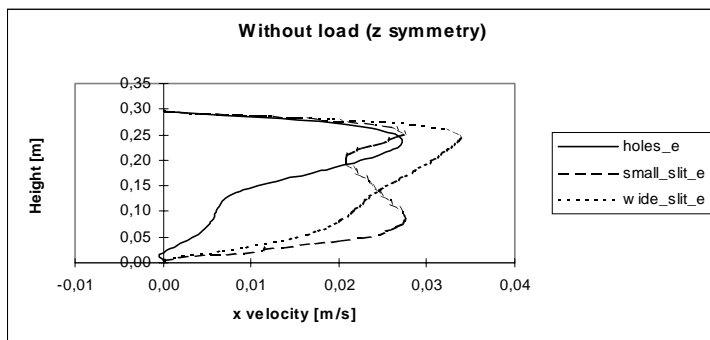
350 mm från rygglåt
Utan last

Fig. 5 Uppmätt hastighetsprofil i hyllplan 2

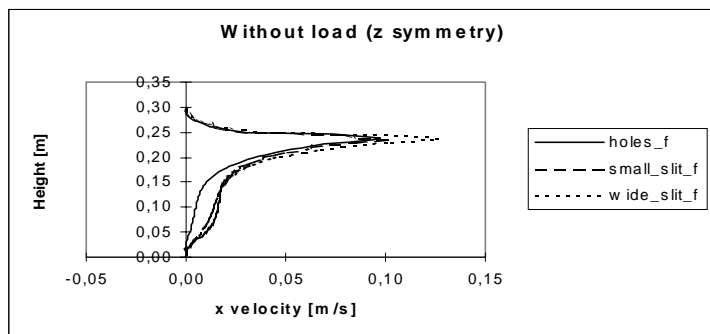
I en tredimensionell modell har det undersökts om det är möjligt att ersätta den verkliga hål- delningen i ryggparket med en enklare hålgeometri som inte kräver en lika fin indelning av beräkningsområdet. Jämförs de tre olika modellansatserna genom att studera hastighetsprofi- len i hyllplanet i olika snitt i djupled skiljer sig profilerna. Det är först i snittet längst ut på hyllplanet som profilerna får samma karaktäristik och storleksordning.



100 mm från rygglåt,
utan last



400 mm från rygglåt,
utan last



Vid hyllans ytterkant, 500
mm, utan last

Fig. 6 Simulerade värden på hastighetsprofilen med de tre olika ansatserna till hålgeometri.

Jämförs de beräknade värdena med uppmätta värden är den kvalitativa överensstämmelsen god med modellen med de kvadratiska hålen. Jämförs motsvarande ansatser i ett hyllplan med last kan det konstateras att även i detta fall är skillnaderna mellan de tre olika modellerna relativt stora och det är endast i utkanten på hyllan som hastighetsprofilerna liknar varandra, se fig. 5-6.

Ett problem vid jämförelse mellan mätningar och modellerade värden har varit att den kvantitativa avvikelserna är stora. Detta problem gäller framförallt jämförelse mellan beräknade och uppmätta värden i den tredimensionella modellen. Studierna i fullskalemodellen och modellen för hyllplanet har gjorts på två olika diskar med olika geometri. För att undersöka varför avvikelserna är så stora har en kartläggning av olika troliga felkällor gjorts.

Medelhastigheten i varje hyllplan och arean ger flödet i hyllplanet. Summeras dessa flöden blir det totala flödet större än det totala luftflödet som tillförs kyldisken. Utifrån detta kan det konstateras att de uppmätta hastigheterna är för höga. Vid en jämförelse mellan olika givartyper kan det konstateras att orsaken inte beror på vilken givare som används. Däremot stör givarna varandra och det är olämpligt att mäta mer än en position i höjddled åt gången, se fig. 7.

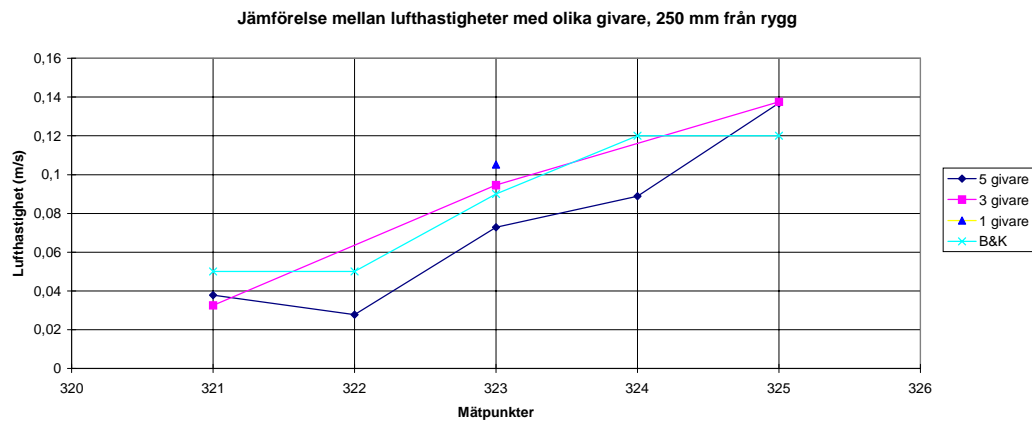


Fig. 7. Jämförelse av termistorgivare (5, 3 respektive 1 givare samtidigt) och anemometer. X-axel motsvarar höjd över hyllplan (50 mm mellan varje position i höjddled).

