

Dörrar på öppna kyldiskar och anpassning av kylsystem i butik

Uppgiften inom det här BeLivs-projektet är att demonstrera hur energianvändningen i en befintlig livsmedelsbutik kan minskas genom att sätta dörrar på befintliga kyldiskar. Butiken som ingår i demonstrationen har mätts upp noggrant både före och efter vidtagna åtgärder för att få verklig fakta kring hur mycket energi som faktiskt har sparats. Den ursprungliga uppskattningen om en minskning av energibehovet med cirka 30% skulle visa sig överträffas i verkligheten.

■ I den befintliga livsmedelsbutiken ICA City Sparköp i Knalleland, Borås har mejeriavdelningen byggts om för att minska energianvändningen och samtidigt se om försäljningen av livsmedel påverkades under och av ombyggnationen. Kylbehovet har i varje ombyggd disk ansetts kunna minska med 30% om året. Vid hög belastning, som främst sker sommardag till följd av ökande fukt-mängd i butiksluften, blir energivinsten större.

Projektet syftar till att inom området integrera väl känd kunskap för att skapa nya innovativa och energieffektiva systemlösningar under kontrollerade förhållanden. För att kunna nyttja hela energiminimieringspotentialen fullt ut, när dörrar installeras på öppna kyldiskar, ska kylaggregaten anpassas till den nya situationen. Den skillnad som ska visas upp är använd elenergi för samma typ av matvaror, före och efter att dörrar installerats. Målet är att ge ett underlag till en beställningsmanual med rekommendationer för vad man bör tänka på när dörrar installerats på öppna diskar i en befintlig butik. Dessutom planeras en installation av värmepump som använder kondensorvärmes från kylsystemet som värmekälla. Värmepumpen kommer producera värme för lokaluppvärmning och varmvatten till butiken. Mer om den kommer i en separat rapport.

Energieffektiviseringspotentialen har beräknats. Kylbehov före och efter att dörrar installerats har skattats till en minskning på 30%. Därtill tillkommer ändringar i elenergi för att driva kompressorer, pumpar och kylmedelskylarens fläktar. Elbehovet kommer att minska både till följd av det nya kylbehovet och bättre effektivitet hos komponenterna. Användandet av värmepump för värmning av lokalen och av varmvatten kommer innebära minskad mängd köpt energi.

Beskrivning av byggnaden och dess tekniska system

Den aktuella byggnaden för livsmedelsbutiken är en gammal industrilokal med taklanterniner och ett dåligt klimatskal. Detta påverkar egentligen bara behovet av värme för lokaluppvärmning. Dessutom finns i byggnaden en "växthusliknande" lokal för försäljning av växter. Denna har ett sämre uppvärmningssystem än resten av byggnaden och ventilationen är ren frånluft, där fläktar är placerade i vägg och drar ut uppvärmd frånluft utan att återvinna värme i inneluften. Därmed har byggnaden ett relativt stort värmebehov.

Butiken har fyra maskinrum som försörjer var sitt kyl- eller fryssystem. Detta demonstrationsprojekt behandlade ett av buti-

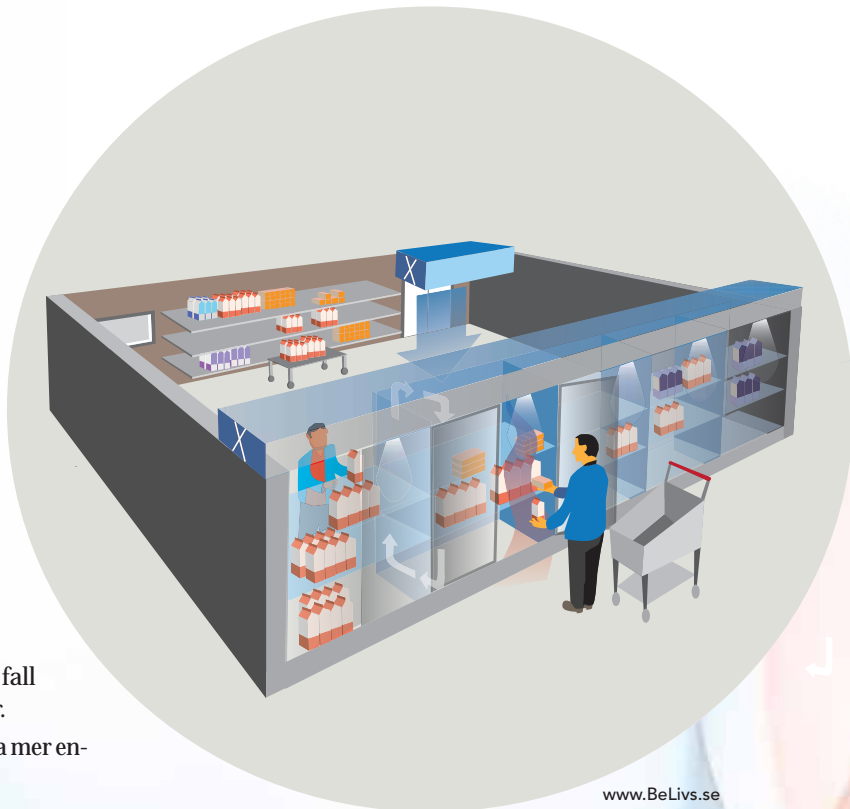
kens kylsystem, som försörjer mejeri- samt frukt och grönt-avdelningen. Figur 3 visar en principskiss över kylsystemet som energieffektiviserats i projektet. Detta system är ett indirekt kylsystem som består av ett antal kyldiskar och kylrum (kylställen), en köldbärarslinga med köldbärarpump, en kylmaskin, en kylmedels-slinga med kylmedelskylare-fläktar och kylmedelpump.

