

Den energieffektiva butiken – ett helhetsgrepp på energi- användning, ekonomi och miljökonsekvenser

– Fas 2 – inomhusklimat, parasitförluster och värme-
återvinning

Jaime Arias
Åke Melinder
Per Lundqvist
Institutionen för Energiteknik
Kungl Tekniska Högskolan
Stockholm

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 projekt har finansierats av statens energimyndighet, COOP Sverige AB, ICA AB, AB Fortum Värme samägt med Stockholms stad, Asarums Industri AB, Hydro Chemical AB/Hydro Formates och Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut AB. Under 2004 har projektet också finansierats av Taijmin AB och DEM production AB.

Författarna vill tacka industrirepresentanterna Lennart Bjerkhög och Gösta Andersson, COOP Sverige AB, Carl-Olof Rydberg och Per-Erik Jansson, ICA AB, Bengt Uusitalo och Per Elfving, AB Fortum Värme samägt med Stockholms stad, Lennart Lundquist, Asarum Industri AB, Bengt Bredberg, Hydro Chemical AB/Hydro Formates, Per Fahlén och Monica Axell, Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut AB, Lars-Ove Grudeborn, Taijmin AB, Kjell Svensson, DEM production AB och controller Olivier Pelletier för deras arbete i projektet.

Jaime Arias, december 2004
jaime@energy.kth.se

Sammanfattning

I projektet ”den energieffektiva butiken – ett helhetsgrepp på energianvändning, ekonomi och miljökonsekvenser” samarbetar Institutionen för Energiteknik tillsammans med företagen COOP Sverige AB, ICA AB, AB Fortum Värme samägt med Stockholms stad, Asarums Industri AB, Hydro Chemical AB/Hydro Formates och Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut AB med finansiering från Energimyndigheten. Under 2004 har företagen Taijmin AB och DEM production AB också deltagit i projektet. Detta arbete är en fortsättning på projektet ”Den energieffektiva butiken i teori och praktik” som bedrevs under förra forskningsprogrammet Klimat 21. Syftet med projektet är att ta fram ett modellverktyg för datorsimulering av inomhusklimat för olika butiker där inverkan från diskar, belysning, personer, värmeåtervinning, komfortkyla och utomhusklimat ska simuleras.

Under projektet har Åke Melinder uppdaterat de termofysikaliska datavärden, ekvationer och korrelationer som genom publikationer av Svenska Kyltekniska Föreningen och IIR har blivit en standard för olika köldbärare.

I följande rapport presenteras resultat från programmet CyberMart och redovisas resultat från mätningar som har pågått under projektets gång i flera olika livsmedelsbutiker.

Summary

The project is a co-operation between The Department of Energy Technology, Division of Applied Thermodynamics and Refrigeration and the companies, COOP Sweden AB, ICA AB, AB Fortum Heat, Asarums Industry AB, Hydro Chemical AB and the Swedish National Testing and Research Institute financing by the Swedish Energy Agency. During 2004 the companies Taijmin AB and DEM production AB have participate in the project. This work is designated as a continuation of the project “the energy effective supermarket in theory and practice” that was conducted in order to clarify energy effective system solutions for supermarkets (see final report from Klimat 21). The main objective of the new project is to create a user-friendly simulation program with focus on supermarkets indoor climate where the influences from cabinets, lightings, occupants, equipments, HVAC system and outdoor climate are simulated.

During the project Åke Melinder has updated the thermophysical property values, equations and correlations that through the publications of the Swedish Refrigeration Society and IIR have become a standard for secondary fluids.

Some results from the simulation program and from measurements carried out in different supermarkets are presented in the report.

Innehåll

Bakgrund och motiv	5
Syfte och mål	6
Deltagande parter	8
Projektets genomförande och Resultat	9
Modell.....	10
Mätningar.....	11
Valideringar	14
År 2004	16
Köldbärare	17
Energi, miljö samt industriell relevans	18
Examina	20
Internationell samverkan	20
Slutsatser och diskussion	20
Spridning av resultat	21
Referenser	22
Bilaga 1	23
Building Model	23
Outdoor Climate	27
HVAC System	28
Referens	30

Bakgrund och motiv

Livsmedelsbranschen är sammantaget en mycket stor användare av energi. Historiskt sett låga energipriser i Sverige har som helhet lett till mindre effektiva lösningar än vad som idag är tekniskt möjligt. I många studier har en avsevärd potential i energieffektivisering i butiker kunnat visas. Det kan röra sig om effektivare kylmaskiner, värmeåtervinning, anpassning av belysning, nattäckning av diskar, bättre styrning, kondensorkylning med returvatten från fjärrkyla etc. En butiks livscykel blir allt snabbare, dvs. ombyggnader och ny profil införs i en allt snabbare takt. I samband med detta kan energieffektiviteten höjas. Fokus i detta projekt var därför på såväl ny- som ombyggnad.

Institutionen för Energiteknik, avd. för Tillämpad termodynamik och kylteknik, har under sex år bedrivit flera projekt med olika företag i kylbranschen genom två s.k. kollektivforskningsprogram, "Alternativa Köldmedier", med finansiering av NUTEK samt "Klimat21- Effektivare kylmaskiner och värmepumpar" med finansiering från Energimyndigheten. Samarbete med kylbranschen har skett med en mängd företag.

Under perioden 1998 – 2000 bedrevs ett projekt med samma titel som detta projekt för att klarlägga energieffektiva systemlösningar för livsmedelsbutiker (se slutrapporten från Klimat 21). Ett annat viktigt mål för detta tidigare projekt var att ta fram en väl fungerande simuleringsmodell för livsmedelsbutiker. Utöver detta har ett omfattande internationellt arbete genomförts inom ramen för International Energy Agency (IEA). Annex 26 är ett sk IEA-Annex vars syfte i stort sammanfaller med föreliggande projekt (www.ornl.gov/annex26/). Ett flertal aktiviteter har genomförts där en mycket uppskattad workshop arrangerades i Stockholm med co-sponsring från IIR (International Institute of Refrigeration). Ett relativt omfattande mätarbete har genomförts tillsammans med ICA och COOP.

Projektet "den energieffektiva butiken – ett helhetsgrepp på energianvändning, ekonomi och miljökonsekvenser" är en fortsättning på detta arbete. Vi har fortsatt mätaktiviteterna för att validera beräkningsmodellen men också för att utöka obesvarade frågeställningar. I dåvarande beräkningsmodell (se slutrapporten från Klimat 21) var det kyltekniska systemet i stort beskrivet. Kopplingen till butikens inomhusklimat behövdes dock förbättras.

Utvecklingen på köldbärarsidan behöver ses över, dels p.g.a. nya köldbärare på marknaden, dels nya tillämpningsområden. Med anledning av detta har vi gjort en särskild insats för att uppdatera de grunddata, ekvationer och samband som genom Kyltekniska Föreningens Handbok Nr 12 och motsvarande IIR publikation blivit något av en standard [1]. En sådan standard är särskilt intressant då beräkningar för många komponenter måste göras för köldbärare som de ej testats med. Dessa ekvationer har även blivit en internationell standardkomponent under namnet BrineProp för simuleringsprogrammet EES som distribueras av Universitet of Wisconsin.

Syfte och mål

Syftet med detta projekt är att öka möjligheterna att projektera och driva energieffektiva livsmedelsbutiker. Syftet är också att i rapporter, konferensartiklar och på andra sätt beskriva de systemlösningar som har förutsättningar att ge just detta.

Målet är att vid projekttidens slut ha en väl fungerande datormodell som är provad och utvärderad i ett flertal installationer i Sverige. Modellen skall ge en rättvisande bild av energianvändning, miljöeffekter och ekonomiska konsekvenser av energieffektiviseringsåtgärder i livsmedelsbutiker.

Effekten på CO₂-produktion och andra miljöfaktorer skall direkt synas i modellen tillsammans med energibesparing och förväntat ekonomiskt utfall. Metoder för bedömning av LCC (Life Cycle Cost) och miljöanalys enligt TEWI-metoden har integrerats i modellen.

Nytt för detta projekt (jämfört med förra forskningsprogrammet Klimat 21) är ett utökat fokus på interaktionen mellan inom- och utomhusklimat och systemets funktion.

Modellen skall kunna användas av de i projektet deltagande företagen för förprojektering men även för avancerad fjärrövervakning.