Jämförs den resulterande hastighetskomponenten med hastighetskomponenten i x-riktningen är dessa ungefär lika stora, vilket indikerar att störningar på grund av att givarna störs av hastighetskomponenter i andra riktningar inte är en trolig förklaring. Däremot kan turbulensen vara en faktor som stör mätningarna. Längdskalan på de turbulenta hastighetskomponenterna är mycket mindre än längdskalan på kontrollvolymerna i modellen. Turbulensen kan däremot påverka hastighetsgivarna (de bygger på en mätprincip där mätkroppen kyls av den förbipasserande luften och hastigheten är relaterad till temperaturen). Givarnas riktning beroende har undersökts genom att installera givarna parallellt och vinkelrätt mot strömmen. Värdena är repeterbara och av samma storleksordning. Slutsatsen är att den kvantitativa avvikelserna är stora men att hastighetsprofilerna visar en kvalitativt god överensstämmelse.

Slutsatser

En första ansats till energimodell har tagits fram baserad på Billiard's modell. För att kunna validera modellen krävs ett utökat experimentellt underlag där lufttillståndet inne i kyldisken är viktig parameter för att bestämma värmeförlusterna i form av infiltration. Infiltrationen är en viktig faktor i kyldiskar, vilket konstaterats i tidigare undersökningar. Det har också verifierats vid experimentella undersökningar på SP, där skillnaden mellan kylbehov i dagfallet och

nattfallet med nattgardin är markant. Jämförs mängden smältvatten och skillnaden i latent värme är överensstämelsen god.

Den framtagna CFD-modellen ger en kvalitativt god överensstämmelse med verkligheten. Den bästa överensstämelsen fås vid fullastad kyldisk. Detta beror på att flödesprofilen mellan de olika hyllplanen utjämnas och att luften därmed sprids jämnare i disken. Det kan konstateras att det är mycket svårt att mäta låga lufthastigheter under 0,1 m/s. Vid fullastad disk ökar hastigheten, vilket är en orsak till att överensstämelsen blir bättre.

Att ansätta en förenklad hålgeometri för att minska antalet kontrollvolymmer bör göras med stor eftertanke. Skall luftridåns funktion studeras i detalj är det rimligt att ansätta en förenklad hålgeometri då inverkan av hålgeometrin inte är stor i utkanten på hyllan. Skall däremot luftfördelningen inne i hyllplanen studeras är hålens geometri viktig. De tre olika modellerna visar att utformningen av ryggpartiet påverkar strömningen inne i hyllplanet. Studierna har visat att kyldisken påverkas av hur lasten ser ut och att strömning och luftfördelning skiljer sig åt i en tom och en lastad kyldisk.

Anema, P., J (1995). The chilled cabinet essential in the food chain. 19th Int. Congr. Refrig., Haag.

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.

Baloe, J. N., L. Guyonnaud, et al. (1995). Numerical simulation of air flow distribution in a refrigerated display case air curtain. Proc. 19th Int. Congr. Refrig., Haag.

Billiard, F. and W. Gautherin (1993). "Heat balance of an open-type frozen food display case." C. R. Reun. Palmerston North, IIF / Proc. Meet. Palmerston North 1993-3: 322-331.

Bobbo, S., G. Cortella, et al. (1995). The temperature of frozen foods in open display cabinets: simulation and testing. Proc. 19th Int. Congr. Refrig., Haag.

Brolls, E., K (1986). "Factors affecting retail display cases." Bristol, IIF, FR 1986-3: 405-413.

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

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

Hu, S., N. Fan, W, et al. (1993). Design of air flow path for a display cabinet using computational fluid dynamics. C. R. Reun. Palmerston North, IIF / Proc. Meet., Palmerstone North.

Nordtvedt, T., S and H. Nordvang (1995). Fresh and frozen fish in the norwegian supermarkets, at which temperature is it bought ? 19th Int. Congr. Refrig., Haag.

Stribling, D., S. Tassou, A, et al. (1997). "A two-dimensional computational fluid dynamics model of a refrigerated display case." Ashrae Trans 103(N. 1p): 88-94.

Welch, S. and P. Rubini (1996). "SOFIE- Simulation of Fires in Enclosures, Users Guide, Cranfield University." .