De faktorer som påverkar elenergianvändningen i ett kylsystem allmänt är:

- Kondenseringstryck
- Förångningstryck
- Kylbehov i kyldiskar och kylrum
- För indirekta system kommer även de indirekta systemens cirkulationspumpar att bidra till elanvändningen

Enkla, och då ofta billiga köldmediumsystem, har små värmväxlare för förångare och kondensor samt relativt sett stora kompressorer. Styrsystemen utformas för konstanta tryckförhållanden mellan förångare och kondensor i köldmediekretsen och on-off drift av kompressorer. De "elenergiförluster" som då erhålls är i första hand stor energianvändning för kompressorerna. I det befintliga systemet i butiken hölls kondenseringstrycket konstant vid en temperatur som motsvarade 35°C. Det är ett slöseri att i Borås, som har en årsmedeltemperatur utomhus kring +6°C, ständigt hålla kondenseringstrycket vid 35°C eller mer. Med en utrustning som ofta klarar att fungera med en differens på 12-15°C mellan kondenseringstemperaturen och utomhustemperaturen, motsvarar det att utrustningen klarar av ett årsmedel för utomhustemperaturen "på 20°C räknat från fulleffekt. Dessa förhållanden innebär att man kan sänka elbehovet för kompressorerna med mer än 20-30% räknat vid samma kylbehov. Minskningen i kylbehov som blir minst 30% innebär att elbehovet kommer att minska med >50%."

Utän att göra något åt kylsystemet kommer kylbehovet i öppna diskar att variera med en faktor 1:5 mellan en kall vinternatt och en varm augustifredag. Det finns behov av att få bra delastverkningsgrader för hela systemet. Stora kompressorer som går korta stunder på fullast (d.v.s. on-off drift), har förutom att alltid gå på fullast som ger full belastning i värmväxlare, dessutom förluster pga. många starter. Kostnaden för förslitning av kylmaskiner vid on-off drift är idag egentligen inte känd och därmed inte möjlig att sätta kostnader på, men är ändå en faktor som borde tas med i övervägandet vid inköp av utrustning, men är ändå en faktor som borde tas med i övervägandet vid inköp av utrustning.



www.Belivs.se

ILL: KENNETH SVENSSON, SOLO KOMMUNIKATIV GRAFIK

Energiberäkningar av planerade åtgärder, kostnadsbedömningar, lönsamhetskalkyler

I denna studie har ett befintligt köldbärarsystem, beläget i en livsmedelsbutik i Borås, med öppna kyldiskar, kylmaskiner styrda on-off och kylmedelskylfläktar styrda i steg, energieffektiviserats genom sex olika steg:

1. De öppna kyldiskarna har utrustats med dörrar, i vissa fall har diskar bytts ut mot nya som varit försedda med dörrar.
2. De ursprungliga två kylmaskinerna har bytts ut till fyra mer energieffektiva, varav två stycken var varvtalsreglerade.
3. KMK-fläktar har försetts med en gemensam frekvensomformare. Tidigare stängdes de 10 fläktarna av parvis för att styra kapaciteten mot behovet. Nackdelen med detta är dels att motsvarande yta blir oanvänd och att fläktar får en mycket stor energiförändring med varvtalsändring.
4. Kylmedelsystemet styrs på utetemperaturen och flytande kondensering har införts. Detta ger en betydligt lägre kondensering utom under de varmaste dagarna.
5. Köldbärartemperaturen i systemet har höjts från $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ till $-0\text{ }^{\circ}\text{C}$ med flytande förångning. Dessutom har de nya kylaggregaten suggasvärmeväxlare som ger en förändring av förångningstemperaturen, som motsvarar överhettningen eller minst $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ högre förångningstryck. Dessutom underkyler suggasväxlaren köldmediet som lämnar kondensorn, vilket är positivt för det köldmedium som användes i projektet.
6. Avfrostningen av kylsiskar har blivit överflödiga pga av den högre framledningstemperaturen på köldbäraren och stängdes därför av

I en förstudie där systemet analyserades, visade beräkningar på en besparingspotential på 30-50% genom att utrusta diskarna med dörrar.

Det ursprungliga systemet

Det ursprungliga systemet bestod av ett antal öppna vertikala kylsiskar, ett par kylrum och några diskar för frukt och grönt, se Tabell 1. Kylställets totala kylbehov var på 184 kW före ombyggnation. Köldbärartemperaturen och kylmedeltemperaturen var konstanta och satta till $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ respektive $30\text{ }^{\circ}\text{C}$. De två befintliga kompressorerna reglerade on/off. Kylmedelkylaren (KMK) hade tio fläktar, som arbetade i par och reglerades i fem fasta steg. Cirkulationspumparna i de indirekta systemen styrdes med fast varvtal.

För att möjliggöra mätningar och även för att öka kapaciteten flyttades ett antal kylsiskar för frukt och grönt in på det ombyggda köldbärarsystem, liksom de delar av mjölkrummet som var kopplade till ett annat kylsystem. Det 20 meter långa mjölkrummet har en front mot kunder i butiken med ett kylrum bakom. I framkant kyla mjölkrummet även av en mejeririda.

Frukt- och gröntkylsiskarna förseddes inte med dörrar. Däremot kommer de att tillåtas öka i temperatur när kyleffekten inte räcker med nuvarande värmeväxlare.