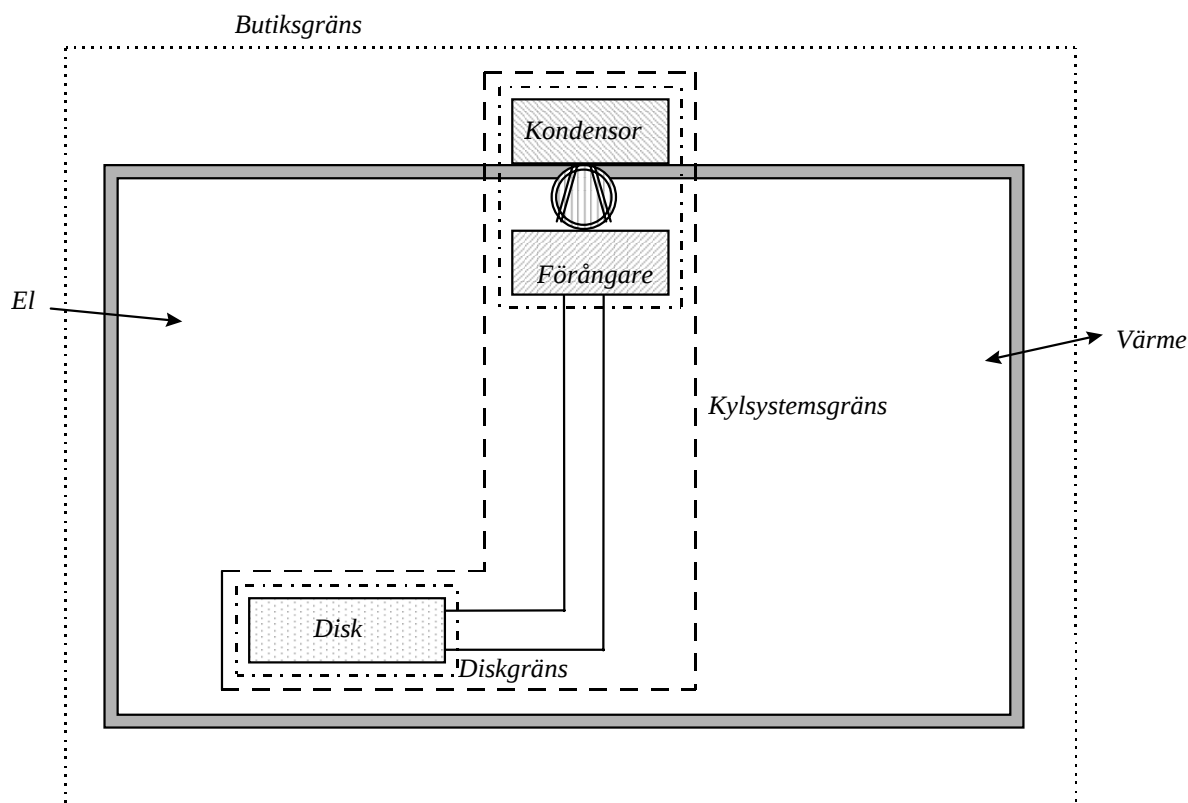
Eftersom forskningsprogrammet inriktar sig mot energieffektiva kyl- och värmepumpsystem skall naturligtvis i huvudsak sådana system modelleras i detalj. Vad som ingår i detta begrepp är dock relativt komplext. För att på ett rimligt sätt sätta in dessa kylsystem i ett större sammanhang måste därför de tekniska delsystemen för till exempel belysning, uppvärmning och ventilation beaktas. Ett tydligt exempel är värmeåtervinning av kondensorvärme.

Utöver de nämnda systemen måste byggnadens klimatskärm modelleras på ett tillfredsställande sätt. Till detta kommer belastning på kylmaskiner i form av belysning och verksamhet.

Syftet med modellen är att olika tekniska lösningar för kyla och värme skall kunna provas och jämföras.

Det är uppenbart att en modell som tar hänsyn till speciella fenomen på mikronivå omöjligt kan hanteras i en aggregerad dynamisk modell på butiksnivå (på årsbasis). Inte minst då inmatning av data blir orimligt tidsödande. Vi har haft förmånen att ta del av några sådana program inom ramen för det internationella arbetet inom IEA - Annex 26. Detta resonemang beskrivs relativt väl i slutrapporten för Klimat 21.

De praktiska projekt som utförs av de deltagande företagen har använts för validering av olika modeller. Det var därför viktigt att utvärdering skedde på olika nivåer i systemhierarkin. Exempel på sådan utvärdering kan vara mätningen på kylmaskinens prestanda, kyl och frysdiskar, mm.



Figur 1. Exempel på systemhierarki, mindre delmodeller bygger upp en större modell.

Projektet ingick även i det internationella forsknings- och informationsprojektet ANNEX 26, "Energy efficient supermarkets for the 21st century" inom IEA "Implementing agreement for heat pumping technologies".

Syfte och mål för projektet under 2004 var:

Instrumentering och igångkörning av en "mönsterbutik" som dimensionerades med stöd av CyberMart tillsammans med COOP. Här kommer bl.a. systemet med flytande kondensering och värmeåtervinning att provas. DEM AB kommer att särskilt utvärdera avfrostningssystem i samarbete med KTH och COOP.

Diskussion om vilka nya systemlösningar som i framtiden ska inkluderas i CyberMart. Här pågår redan en diskussion om isslurry som köldbärare tillsammans med ICA AB och Taijmin AB (svensk representant för Lennox).

Vidare uppdatering av köldbärardata för handbok samt provning av nytt salt för isslurry (Åke Melinder, Cecilia Hägg).

Läckage från olika systemtyper (Per Lundqvist och Jaime Arias). Ett examensarbete för att fastställa läckage för s.k. TEWI beräkningar pågår och värdefulla data kommer att implementeras i CyberMart samt användas i avhandlingsarbetet för att bättre bedöma inverkan av en övergång från direkta till indirekta system.

Deltagande parter

Forskare och industrirepresentant som arbetat i projektet:

KTH, Institutionen för Energiteknik, Avdelningen för Tillämpad Termodynamik och Kylteknik, Per Lundqvist (handledare), Jaime Arias (forskare), Åke Melinder (forskare)

Asarum Industri AB, Lennart Lundquist.

COOP Sverige AB, Lennart Bjerkhög, Gösta Andersson.

AB Fortum Värme samägt med Stockholms stad, Bengt Uusitalo, Per Elfving.

Hydro Chemical AB / Hydro Formates, Bengt Bredberg.

ICA AB, Carl-Olof Rydberg, Håkan Fredén, Per-Erik Jansson.

Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut AB, Per Fahlén, Monica Axell.

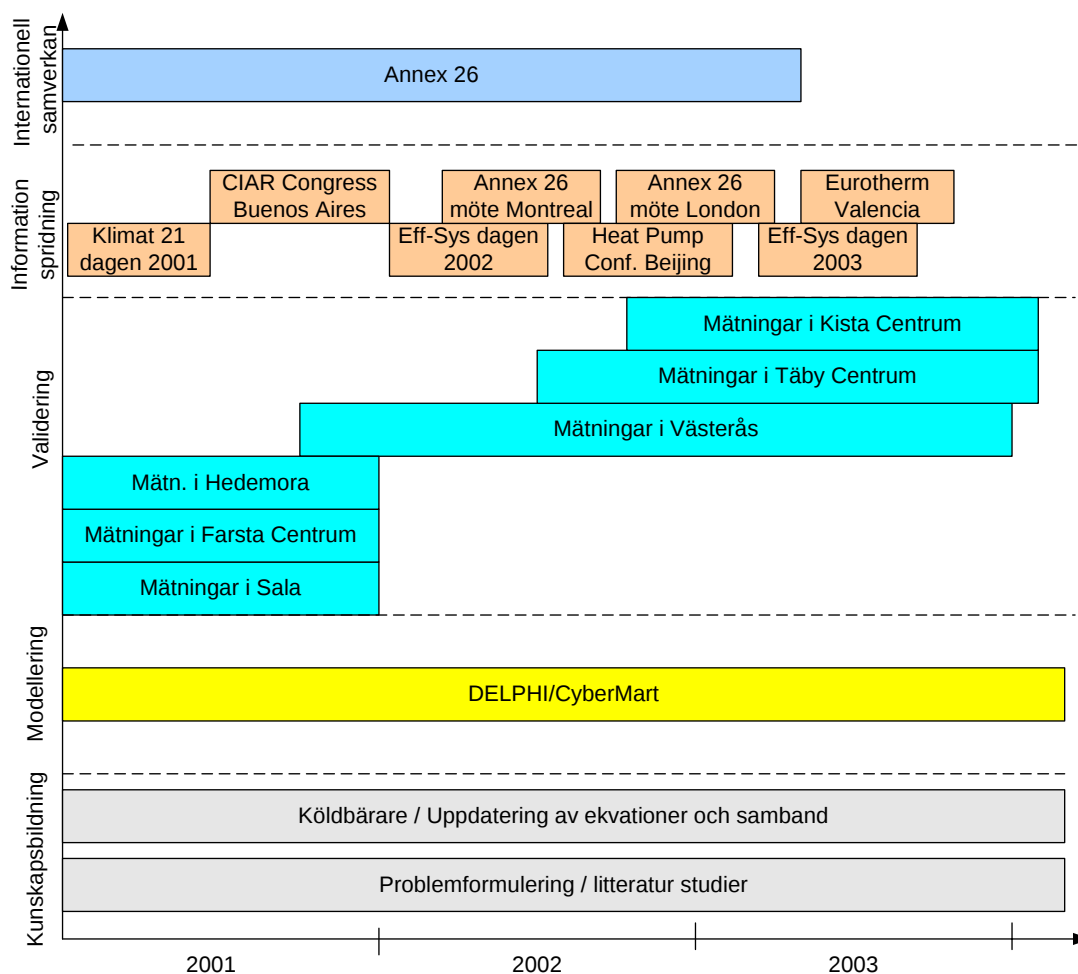
Under 2004:

DEM production AB, Kjell Svensson.

Taijmin AB, Lars-Ove Grudeborn.

Projektets genomförande och Resultat

Under perioden 2001 – 2004 har projektet utvecklats inom fem huvudområden där olika resultatet har kommit fram. Ett schema med de olika huvudmomenten i projektet visas i Figur 2.