Tabell 1. Antal kylställen före och efter ombyggnation, kopplade till det köldbärarsystem som omfattades i demonstrationsprojektet.

Typ av kylställe	Antal före ombyggnation	Antal efter ombyggnation
Kylsiskar	5	6
Kylrum	6	7
Mjölkrum	1	1
Frukt och grönt	3	3

Systemet då kylsiskarna försetts med dörrar

Alla de öppna kylsiskarna förseddes med dörrar. Några diskar byttes mot nya med kravet att de skulle kunna arbeta med $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ i framledningstemperatur för köldbärarsystemet och $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ i lufttemperatur i disken. De befintliga kylrummen försågs med en utökning av värmeväxlarytorna för att ge samma temperaturspecifikation, som de nya diskarna. Ett nytt kylrum byggdes enligt samma temperaturkrav.

De två befintliga kylmaskinerna och KMK:na bibehölls i detta steg. Den dimensionerande kyleffekten för de öppna kylsiskarna sjönk från 92 kW till 47 kW (beräknat, ej uppmätt) och den dimensionerande kyleffekten för kylrummen bibehölls. Då tanken från början var att behålla de ursprungliga kylmaskinerna, adderades kylsiskar och kylrum till den aktuella köldbärarslingan, för att på så sätt hålla uppe och anpassa den dimensionerande kyleffekten till befintliga kylmaskinerna. Den dimensionerande kyleffekten efter att kylsiskarna försetts med dörrar blev därför ungefär oförändrad.

Kylmaskin och KMK-fläktar byts ut mot varvtalsreglerade

De två befintliga kylmaskinerna byttes ut mot två nya. De ursprungliga hade on/off-reglering. De nya innehåller två kompressorer vardera. Av de två kompressorerna i varje nytt aggregat är en varvtalsstyrd och en on-off. Varje aggregat har två separata

köldmediekretsar. KMK-fläktar försägs med en gemensam frekvensomformare och varvtalsregleras parallellt, vilket innebär att alla fläktar är i drift samtidigt och hela KMK:s värmeväxlaryta nyttjas. Före ombyggnationen stängdes fläktarna av parvis för att reglera dellast. Köldbärartemperaturen höjdes från -8 °C till drygt +1 °C. Köldbärartemperaturen kommer hållas så hög som möjligt och varierar beroende av kylbehovet i det hårdast belastade kylstället. Flytande kondensering infördes genom att styra kylmedelkylaren på utomhustemperaturen.

Ett nytt styrsystem har införts huvudsakligen för att diskarna ska kunna påverka utgående köldbärartemperatur från maskinrummet. Detta innebär även ett byte av reglerenhet i de befintliga diskarna.

Avfrostningen stängs av

Avfrostningen stängdes av för kyldiskar och kylrum, eftersom då köldbärartemperaturen höjdes försvann behovet av avfrostning.

Tabell 2 visar en sammanställning av dimensionerande kylbehov, temperaturer och styrstrategier för det ursprungliga systemet och dagens system.

Installerad mätning

Mätningar utfördes för att verifiera beräknade energivinsten. De parametrar som mättes var följande:

- Två lufttemperaturer, högt och lågt på hyllplan, i samtliga kyldiskar mättes för att se temperaturspridning.
- Köldbärarflöde samt framledningstemperatur och returtemperatur mättes för att beräkna totalt kylenergin från kylaggregaten i maskinrummet. Detta kan ses som det totala kylbehovet i anslutna kylställen. Enda kylstället som fick separat mätning av kylbehov var mjölkkrummet, där mätning skedde med flödesmätare och två temperaturer.
- Total el till kylaggregaten.
- El till KMK-fläktar.
- El till pumpar mättes i informativt syfte, trots inga åtgärder gjordes för dessa.
- Butikens inneklimate (torr och våt temperatur) har mätts för att se hur kylbehovet varierar med luftens entalpi.
- Torr inomhustemperatur har.
El till kyldiskarna mättes inte då deras fläktar och fläktstyrning var den samma före och efter ombyggnationen.

Tabell 2. Sammanställning av kylbehov, temperaturer och styrstrategier för ursprungliga och dagens system.

	Ursprungligt system	"Dagens" system efter ändringar
Dimensionerande kylbehov för kyldiskar [kW]	92	47
Dimensionerande kylbehov för kylrum [kW]	24	24
Köldbärartemperatur [°C]	-8	+1 (flytande)
kylmedeltemperatur [°C]	30	toutdoor+10 (minimum 12)
Kondenseringstemperatur [°C]	ca 35	min 15
Styrstrategi Kompressorsystem	on/off	Varvtalsreglerad
Styrstrategi KMK-fläktar	Fem fasta steg Parvis avstängning	Varvtalsreglerade parallellt

Mätperioder och klimataspekter

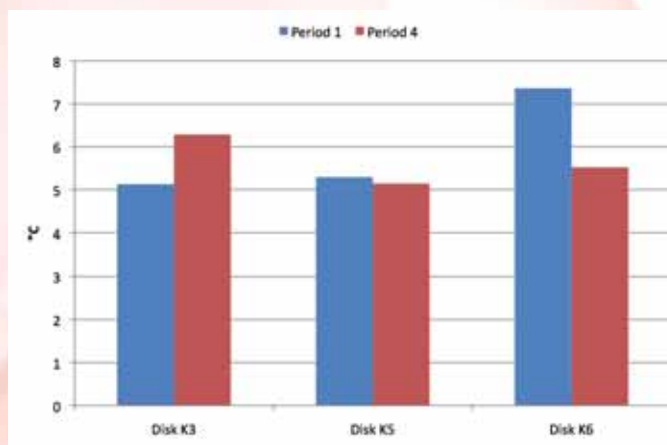
Mätningar har genomförts under fyra perioder under 2013. Dessa perioder presenteras i Tabell 3 nedan.

Tabell 3. Mätperioder i projektet för kyldelen

Period	Från/Till	Benämning
Period 1	2013-03-25 tom 2013-05-16	Mätning före åtgärder
Period 2	2013-06-26 tom 2013-08-15	Mätning efter åtgärder i diskar
Period 3	2013-09-11 tom 2013-10-14	Mätning efter åtgärder utan ändring av styrsystem
Period 4	2013-10-30 tom 2013-12-18	Mätning efter åtgärder

Temperaturer före och efter ombyggnad

Diskarna hade två temperaturgivare, en placerad högt och en lågt vid hyllplan i varje disk, som mätte disktemperaturer. I Figur 1 presenteras medeltemperaturen i period 1 och 4 för kyldiskarna K3, K5 och K6 (för givare 1).



Figur 1. Medeltemperaturer för diskarna K3, K5 och K6 i period 1 och 4

Efter ombyggnationen har disk K3 fått en högre medeltemperatur, disk K6 har fått en lägre och disk K5 har en i princip oförändrad medeltemperatur. Av mätningarna framgår även att diskarnas temperatur har blivit något jämnare efter ombyggnationen. I fallet med disk K6 har temperaturen även blivit lägre än tidigare.

I mjölkkrummet (mejerilängan), har temperaturen blivit jämnare, men högre i period 4 jämfört med period 1, vilket framgår av Figur 10. Medeltemperaturen i mejerilängan har ökat från 4,4 till 5,7 °C. Den svenska lagen om förvaring av mjölk och mejerivaror kräver en temperatur under 8 °C. De åtgärder som har genomförts i mejerilängan är;

- Dörrar mot kunderna
- Nytt hyllsystem
- Ny kylridå innanför dörrarna
- Bibehållande av befintliga tak kylbatterier i mjölkkrummet
- Ny regulator för styrning av rummets temperatur

Kylbehov före och efter ombyggnad, totalt uppmätt i maskinrum

Det totala kylbehovet för butiken är den kyleffekt som krävs av kylsystemet för att hålla kyldiskarna och kylrummen kalla. Genom att mäta köldbärarflöde, framlednings- och returtemperatur på köldbäraren i maskinrummet (där vätskekylaggregaten VKA är placerad) och med kunskap om köldbärarens densitet och specifika värmekapacitet, kan den totala kyleffekten uppskattas. Kyleffekten kan minska pga. energibesparande åtgärder, eller för att temperaturen tillåts öka ute i diskarna. Det är därför viktigt att relatera kyleffekten till temperaturen i och utanför diskarna i butiken, samt till klimatet i butiken och utomhus.

Kylbehovet påverkas bland annat av hur mycket fukt och värme som kommer in i diskarna. Värmen behöver kylas bort för att upprätthålla rätt disktemperatur och fukten kan kondensera och bilda is på kylbatterierna, vilket påverkar förmågan att kyla disken. Is eller frost på kylbatterier försämrar värmeöverföringsförmågan. Genom att sätta dörrar på diskarna, kan mängden fukt i diskarna minska, liksom värmeutbytet med den omgivande butiken.

För att få en uppfattning om kylbehovet har den totala kyleffekten som uppmäts vid VKA ställts i relation till energinnehållet i butikens luft, entalpin. Denna entalpi har uppskattats med hjälp av temperaturen och den relativa luftfuktigheten som mätts i butiken. Entalpin hos butikens luft är ett mått på mängden värme och fukt utanför diskarna.

Kyleffekten har beräknats med hjälp av uppmätt köldbärarflöde, framlednings- och returtemperatur på köldbäraren samt köldbärarens densitet och specifika värmekapacitet.

Genom att studera den totala kyleffekten i relation till entalpin i butikens luft, så kan slutsatser dras om kylbehovet.

I huvudsak två saker kunde noteras i studien av mätningarna; kyleffekten är inte starkt beroende av entalpin i butiken, den ligger på ungefär samma nivåer oavsett om entalpin är hög eller låg, samt att entalpin i butiken för de mätta perioderna sträcker sig över nägorlunda likvärdiga intervall, 25 till 35 – 40 kJ/kg.

Tolkningen av ovanstående är dels att det finns andra parametrar än butikens entalpi som påverkar kylbehovet och dels att det totala kylbehovet har minskat mellan period 1 och 4. Diskarnas temperatur har i vissa fall blivit något högre, vilket till viss del bidrar till minskningen av kyleffekt. Frikopplingen mellan entalpi i butikens luft och den totala kyleffekten är ett intressant resultat som tyder på att åtgärderna har bidragit till att sudda ut säsongskillnaderna i butikens kylbehov på kylsidan. Sommar har nästan blivit vinter.