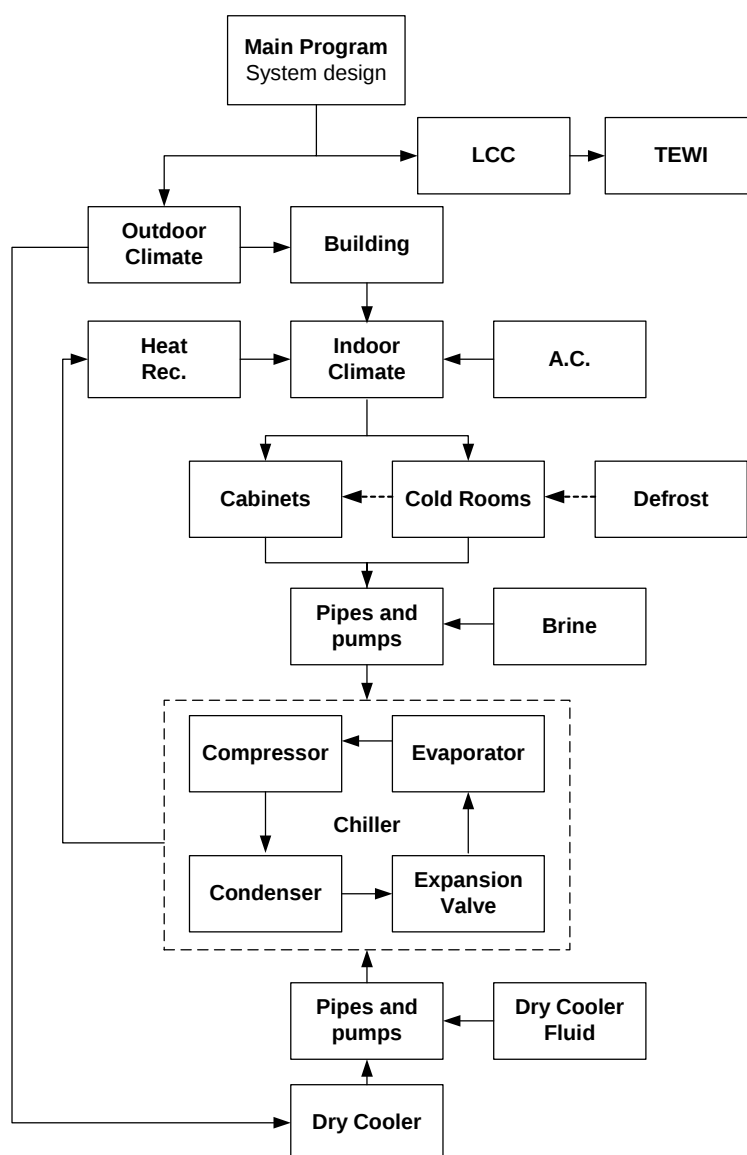
Figur 2. Schema med de olika huvudmomenten i projektet

Under förra forskningsprogrammet Klimat 21 bedrevs projektet "Den energieffektiva butiken i teori och praktik" för att klarlägga energieffektiva systemlösningar för livsmedelsbutiker. Huvudmålet med projektet var att ta fram en väl fungerande simuleringsmodell för livsmedelsbutiker där olika systemlösningar kunde jämföras. I modellen, med arbetsnamnet "CyberMart", simuleras kylsystemet i detalj med fokus på energianvändning, inverkan på miljön, genom TEWI beräkning, och LCC bedömning. I programvaran är det möjligt att simulera

de mest representativa kylsystemen för livsmedelsbutiker i Sverige. Direkt system, fullständigt indirekt system, delvis indirekt system, kaskadsystem, fjärrkyla som kyler kondensorerna och parallella system med underkylning från kylsida till fryssida är de systemlösningar som är grunden i datorhjälpmedlet för energioptimering av butiker.

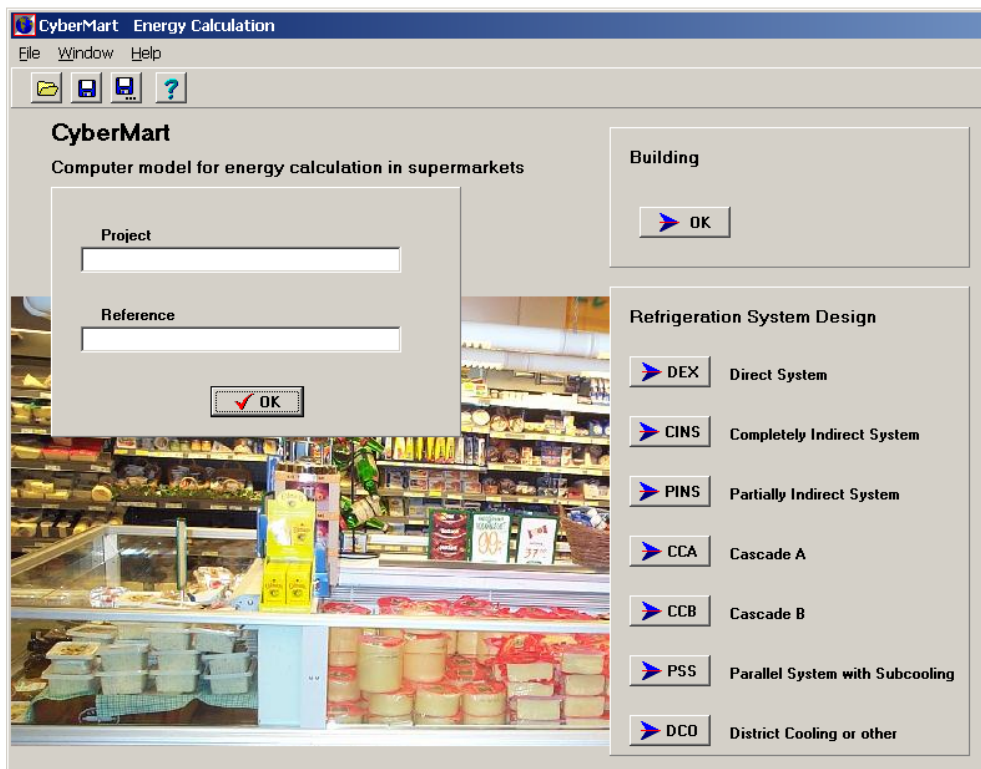
Modell

Programutvecklingen har fortsatt med att ta fram ett modellverktyg för datorsimulering av inomhusklimat för olika butiker där inverkan från diskar, belysning, personer, värmeåtervinning, komfortkyla och utomhusklimat simuleras. Modeller av utomhusklimat, byggnad och ventilationssystemet har sammankopplats med CyberMart och i Figur 3 presenteras ett diagram med de olika modulerna och deras samverkan i programmet.



Figur 3. Olika moduler i Cybermart.

Byggnadsmodellen är en anpassning från en modell utvecklad av Tor Helge Dokka som används i energiberäkningsprogram Energi i Byggnader (EiB) i Norge [2]. Modellen är baserad på tre olika värmebalanser för rumsluften, rummets ytor och strukturen. Förutsättningar i modellen är att internlast, luftmängder och temperaturer är konstanta under varje tidsperiod (en timme), att strålnings-tillskottet fördelas lika för alla ytor och att strukturtemperaturen för väggar, tak och golv är densamma. I modellen simuleras värmeströmmen mellan insida och utsida av byggnaden som en elektrisk modell med kapacitanser och motstånd som ger en första ordningens differentialekvation. International Standard ISO 13370 används för beräkningen av värmeförluster genom marken [3]. Utomhusklimat från 20 olika städer i Sverige har beräknats i software Meteonorm [4]. Mera information om VVS, byggnad och klimatmodeller finns i [bilaga 1](#). CyberMart är ett användarvänligt dataprogram med lättanvända fönster, få indata och pålitliga resultat. I Figur 4 visas CyberMarts gränssnitt.

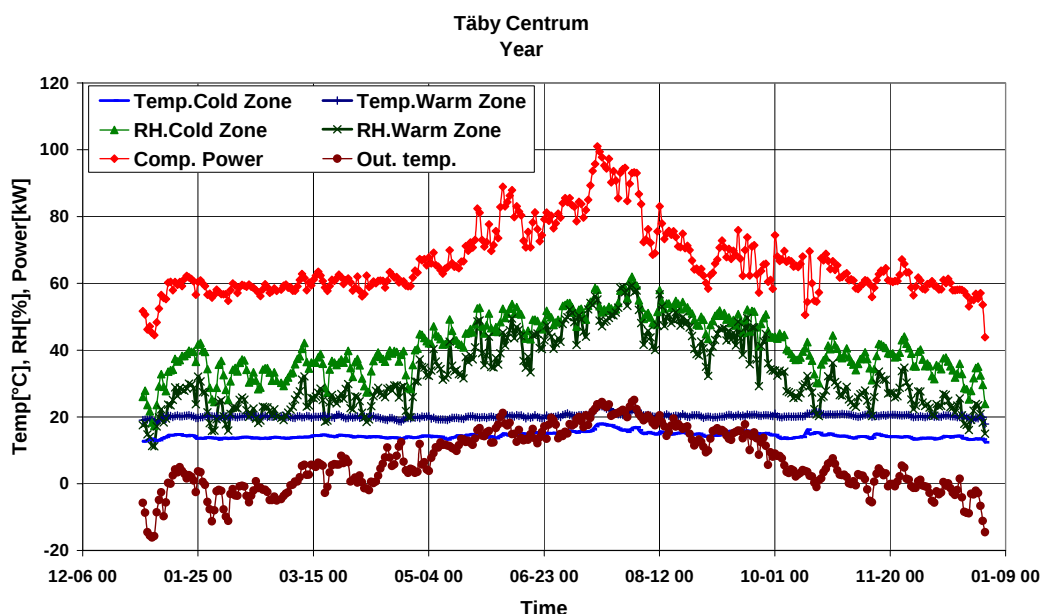


Figur 4. Gränssnittet av CyberMart

Mätningar

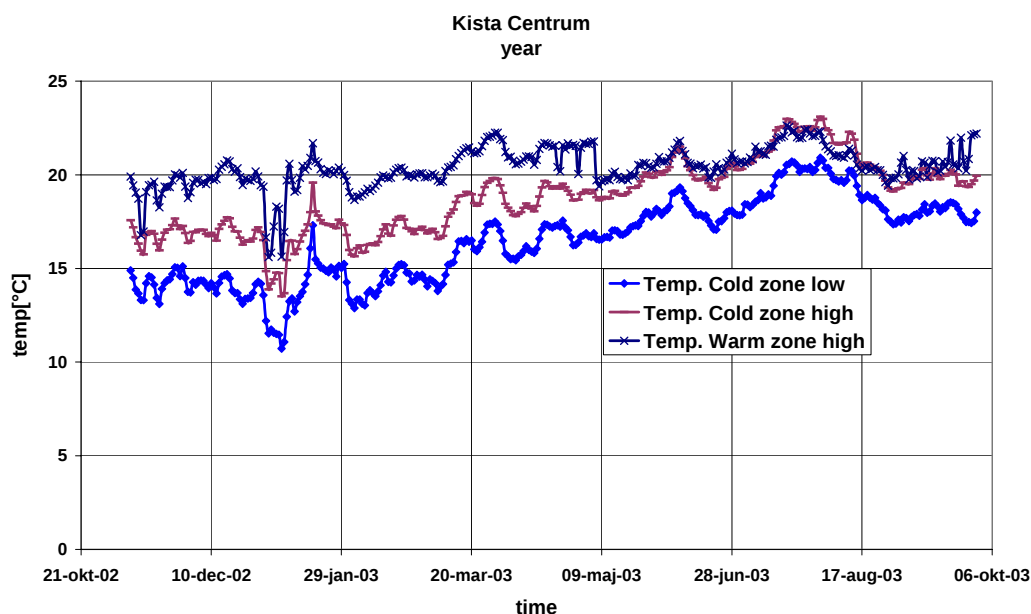
Validering av modellen har utförts med hjälp av fältmätningar genomförda i olika livsmedelsbutiker. Under projektets gång har det fortsatt med mätningar som startades under förra projektet i butikerna, COOP Konsum i Sala, COOP Konsum i Farsta Centrum och ICA Supermarket i Hedemora. ICA AB bidrog till projektet med mätningar som två studenter från Mälardalens Högskola genomförde i butiken ICA Grytan i Västerås och som var grunden till deras examensarbete[5].