Kylbehov i mjölkrum uppmätt före och efter ombyggnad

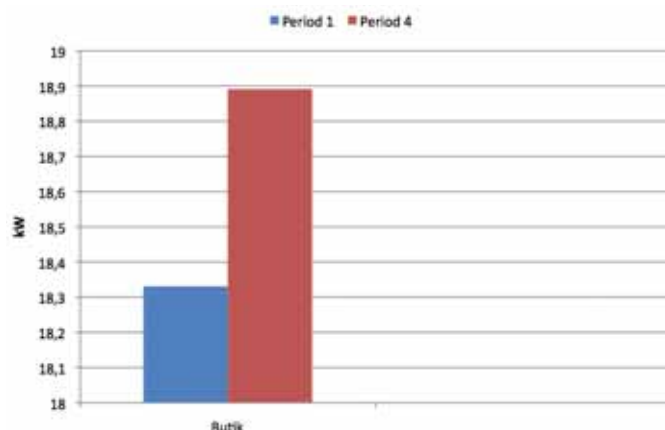
För mjölkrummet (mejerilängan) har samma resonemang som ovan använts och slutsatsen är densamma som för VKA; kylbehovet har minskat efter ombyggnationen och kyleffekten varierar mindre. En del av den minskade kyleffekten beror på att temperaturen i mejerilängan har ökat.

Temperaturskillnaden mellan mejerilängan och butiken har ökat från 13,2 °C i den första perioden till 13,9 °C i den sista mätta perioden (motsvarar 5 %). Ur resultatet kan utläsas att:

- Kylenergibehovet har minskat
- Påverkan från butiksklimatet (entalpin i butikens luft) har helt försvunnit
- Inverkan av andra parametrar vid en given entalpi verkar ha minskat kraftigt (bandets höjd)

Energibehov i kylaggregat före och efter ombyggnad

Medelkyleffekterna totalt i VKA och lokalt i mjölkrummet (mejerilängan) har minskat efter åtgärderna, vilket framgår av Figur 2. Medelkyleffekten totalt i VKA för period 4 har minskat med nästan 40 % jämfört med period 1.

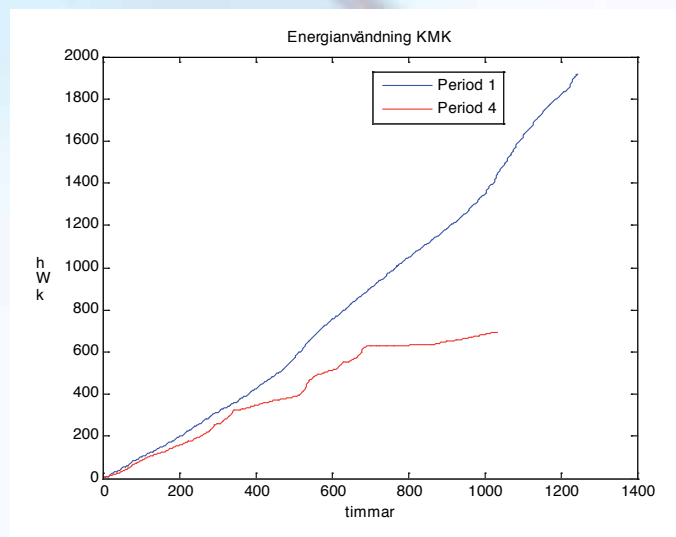


Figur 2. Medelkyleffekter för VKA och mejeri för period 1 och 4

För mejerilängan så är en förklaring till den lägre kyleffekten i period 4 att temperaturen har blivit högre. Huvudorsaken är dock dörrarna mellan mjölkrum och kundrum.

Energibehov i kylmedelkylare (KMK)

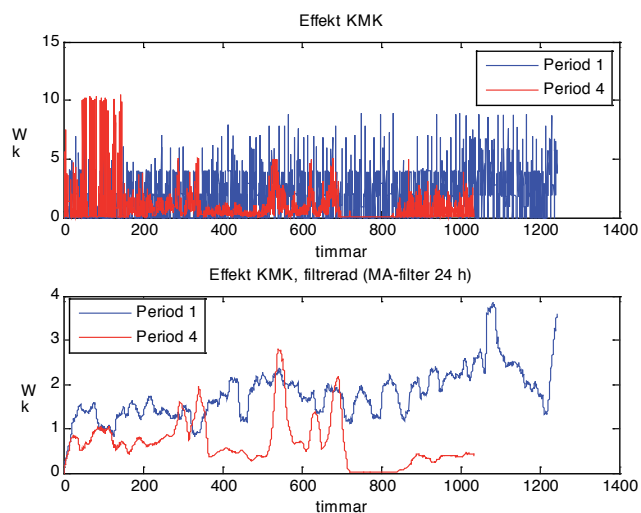
Energianvändningen loggas med hjälp av en energimätare. Dock saknas energidata för period 3 samt de första ca 100 h av period 4. Dessa data ingår därför inte i nedan jämförelse mellan period 1 och 4. I Figur 3 nedan presenteras den loggade energianvändningen för KMK under period 1 och period 4.



Figur 3. Energianvändning i KMK för period 1 och 4

Energianvändningen hos KMK har i genomsnitt halverats i period 4 jämfört med period 1. Totalt har KMK använt ca 696 kWh under ca 1033 h i period 4, jämfört med ca 1916 kWh under ca 1242 h i period 1.

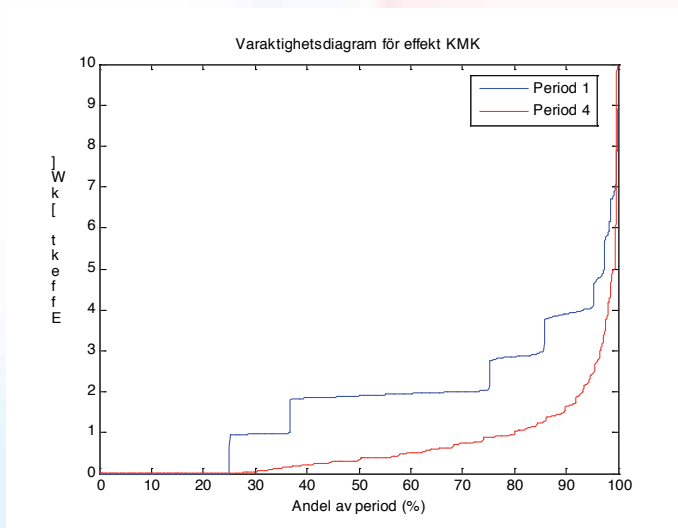
I Figur 4 presenteras effekten för KMK över tid för period 1 och 4. I den nedre delen av diagrammet har data filtrerats med ett rullande medelvärdesfilter för att få fram dygnsmedeleffekten.