År 2002 startades mätningar i två nya butiker COOP Konsum i Täby Centrum och COOP Konsum i Kista Centrum. Målet med dessa mätningar var att lite närmare studera inomhusklimatet och värmeåtervinningen.



Figur 5. Mätningar från Täby Centrum under ett år.

I butiken i Täby Centrum genomfördes mätningar av inomhustemperatur och luftens relativa fuktighet i två olika punkter. Första punkten ligger ungefär 0,4 m från golvet och 2 m från frysdiskar (cold zone), den andra punkten ligger ungefär 1,8 m från golvet och 7 m från diskarna (warm zone). I Figur 5 presenteras resultat från mätningar genomförda under ett år av inomhustemperatur och relativa fuktigheten i två punkter, kompressoreffekt och utomhustemperatur.

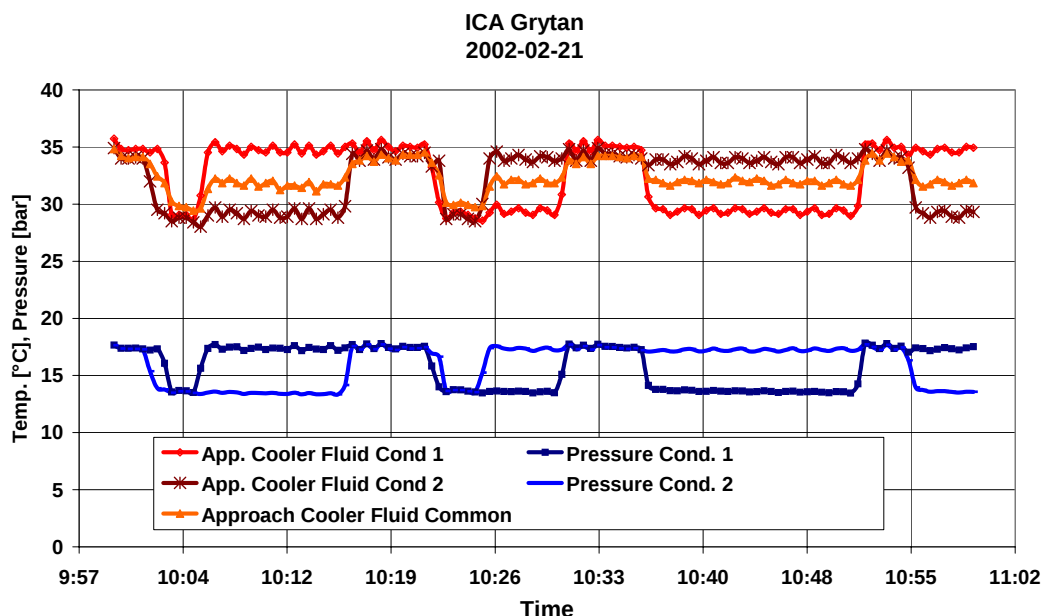


Figur 6 Temperatur i tre olika punkter i butiken Kista Centrum.

I Kista Centrum mättes inomhustemperaturen och luftens relativa fuktighet vid tre olika punkter i butiken. Första punkten ligger ungefär 0,4 m från golvet och 2 m från frysdiskar (cold zone low). Den andra punkten ligger ungefär 1,8 m från golvet och 2 m från frysdiskarna (cold zone high) och den sista punkten ligger ungefär 1,8 m från golvet och 7 m från diskarna (warm zone high). Resultat av inomhustemperaturer under ett år visas i Figur 6. Som det går att se i Figur 5 och Figur 6 är temperaturerna väldigt låga i de kalla zonerna med tanke på att hälften av frysdiskarna blåser ut kondensorvärmen direkt i butikerna för att undvika utkylningen från diskarna.

Mätningar från ICA Grytan i Västerås visar att vid låga utomhustemperaturer minskar kyleffektbehovet från kyldiskar, frysdiskar och kylrum på grund av de låga relativa fuktigheterna som förekommer i butikerna. Detta påverkar i sin tur kondensorvärmen och värmeåtervinningen. Kylsystemet i butiken ICA Grytan är av typ fullständigt indirekt system på kylsidan och av delvis indirekt system på fryssidan. Kylanläggningen består av två vätskekylaggregat med gemensam köldbärar- och kylmedelskretsar på kylsidan och tre parallellkopplade frysaggregat med gemensam kondensor på fryssidan. R404A är köldmediet på båda sidorna.

Under vintertid, när kyleffektsbehovet minskar på grund av de låga relativa fuktigheterna i butiken, minskar kondenseringsstemperaturerna till ungefär 38°C när kompressorerna är i drift. Detta påverkar kylmedelframledningstemperaturen som minskar till ungefär 35°C. I Figur 7 presenteras kylmedelframlednings-temperaturen från både vätskekylaggregat och den gemensamma kretsen samt det höga trycket från båda kompressorerna. Mätningarna genomfördes den 21 februari 2002.

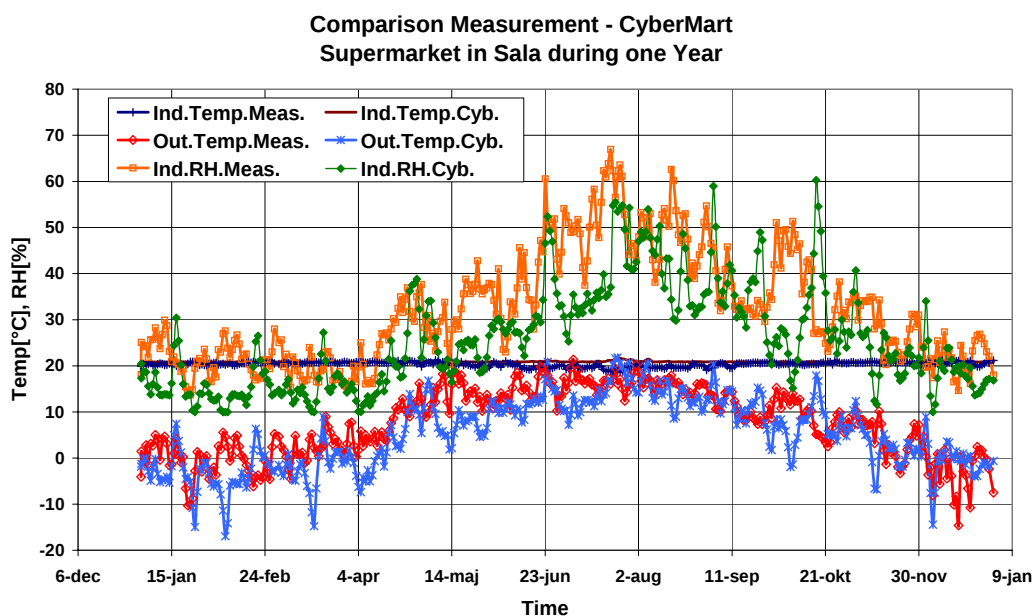


Figur 7. Kylmedelframledningstemperaturer och högt tryck från båda vätskekylaggregaten.

Figur 7 visar att när båda vätskekylaggregaten är i drift blir den gemensamma framledningstemperaturen ungefär 35°C och att när båda vätskekylaggregaten är avstängda blir den gemensamma framledningstemperaturen ungefär 29°C. När en av kompressorerna är avstängd, blir den gemensamma framledningstemperaturen ungefär 32°C och inte 35°C som den borde vara.

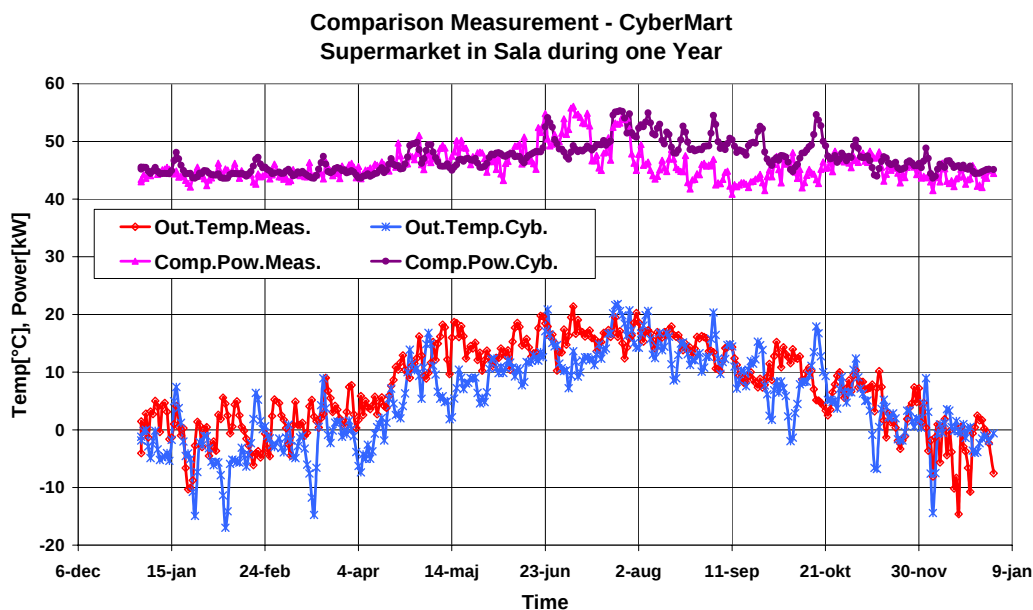
Valideringar

I Figur 8, 9 och 10 presenteras resultat från simuleringar och mätningar genomförda i butiken i Sala under ett år och under två dagar.



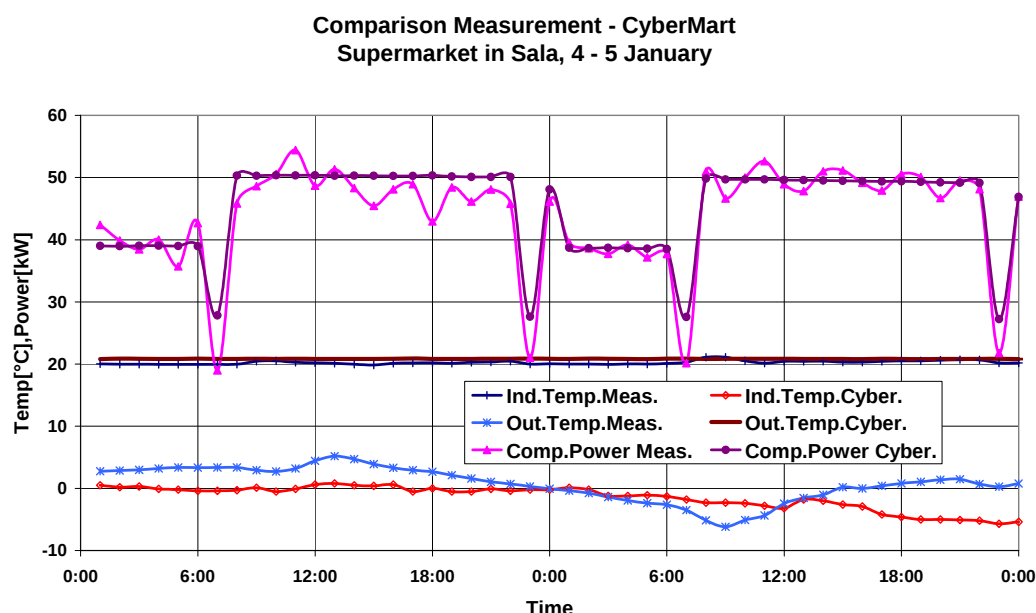
Figur 8. Jämförelse mellan mätningar och CyberMart under ett år.

De parametrar som jämförs i Figur 8 är utomhustemperaturen, inomhustemperaturen och luftens relativa fuktigheten inomhus under ett år.



Figur 9. Jämförelse mellan mätningar och CyberMart under ett år .

I Figur 9 visas resultat av utomhustemperatur och kompressoreffekt också under ett år. I Figur 10 redovisas resultat från utomhustemperatur, inomhustemperatur och kompressoreffekt under två dygn.



Figur 10. Jämförelse mellan mätningar och CyberMart under två dygn.

Skillnaden mellan mätningar och simuleringar på kompressoreffekt i Figur 9 och Figur 10 varierar mellan 0% till 20 %. Energiberäkningen visar en differens på ungefär 3 % mellan mätningar och simuleringar.

Den totala energiförbrukningen i Sala presenteras i Tabell 1. Mätningar av fjärrvärme och elförbrukning under år 1999 och 2000 kan jämföras med simuleringar från CyberMart. Resultat som presenteras i Figur 8, Figur 9 och Figur 10 samt Tabell 1 visar en bra överensstämmelse mellan mätningar och simuleringar.

Tabell 1. Resultat från mätningar och CyberMart av den totala energiförbrukningen i butiken i Sala.

	Supermarket in Sala		
	Energy consumption in [Mwh/year]		
	Measurements		CyberMart
	Year 1999	Year 2000	
Electricity	1179	1253	1150
District Heating	53	61	39

År 2004

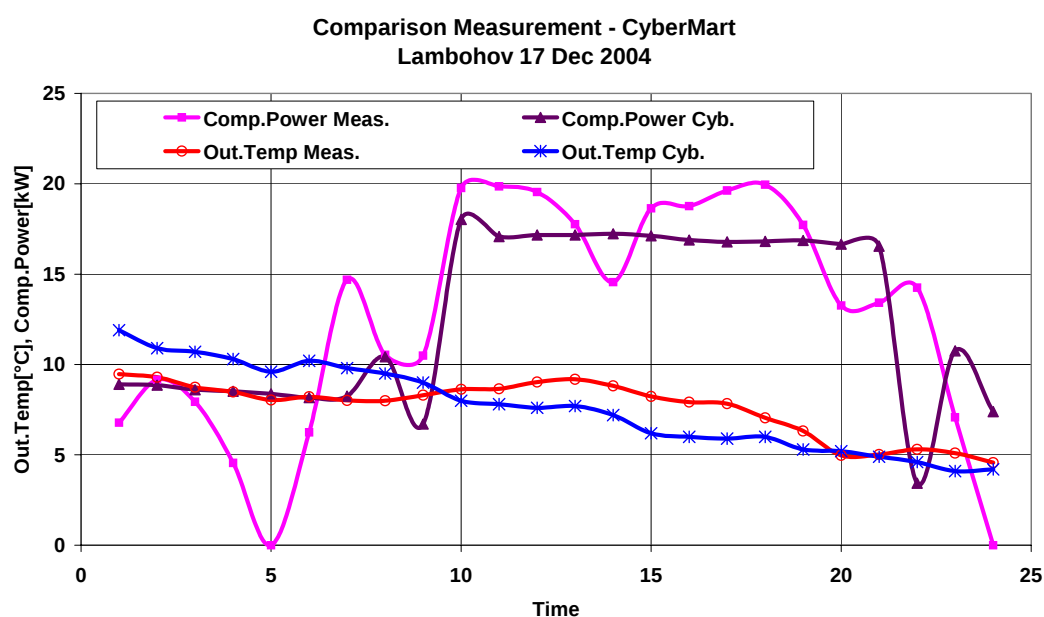
Under 2004 har en "mönsterbutik" byggts. Den dimensionerades med stöd av CyberMart tillsammans med COOP. Kylsystemet i butiken i Lambohov är av typ fullständigt indirekt system på kylsidan och av delvis indirekt system på fryssidan. Butiken använder både värmeåtervinning och flytande kondensering.

Simuleringar från CyberMart, som presenteras i Tabell 2, visar att den totala energiförbrukningen per år kommer att vara ungefär 20% lägre än ett traditionellt system utan värmeåtervinning eller flytande kondensering.

Tabell 2: Simuleringar av butiken i Lambohov

	UtanVÅVellerFK	VÅVochFK
Ventilation [MWh/år]	74	74
Belysning [MWh/år]	119	119
Utrustningar [MWh/år]	80	80
Uppvärmning [MWh/år]	81	0
Kylsystem [MWh/år]	336	262
Total Energiförbrukning [MWh/år]	719	564
Energikostnad [Kkr/år]	432	339

Butiken i Lambohov blev klar i slutet på november och mätutrustningar har installerats för att studera butikens energiförbrukning. I Figur 11 presenteras resultat från simuleringar och mätningar genomförda i butiken i Lambohov under ett dygn. För att utvärdera butikens energiförbrukning är det nödvändigt att genomföra mätningar under en lång period.



Figur 11: Jämförelse mellan mätningar och CyberMart under ett dygn i Lambohov.

Ett examensarbete för att fastställa läckage för s.k. TEWI beräkningar har genomförts av Karolin Engsten och Jenny Lindh på Institution för Energiteknik. Köldmedieläckage från 508 butiker (488 butiker från COOP och 20 butiker från ICA och VIVO i Stockholm) år 1996 och 403 butiker (371 butiker från COOP och 32 butiker från ICA och VIVO i Stockholm) år 2003 presenteras i Tabell 3.

Tabell 3: Köldmedieläckage från ungefär 450 butiker i Sverige mellan 1996-2003 (Engsten 2004).

År	COOP butiker	ICA - VIVO butiker	Antal Butiker	Köldmediemängd [Kg]	Läckage [Kg]	Läckage [%]	Mängd /Butik [kg]	Läckage /Butik [kg]
1996	488	20	508	65181	7934	12,2%	128,3	15,6
1997	496	28	524	65589	9278	14,1	125,2	17,7
1998	465	31	496	60556	7986	13,2	122,1	16,1
1999	452	36	488	57477	7215	12,6	117,8	14,8
2000	451	37	488	61479	7674	12,5	126,0	15,7
2001	417	39	456	55545	4784	8,6	121,8	10,5
2002	389	38	427	50404	4325	8,6	118,0	10,1
2003	371	32	403	47210	5288	11,2	117,2	13,1

Den totala köldmediemängden i de 508 butikerna år 1996 var ungefär 65 ton. Den totala köldmediemängden i de 403 butikerna år 2003 minskade till cirka 47 ton. Den totala köldmediemängden per butik minskade från ungefär 128 kg år 1996 till cirka 117 kg år 2003.