Figur 4. Effekt KMK över tid för period 1 och 4

I period 4 arbetar KMK vid en generellt sett lägre effekt än under period 1. Detta framgår även av varaktighetsdiagrammet i Figur 5 nedan.

KYLMA

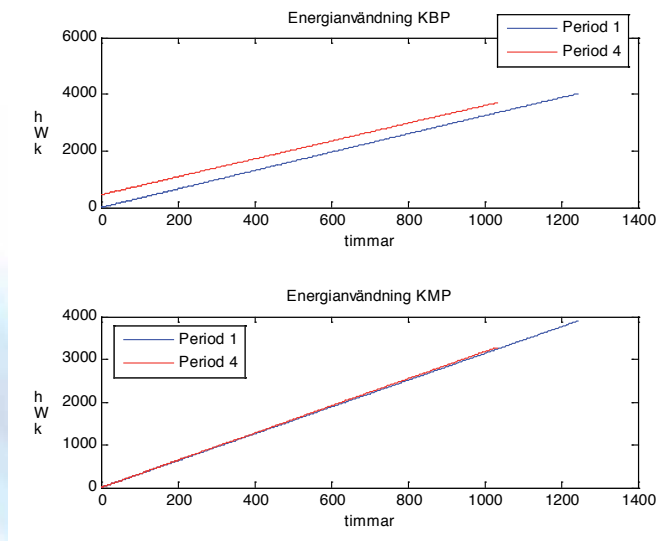


Figur 5. Varaktighetsdiagram för effekten hos KMK i period 1 och 4

Medeleffekten hos KMK i period 4 har minskat med drygt 60 % jämfört med medeleffekten i period 1.

Energibehov i pumpar före och efter ombyggnad

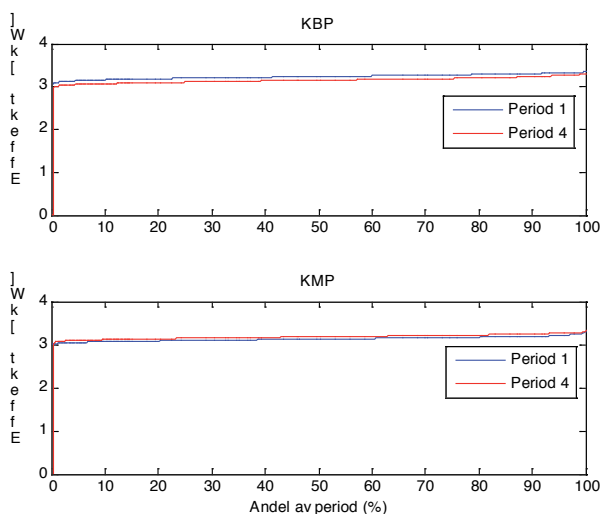
I Figur 6 presenteras energianvändningen för pumparna köldbärarpump (KBP) och kylmedelpumpen (KMP) under period 1 och 4.



Figur 6. Energianvändning i KBP och KMP

Det är ingen större skillnad i energianvändning mellan period 1 och 4 för KBP och KMP. Att energianvändningen för KBP i period 4 ligger ovanför energianvändningen i period 1, kan förklaras av att mätvärden saknas för de första ca 100 h av period 4. På grund av detta börjar inte energimätningen på noll kWh, utan startar med mätvärdet ca 100 h in i perioden. Det viktiga i figuren är lutningen på linjerna, vilken är likvärdig för period 1 och 4. Även när effekten hos KBP och KMP studeras, framgår det att ingen större skillnad finns mellan period 1 och 4, detta visas i varaktighetsdiagrammen i Figur 7 nedan.

Dessa resultat är väntade eftersom det inte har genomförts några åtgärder på pumparna. Det är klart intressant att se vad valet att inte påverka pumparna har inneburit.



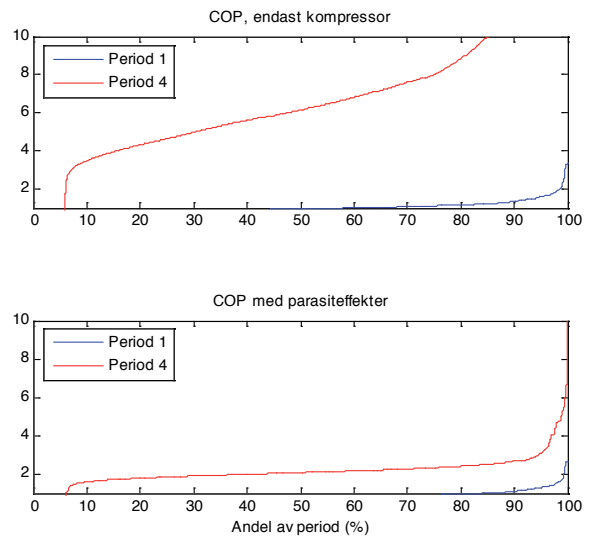
Figur 7. Varaktighetsdiagram för KBP- och KMP-effekt

Energieffektivitet före och efter ombyggnad totalt

Energieffektiviteten hos kylsystemet beräknas som kvoten mellan total kyleffekt i VKA och tillförd eleffekt. Denna kvot kallas för Coefficient of Performance (COP) och talar om hur mycket kyleffekt som systemet ger per tillförd eleffekt. Två varianter av COP har beräknats;

- 1) COP baserat endast på kompressoreffekten i VKA (tillförd eleffekt = kompressoreffekt för VKA), vilket talar om hur effektivt kompressorn arbetar
- 2) COP baserat på kompressoreffekt och parasiteffekter (tillförd eleffekt = kompressoreffekt för VKA + effekterna hos KMK, KBP och KMP), vilket beskriver hela anläggningens effektivitet.

Både varianterna av COP presenteras i Figur 8.



Figur 8. COP för period 1 och 4

COP har förbättrats markant i period 4 jämfört med period 1. Under period 1 var medelvärdet för COP för endast kompressorn 0,9 och i period 4 har detta förbättrats till ca 7,3. För COP med parasiteffekter var motsvarande medelvärden ungefär 0,8 i period 1 och 2,1 i period 4.

Uppskattning av anläggningens kylenergibehov över ett år

Efter de genomförda åtgärderna tyder mätningarna på att beroendet mellan total kyleffekt och entalpin i butikens luft som fanns i period 1 har försvunnit i period 4. Detta innebär att butikens inneklimat och utomhusklimatet inte påverkar kylbehovet och nödvändig kyleffekt i samma utsträckning då dörrar installerats.

Något om mätnoggrannhet

Alla mätningar samlas in i en DUC (dataundercentral) till ett i butiken befintligt datainsamlingsystem. I denna sitter AD-omvandlare (analog-till-digital-omvandlare) och strömgenerator för temperaturgivare. Dess stabilitet avseende temperaturmätning med Pt 100 har vid kalibrering uppmätts till 0,1°C. För Pt 1000 ansättes då att felet blir försumbart.

Temperaturmätningarna var av två slag:

1. Temperatur i diskar mätta med 2-trådskopplade Pt 1000. Dessa har kalibrerats i två omgångar vid 0°C. Spridningen mellan dessa två tillfällen visar på en mätosäkerhet på ungefär 0,5°C efter kalibrering.

2. Temperatur i köldbärare mätta med 4 tråds Pt 100 insatta utan fickor. Givarna kopplas sedan in i DUC ovan med 2-trådsanslutning. Efter kalibrering på plats med isbad och med tanke på den i labb uppmätta osäkerheten i DUC kan inte absolutvärdet anses bättre än 0,2°C. Med två givare som underlag för beräkning av en temperaturdifferens bör osäkerheten kunna anses vara knappt 0,3°C.

Flödesmätningen med kalibrerade induktiva mätare, monterade enligt krav på minst 10 diametrar före givaren, kan anses ge < 0,5% av aktuellt flöde. Kyleffekt-mätningen kan därför med 3°C temperaturdifferens anses vara kring 10% osäkerhet.

Elenergimätning med de använda systemen anses var < 2% av verkligt värde och COP beräkningar ungefär 10%.

RESULTAT

Installerad kapacitet

Kylbehov anses vara den värmemängd som måste kylas bort från respektive kylställe. Nominellt kyleffektbehov anses vara det maximala kylbehovet vid värsta omgivningsförhållanden. Nominellt kyleffektbehov bestämmer dimensioneringen av kylsystemet och är alltid en beräknad, skattad storhet.

Tabell 4. Nominellt kylbehov före och efter ombyggnad

Typ av kylställe	Nominellt kylbehov [kW]	
	Före	Efter
Kyldiskar	72	56,5
Kylrum	35	40
Mejeri	35	29
Frukt och grönt	42	42
Summa	184	167,5

Tabell 5. Förändring av kylbehov före och efter ombyggnad

Kylställe	Period	Kylbehov [kW]	Kvot	Ändringskorrigerig
Mejeri	1	23,6	0,42	0,42
	4	10		
Total	1	38	0,6	0,52
	4	23,1		

De kyleffekter (kylbehov hos kylställena, som kylanläggning ska möta), som redovisas i Tabell 5 är uppmätta. Dels mättes totalt kylbehov från maskinrum och dels lokalt kylbehov i mjölkrummet. Naturligtvis kan man korrigera för den något högre medeltemperaturen på 5,7°C som uppmättes i period 4 för mejeri, men det ändrar resultatet försumbart.

Nominella data är givna för ett klimat i butiken som har en torr temperatur på 26°C och relativ fuktighet på 60%, d.v.s. luftentalpi 57 kJ/kg. Det klimatet kommer inte att inträffa i en butik med

komfortkyla. Om komfortkylan av någon anledning inte skulle fungera eller inte är installerad i butiken är dock detta inneklimat helt möjligt även i Sverige. De diskar som byggdes om har räknats om vid nominell kapacitet med hjälp av tillverkarens program.

I kolumnen "Ändringskorrigerig" i Tabell 5 har tillkommande kylrum och kyldisk räknats bort. Värdena bör då representera den förbättring som blivit resultatet av ombyggnationen. Det har tillkommit 9 kW nominell belastning med ytterligare en disk och ett rum som kopplats på kylsystemet.