Köldmedieläckage, från de butiker som ingick i studien, minskade från 14,1% av den totala köldmediemängden år 1997 till 8,6% av den totala köldmediemängden år 2001. Anledningen till detta var ett nytt avtal mellan COOP och deras serviceföretag som gav ansvar för köldmediefyllning och förebyggande av köldmedieläckage till serviceföretagen. År 2003 ökade köldmedieläckaget till 11,2% av den totala köldmediemängden. Anledningen till detta är oklar [6].

Köldbärare

Under projektet har Åke Melinder arbetat med att uppdatera termofysikaliska data ekvationer och korrelationer som genom Svenska Kyltekniska Föreningens Handbok Nr 12: "Termofysikaliska egenskaper för köldbärarvätskor – Diagram och tabeller" och motsvarande IIR publikation blivit något av en standard för olika köldbärare vid indirekta system. Följande har utförts:

Tabellerna med data för de termofysikaliska grundegenskaperna har reviderats och utökats med värden för låga koncentrationer (som hjälp, t.ex. för "ice-slurry" tillämpningar). För glykoler har dessutom värden tillkommit för höga temperaturer, upp till 100°C (som hjälp t.ex. för solfångartillämpningar). Listan med typer av köldbärare som finns med har setts över och utökats något.

I kapitel 5 av den nya upplagan av publikationen kommer ekvationer för värmeöverföring och tryckfall att presenteras på ett enklare och mer heltäckande sätt som bl.a. bättre inbegriper övergångsområdet mellan laminär och turbulent strömning. En mer utförlig inledning görs om indirekta system med köldbärare, för- och nackdelar och en utförlig lista med symboler finns i början av handboken som förhoppningsvis kan bli klar detta år.

Energi, miljö samt industriell relevans

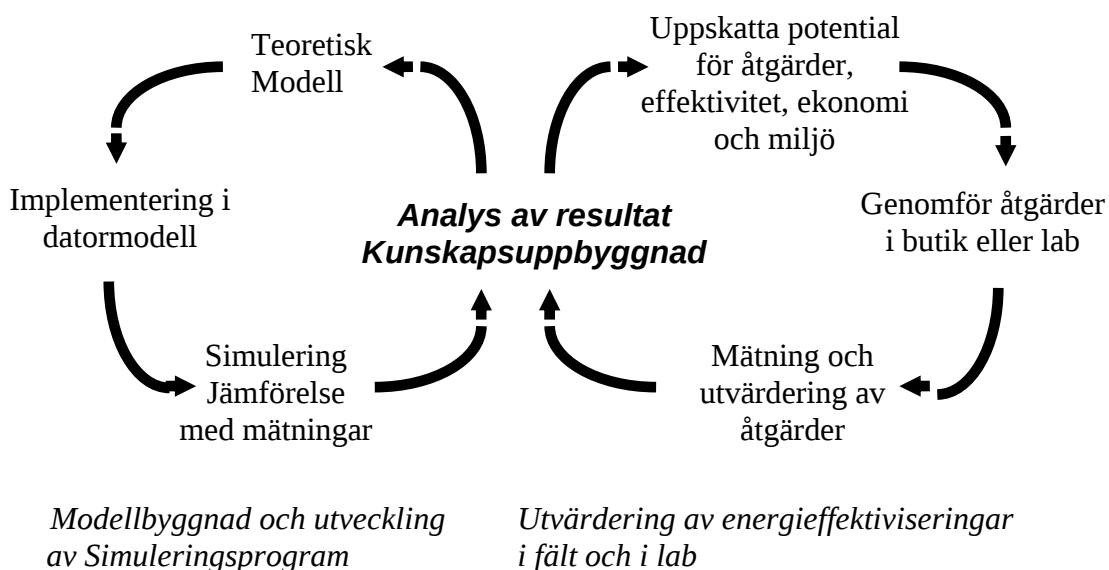
Det finns fem klara skäl till att genomföra detta projekt.

- Programvaran med arbetsnamnet "CyberMart" är nu funktionsduglig för ett stort antal olika butikskonfigurationer. Validering och anpassning till användarnas synpunkter skulle göras.
- Det andra mer allmänna skälet är att en avsevärd minskning av energianvändningen är möjlig inom livsmedelsbranschen. En minskad energianvändning är gynnsam för Sverige som helhet men också för branschen med sänkta kostnader på lång sikt. En realistisk programvara kan användas som stöd vid idriftstagnation och fjärrövervakning och ger en unik möjlighet att förutsäga olika driftsparametrar och på så sätt tidigt detektera felprojektering eller dålig funktion.
- Det tredje skälet är att de miljömässiga vinsterna med sänkt energianvändning knappast har minskat. De ekonomiska vinsterna kommer inte att bli mindre med stigande energipriser.
- Det fjärde skälet är kopplat till det sätt vi har genomfört studien på. För att få genomslag i branschen måste effekten av potentiella energieffektiviseringsåtgärder kunna visas innan beslut fattas för genomförande. Här är ett fungerande simuleringsprogram ett sätt att föra ut ny teknik och samtidigt motivera handlare och tillverkande företag inom branschen (kylmaskiner, diskar etc) till fortsatt teknisk utveckling.
- Det råder fortfarande stor osäkerhet ute i branschen om hur indirekta system skall utformas för att vara energieffektiva. Stora parasitförluster, dålig isolering och onödiga temperaturdifferenser kan ge upphov till låg verkningsgrad. Projektet har bidragit delvis till besvarandet av denna fråga. För detta ändamål vill vi särskilt trycka på vikten av goda data och användbara ekvationer och samband för olika typer av köldbärare. Detta projekt, den energieffektiva butiken har som redan nämnts genom Åke Melinders försorg bidragit till att uppdatera högkvalitativa handböcker på detta område.

Det som är karakteristiskt för energioptimeringar är att ett flertal olika åtgärder är möjliga för en och samma butik. Varje åtgärd kan sägas ge en viss besparing var för sig och resultaten aggregeras ofta. Detta är naturligtvis fel - *systemsynen* saknas! Detta är den filosofi som ligger bakom utvecklingen av simuleringsprogrammet inom detta projekt.

Komplexiteten kan belysas med följande konkreta frågeställning. Skall inomhustemperaturen och luftfuktigheten i butiken kontrolleras sommartid, t.ex. genom inkoppling till fjärrkyla, eller skall kylmöbler och kylanläggning utformas så att detta inte behövs? Lägre inomhustemperatur och fuktighet ger lägre belastning på kylmöblerna, avfrostningsbehovet och den erforderliga kyleffekten minskar.

Det är viktigt att de olika delmodellerna är rimligt korrekta för att förbättringar i t.ex. energieffektivitet för en kyldisk skall kunna slå igenom. Det är dock lika viktigt att fortlöpande validera resultaten av beräkningarna mot verkliga butiker, gärna butiker där olika åtgärder genomförs. Vi vill därför även i fortsättningen betona vikten av fält- och laboratoriestudier av olika potentiella åtgärder kopplat till en systematisk uppbyggnad av en simuleringsmodell.



Figuren ovan användes i del 1 av detta projekt för att illustrera arbetsgången. Genom att kontinuerligt samla erfarenheterna från fält och laboratorium i simuleringsprogrammet kan kunskapsnivån *successivt* höjas. Nya potentiella åtgärder kan på samma sätt "upptäckas" genom arbete med simuleringsprogrammet. Man skulle kunna säga att de två *looparna* i figuren **stöder** och **driver** varandra.

Examina

Projektet kommer att resultera i en doktorsexamen under år 2005.

Internationell samverkan

År 2003 slutade Annex 26 "Advanced Supermarket refrigeration/Heat Recovery Systems" inom ramen för IEA (International Energy Agency). Annex 26 var ett internationellt samarbetsprojekt som hade som mål att minska både energianvändning och köldmediemängden i livsmedelsbutiker. Fem olika länder, USA (operating agent), Kanada, Storbritannien, Danmark (from hösten 2000) och Sverige, deltog aktivt i Annex26. Sverige representerades av ett "National Team" som bestod av KTH (lokal "operating agent"), SP., COOP, ICA, Carrier, York, Wica. Aktiviteterna var en relativt stor del av arbetet i projektet. Slutrapporten från IEA Annex 26 finns att köpa på <http://www.heatpumpcentre.org/>.

Slutsatser och diskussion

Ett av projektets mål var att ta fram kunskap om hur energieffektiva systemlösningar kan utformas i en livsmedelsbutik. Vi anser att detta väl uppfyllts. De deltagande i projektet har fått en fungerande datormodell som på ett rimligt sätt ger en rättvisande bild av energianvändning, miljöeffekter och ekonomiska konsekvenser av energieffektiviserings-åtgärder i livsmedelsbutiker.

Mätningarna har också visat behovet att följa utvecklingen av de nya systemlösningar som installeras idag i Sverige. I varje ny butik bör energiförbrukning för varje komponent kontrolleras under en period efter byggnad eller ombyggnad. Felaktiga börvärden för kondenseringstemperatur, förångningstemperatur, fel montering av isolering, problem med fläktar, pumpar eller kompressorer, felaktig konstruktion av värmeåtervinningssystem mm. kan orsaka mycket hög energiförbrukning i en butik utan att butiksägare eller projektörer får kännedom om detta.

Sammanfattningsvis anser vi att projektet är ytterst relevant för programmet Effektivare kyl- och värmepumpssystem – "eff-Sys".

Spridning av resultat

Nedan följer en lista på publikationer:

1. Arias J., Lundqvist P.
"Comparison of Recent Refrigeration systems in supermarkets"
VI Iberoamerican Congress of Air Conditioning and Refrigeration, Buenos Aires, Aug. 2001.
2. Arias J., Lundqvist P.
"Den Energieffektiva butiken "
1:a eff-sys-dagen, Stockholm, Jan. 2002.
3. Arias J., Lundqvist P.
"Energy Efficient Solutions for supermarket in theory and practice"
3rd Working meeting of Annex 26, Montreal, Mar. 2002.
4. Arias J., Lundqvist P.
"Heat Recovery in recent refrigeration systems in supermarkets"
7th Energy Agency Conference on Heat Pumping Technology, Beijing, Apr. 2002
5. Arias J., Lundqvist P.
"Energy Efficient Solutions for supermarket in theory and practice"
4th Working meeting of Annex 26, London, Nov. 2002.
6. Arias J., Lundqvist P.
"Den Energieffektiva butiken "
2:a eff-sys-dagen, Göteborg, Jan. 2003.
7. Arias J., Lundqvist P.
Final Report Annex 26 "Advanced Supermarket refrigeration/Heat Recovery Systems".
8. Arias J., Lundqvist P.
"A computer model that compare different refrigeration systems in supermarkets"
Eurotherm Seminar No72, Valencia, Mar. 2003.

Referenser

1. Melinder Åke, 1997, *Termofysikaliska egenskaper för köldbärarvätskor Diagram och tabeller*, Handbok Nr.12, (engelsk/svensk), Svenska Kyltekniska Föreningen, Stockholm
2. Dokka, T., 2001, *Manual of Software SCIAQ Professional*, (www.programbyggerne.no).
3. International Standard ISO 13370, 1998, *Thermal Performance of Building – Heat Transfer via the Ground – Calculation Method*.
4. Remund J., 2003, *Software METEONORM*, (www.meteotest.ch/en/mn_home).
5. Skarbö N., Zanghnaeh J., 2002, *Utvärdering av butikskyla och värmeåtervinning på ICA Grytan*, Examensarbete vid Mälardalens Högskola.
6. Engsten K., Lindh J., 2004, *Refrigerant Management: The issue of minimizing Refrigerant Emissions*, Examensarbete vid Institution för Energiteknik, KTH.

Bilaga 1

Building Model

The model that calculates the heating and cooling loads is an adaptation of a model from Tor Helge Dokka [1]. The model is based on the heat balances of room air, room surfaces and building structure. The model assumes that the variation of room temperature is negligible, that the temperature of the surfaces are the same, and that thermal loads as outdoor temperature, solar radiation and internal gains are constant during each time step (1 hour). The walls, floor and roof are modelled as equivalent RC- circuit elements where the internal heat capacity of the construction is concentrated in the middle of an accumulating layer in the internal part of the construction in contact with the room air.

The room air heat balance is the heat gains minus heat losses from the air room that means:

$$Q_{con} - H_{ven} \cdot (T_{sup} - T_{room}) - H_{winf} \cdot (T_{room} - T_{out}) - H_{conv} \cdot (T_{room} - T_{surf}) - Q_{ground} = 0 \quad (1)$$

Where T_{room} is the supermarket temperature, T_{sup} is the supplied temperature of the ventilation system, T_{surf} is the surface temperature and T_{out} is the outdoor temperature.

Q_{con} is defined as the convective part of the heat gains from persons, equipments, lightings, cabinets and solar gains in the supermarkets

$$Q_{con} = Q_{solcon} + Q_{percon} + Q_{eqcon} + Q_{lightcon} - Q_{cabconv} \quad (2)$$

H_{ven} is defined as the product of the mass flow of ventilation system and the specific heat of air

$$H_{ven} = \rho_{air} \cdot c_{pair} \cdot V_{ven} \quad (3)$$

H_{winf} is defined as the specific losses for windows and infiltrations

$$H_{winf} = H_{win} + H_{inf} \quad (4)$$

Where H_{win} is the product of heat transfer coefficient and area of the windows.

$$H_{win} = \sum (U_{win} \cdot A_{win}) \quad (5)$$

And H_{inf} is the product of the mass flow of infiltration and the specific heat of air

$$H_{inf} = \rho_{air} \cdot c_{pair} \cdot V_{inf} \quad (6)$$

The specific loss of convection between the air and the surfaces is defined as the product of the heat transfer coefficient of convection and the area of the surfaces

$$H_{con} = \sum(h_{conv} \cdot A) \quad (7)$$

The International Standard ISO 13370 is used to calculate the heat losses to the ground Q_{ground} [2].

The room surfaces heat balance is defined as the heat gains minus the heat losses from the room surfaces.

$$Q_{rad} - H_a \cdot (T_{surf} - T_{ac}) + H_{con} \cdot (T_{room} - T_{surf}) = 0 \quad (8)$$

Where T_{ac} is the accumulating layer temperature and Q_{rad} is defined as the radiative part of the heat gains from persons, equipments, lightings, cabinets and solar gains in the supermarket.

H_a is specific loss of the accumulating layer that it is defined as the heat transfer coefficient of the accumulating layer and the surface area.

$$H_a = \sum(U_a \cdot A) \quad (9)$$

The heat balance of the building structure is defined as the heat gains to the structure minus the accumulated heat in the structure minus the heat losses from the structure.

$$H_a \cdot (T_{surf} - T_{ac}) - H_{out} \cdot (T_{ac} - T_{out}) = C_a \cdot \frac{dT_{ac}}{dt} \quad (10)$$

H_{out} is specific loss from the accumulating layer to the outside. It is defined as the product of the heat transfer coefficient from the accumulating layer to the outside U_{out} and the surface area.

$$H_{out} = \sum(U_{out} \cdot A) \quad (11)$$

C_a is the total heat capacity of the building that it is defined as the products of the specific heat capacity, restricted to the accumulating layer of the construction and the area of walls, roof and floor.

$$C_a = \sum(C'_a \cdot A) \quad (12)$$

C'_a is the product of the specific heat, c_p , density, ρ , and the thickness of the accumulating layer, d_A .

$$C'_a = c_p \cdot \rho \cdot d_A \quad (13)$$

The thickness of the accumulating layer d_A is shown in figure 2 and it is estimated from an analytical solution of the general equation of heat conduction [2].

$$d_A = \sqrt{\frac{k \cdot T}{\rho \cdot c_p \cdot 2 \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{\alpha}{\omega}} \quad (14)$$

Where k is the thermal conductivity and α is the thermal diffusivity of the material, ω is the frequency and T is the oscillation period that is equal to 24 hours.

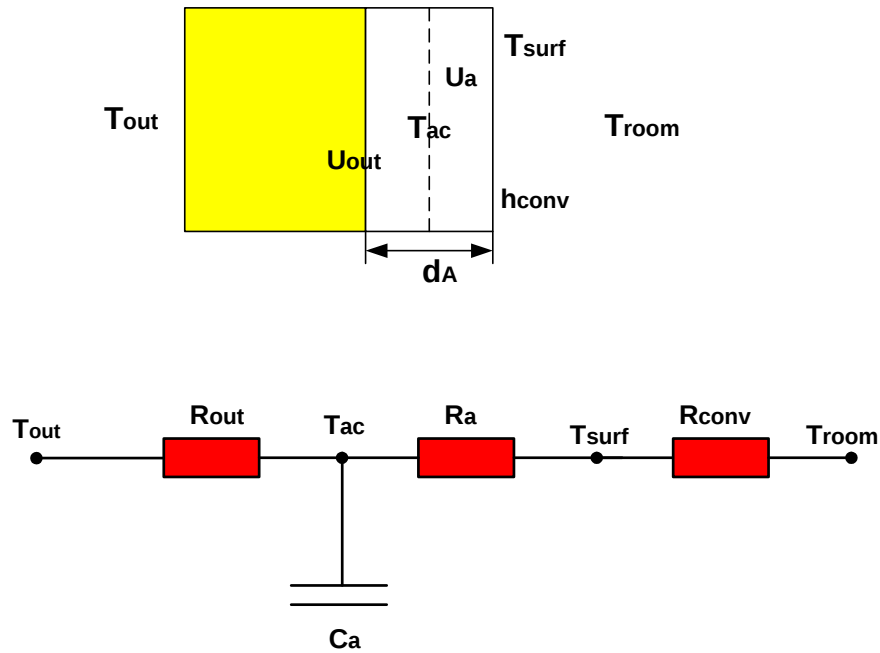


Figure 2: Thickness of the accumulating layer of a wall.

From equation (1):

$$T_{room} = \frac{Q_{air} + H_{con} \cdot T_{surf}}{H_{air}} \quad (15)$$

Where

$$Q_{air} = Q_{con} + H_{ven} \cdot T_{sup} + H_{winf} \cdot T_{out} - Q_{ground} \quad (16)$$

$$H_{air} = H_{winf} + H_{con} + H_{ven} \quad (17)$$

From equation (8):

$$T_{surf} = \frac{Q_{rad} + H_{con} \cdot \frac{Q_{air}}{H_{air}} + H_a \cdot T_{ac}}{H_s} \quad (18)$$

Where

$$H_s = H_{con} + H_a - \frac{H_{con}^2}{H_{air}} \quad (19)$$

Substituting equations (15) and (18) in equation (10)

$$\frac{\frac{H_a}{H_s} \cdot \left(Q_{rad} + \frac{H_{con}}{H_{air}} \cdot Q_{air} \right) + H_{out} \cdot T_{out}}{C_a} - \frac{\left(H_a + H_{out} - \frac{H_a^2}{H_s} \right)}{C_a} \cdot T_{ac} = \frac{dT_{ac}}{dt} \quad (20)$$

From equation (20)

$$\frac{dT_{ac}}{dt} = \frac{T_{\infty}}{\tau} - \frac{T_{ac}}{\tau} \quad (21)$$

Where the stationary temperature of the structure T_{∞} is defined as:

$$T_{\infty} = \frac{Q_{ac}}{H_{ac}} \quad (22)$$

And

$$Q_{ac} = \frac{H_a}{H_s} \cdot \left(Q_{rad} + \frac{H_{con}}{H_{air}} \cdot Q_{air} \right) + H_{out} \cdot T_{out} \quad (23)$$

$$H_{ac} = H_a + H_{out} - \frac{H_a^2}{H_s} \quad (24)$$

The time constant τ is defined as

$$\tau = \frac{C_a}{H_{ac}} \quad (25)$$

The solution of the differential equation (21) is

$$T_{ac}(t) = T_{\infty} + (T_{ac}(t) - T_{\infty}) \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (26)$$

Outdoor Climate

The outdoor climate data used in CyberMart has been obtained from the software METEONORM [3] that supplies climate data at any location in the world as hourly values. The parameters: air temperature, relative humidity, wind speed, beam and diffuse radiation on horizontal surface, height of sun, solar azimuth and cloud cover fraction, have been simulated in METEONORM for each locality in CyberMart.

The effects of convection and solar radiation on the external surfaces have been combined into an equivalent temperature that is defined as:

$$T_{eq} = T_{out} + \frac{(I_{sol} \cdot \alpha_{sol} + (T_{sky} - T_{out}) \cdot \alpha_r)}{\alpha_e} \quad (27)$$

Where T_{out} is the outdoor temperature, T_{sky} is the sky temperature, α_{sol} is the absorptivity for solar radiation, α_r is the radiative heat transfer coefficient and α_e is the effective heat transfer coefficient that is the sum of the radiative and convective heat transfer coefficients.

The total solar irradiation I_{sol} of a surface is calculated as the sum of the direct irradiation plus, $I_{DN}\cos(\theta)$, the diffuse irradiation $I_{d\theta}$ plus the reflected solar irradiation I_r .

$$I_{sol} = I_{DN} \cdot \cos(\theta) + I_{d\theta} + I_r \quad (28)$$

The angle of incident θ between the normal to the different surfaces and the direct solar beam is given by:

$$\cos(\theta) = \cos(\beta) \cdot \cos(\gamma) \quad \text{for vertical surfaces and} \quad (29)$$

$$\cos(\theta) = \sin(\beta) \quad \text{for horizontal surface} \quad (30)$$

Where β is the solar altitude and γ is the surface-solar azimuth. The surface-solar azimuth is defined as the difference between the solar azimuth and the surface azimuth.

The radiative heat transfer coefficient is given by:

$$\alpha_r = 4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot \left((T_{sky} + T_{out}) / 2 \right)^3 \quad (31)$$

Where ε is the emissivity of material and σ is the Stefan-Boltzman constant.

The convective heat transfer coefficient is given by:

$$\alpha_c = 5 + 4.5 \cdot u - 0.14 \cdot u^2 \quad (32)$$

Where u is the wind speed.

HVAC System

The different components of the ventilation system, simulated in CyberMart, are shown in figure 1. These components are: a rotary heat exchanger, a bypass for re-circulation of the return air, a coil for air cooling and two coils for air heating, one for heat recovery from the condenser and the other for auxiliary heating.

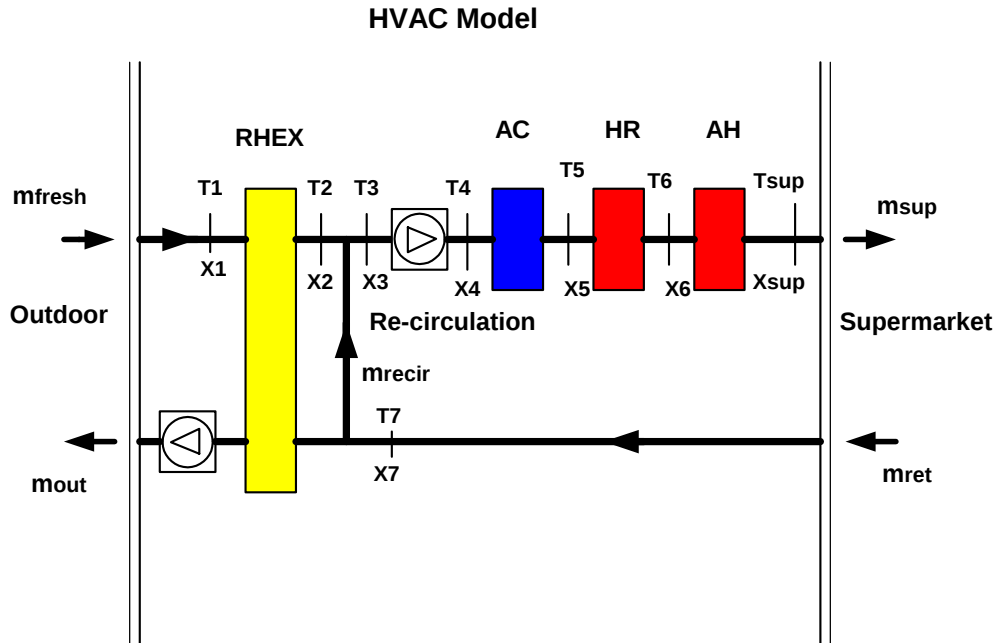


Figure 1: The model of ventilation system in Cybermart.

The temperature and humidity ratio are calculated after each components and the conditions of the air supplied are dependent on the outdoor conditions and indoor requirements. The mass flow of fresh air is dependent on the concentration of carbon dioxide in the supermarket. The supplied and the return mass flows have been assumed equivalent.

The humidity ratio and the concentration of carbon dioxide in the room have been calculated from a mass balance in the room [1]. For humidity ratio, X:

$$\dot{m}_{sup} \cdot (X_{sup} - X_{room}) - \dot{m}_{inf} \cdot (X_{room} - X_{out}) + g = V \cdot \frac{dX_{room}}{dt} \quad (33)$$

Where g is the generation of water vapour from people and equipments and dX_{room}/dt is the accumulation of humidity ratio in the supermarket.

And for the concentration of carbon dioxide, C:

$$\dot{m}_{sup} \cdot (C_{sup} - C_{room}) - \dot{m}_{inf} \cdot (C_{room} - C_{out}) + g = V \cdot \frac{dC_{room}}{dt} \quad (34)$$

Where g is the generation of carbon dioxide from people in and dC_{room}/dt is the accumulation of carbon dioxide in the supermarket.

The conditions of the air after the rotary heat exchanger are dependent on the temperature efficiency of the heat exchanger.

The temperature and the humidity ratio of the air after the rotary heat exchanger are calculated as:

$$T_2 = T_1 + \eta_{\text{RHEX}} \cdot (T_7 - T_1) \quad (35)$$

$$X_2 = X_1 + \eta_{\text{RHEX}} \cdot (X_7 - X_1) \quad (36)$$

Where the η_{RHEX} is the temperature efficiency of the rotary heat exchanger and T_1 , T_2 , T_7 , X_1 , X_2 and X_7 are temperatures and humidity ratios before and after the rotating heat exchanger according to figure 1.

The mass flows of the re-circulation and fresh air are determined from the mass concentration of carbon dioxide in the supermarket. The limit of the concentration of CO_2 in the supermarket is 800 ppm. The conditions of the air, after the re-circulation point, are calculated from a heat balance in the mix point.

$$\dot{m}_{\text{sup}} \cdot h_3 = \dot{m}_{\text{fresh}} \cdot h_2 + \dot{m}_{\text{recir}} \cdot h_7 \quad (37)$$

$$\dot{m}_{\text{sup}} \cdot X_3 = \dot{m}_{\text{fresh}} \cdot X_2 + \dot{m}_{\text{recir}} \cdot X_7 \quad (38)$$

Where $\dot{m}_{\text{sup}}$, $\dot{m}_{\text{fresh}}$, $\dot{m}_{\text{recir}}$ are the mass flow of supplied, return and fresh air and h_2 , h_3 , h_7 , X_2 , X_3 and X_7 are enthalpies and humidity ratios before and after the mix point according to figure 1.

The influence of the fan on the air temperature, after the mix point, have been calculated from:

$$\dot{Q}_{\text{fan}} = \dot{m}_{\text{sup}} \cdot c p_{\text{air}} \cdot \Delta T = \dot{m}_{\text{sup}} \cdot c p_{\text{air}} \cdot (T_4 - T_3) \quad (39)$$

and $X_4 = X_3$

Where the increase of temperature over the fan, ΔT , have been assumed equal to 1°C , and T_3 , T_4 , X_3 and X_4 are temperatures and humidity ratios before and after the fan.

The temperature and humidity ratio of the air after the cooling coil, T_5 and X_5 , are calculated according to the cooling requirement of the supermarket, the temperature of the coil and the maximum cooling coil capacity given by the user in the program. The cooling load of the air condition system consists on two parts:

a sensible and a latent part. When the air dew point temperature before the cooling coil is lower than the coil temperature then the cooling load of the air condition system is defined as

$$\dot{Q}_{coolingload} = \dot{m}_{sup} \cdot (cp_{air} \cdot (T_5 - T_4) + r_0 \cdot (X_5 - X_4)) \quad (40)$$

Where r_0 is the heat of evaporation for water at 0°C, $\dot{m}_{sup} \cdot cp_{air} \cdot (T_5 - T_4)$ is the sensible part and $\dot{m}_{sup} \cdot r_0 \cdot (X_5 - X_4)$ is the latent part of the cooling load.

When the air dew point temperature before the cooling coil is equal to the coil temperature, then the cooling load is dependent only on the sensible part.

$$\dot{Q}_{coolingload} = \dot{m}_{sup} \cdot cp_{air} \cdot (T_5 - T_4) \quad (41)$$

and $X_5 = X_4$

The temperature of the air T_6 , after the heating coils, is calculated according to the heating requirement of the supermarket. The heating load of the air condition system is calculated as

$$\dot{Q}_{heatingload} = \dot{m}_{sup} \cdot cp_{air} \cdot (T_6 - T_5) \quad (42)$$

and $X_6 = X_5$

Referens

- 1 Dokka, T., 2001, *Manual of Software SCIAQ Professional*, (www.programbyggerne.no).
- 2 International Standard ISO 13370, 1998, *Thermal Performance of Building – Heat Transfer via the Ground – Calculation Method*.
- 3 Remund J., 2003, *Software METEONORM*, (www.meteotest.ch/en/mn_home).