Kylbehovets variation

De faktorer som styr kylbehovet i en butik är butikens inneklimat, varuinlastning speciellt om dessa är varma, kunder som bryter klimatskydd (lufrida, öppnar kyldiskdörrar) och eventuella avfrostningar. Sommar eller vinter påverkar inneklimatet. Kylbehovet påverkas direkt av inneklimat och indirekt av uteklimat. Dessutom bidrar naturligtvis installerade fläktar, pumpar och karmvärme till behovet av el för drift, och delvis till kylbehovet då värme tillförs när de är i drift. För frysinstallationer tillkommer även avfrostningsvärme eftersom disken då alltid är under fryspunkten måste extern värme tillföras för att frosta av värmeväxlarna i diskarna. Ofta avfrostas frysdiskar med elvärme. I kyldiskar räcker det med stoppavfrostning, eftersom disktemperaturen är över fryspunkten (fläkten går medan kylningen stängs av). När avfrostningen stoppas och kylningen startar igen erhålles alltid en effekttopp då arbetstemperaturen skall återställas.

Speciellt för period 4 och i någon mån även för de övriga perioderna, är kylbehovet oberoende av luftens entalpi i butiken. Det visade sig även att övrig variation minskar för period 4. Varför övriga faktorer som påverkar kylbehovet under perioderna 1-3 minskar med jämnare styrning i period 4 är inte känt. En faktor som där har tillkommit, är det minskade kylbehovet för att avfrostningen har stängts av.

Medelvärde över period 4 kan användas som en indikation på butikens totala kylbehov över året, eftersom variationer i butiksluftens energinnehåll inte längre påverkar kylbehovet efter energieffektiviseringsåtgärderna. En kylanläggning är tänkt att bibehålla rätt temperatur på varorna. Det skulle kunna vara som så att varorna som lastas in sommartid är varmare än under senhösten. För att sänka temperaturen på varorna vid sommartiden förutsätter då ett något högre kyleffektbehov.

Systemets effektivitet

Ett ofta använt mått på kylanläggningars effektivitet är COP, som innebär att kyleffekt divideras med behovet av driveffekt. Samma resonemang förekommer ofta med energidata t ex dygnsenergi eller årsenergi, utan att någon skillnad syns i beteckningen COP. Det är även väldigt väsentligt att skilja på COP för enbart kompressorer och COP för kompressor inklusive parasiteffekter, d.v.s. pump och fläktar i kylsystemet.

Tabell 6. COP före och efter ombyggnad

Effektivitet	Period 1		Period 4
	Före	Efter	
COP kompressor	0,9	7,3	
COP inklusive parasiter	0,8	2,1	

Det finns några tydliga indikationer i det här demonstrationsprojektet på anledningar till ökade COP för kompressorer:

- före ändringar fanns det två kompressorer, som tillsammans var större än det nominella kylbehovet. Dessa arbetade med on-off funktion utan annan kapacitetsreglering, vilket ger lägre effektivitet.
- efter ändring har behovet av nominell kylkapacitet delats på fyra kompressorer, varav två är varvtalsstyrda.
- dessutom har förångningen höjts mer än 15°C och kondenseringen här sänkts ungefär 20°C, vilket ger ett lägre temperatursteg som kompressorerna ska upprätta.
- de nya kompressorerna är angivna (märkdata) som mer effektiva av tillverkaren.

Parasiteffekterna, som främst är de två pumparna (för kylmedel och köldbärare) är alldeles för stora för kyleffekten efter energieffektiviseringsåtgärderna. De går dessutom med konstant varvtal. Effektmässigt är de i paritet med de nya kompressorernas effekt under period 4 som är 5 kW. Det finns möjlighet att börja styra dessa pumpar efter systemets behov av kyleffekt, eftersom de redan har frekvensomformare. Denna typ av styrning har dock inte införts i detta projekt.

Energieffektiviseringspotential – uppmätt

Kylbehovet kommer efter ombyggnationen inte att variera lika mycket som före ombyggnad. Om inget görs åt pumparna kommer deras elbehov att vara konstant under hela året. Fläktarna i kylmedelskylaren (KMK) kommer under värmesäsongen att arbeta mindre än vad som är redovisat i avsnitt "Energibehov i kylmedelskylare (KMK)", eftersom största delen av värmen istället kommer att levereras till värmepumparna, som nu är igång. De skall styras på utetemperatur och begränsas så att kondenseringen aldrig understiger 15°C. Samtidigt måste styrning av värmepumparnas kylning och KMK kylningen samordnas så att all värme som behövs för uppvärmning används för uppvärmning. Kompressorernas kondensortryck kommer därför under varma perioder att öka väsentligt för att nå krävd kondenseringstemperatur, vilket resulterar i ökad driftenergi. En högre tryckskillnad mellan förångning och kondensering kräver mer utfört arbete av kompressorn, vilket kräver mer driftenergi.

Vad blir kompressorernas sämsta driftpunkt? En gissning är 40°C kondenseringstemperatur, vilket skulle betyda 25° högre än här redovisad elkraftanvändning (motsvarande en 50-75% ökning). Lite överslagsberäkning leder till att minimum för COP med parasiteffekter då blir 1,7. Om inte något görs åt parasiteffekterna, exempelvis börja styra pumparnas varvtal, kommer ett medelvärde för COP upp mot 2,0 att erhållas. Den genomförda minskningen av kylbehov, som demonstrerats i detta projekt, ger en ungefärlig halvering av kylbehovet. COP som är ett mått på effektiviteten ändras från COP 0,8 till 2,0 vilket är mer än en fördubbling av effektiviteten, se Tabell 6. Systemet kommer att behöva mindre än 25% av tidigare mängd elenergi.

I överslagsberäkningen ovan har inte minskningen i kylbehov sommartid tagits med. Beräkningen utgår från uppmätt skillnad i kylbehov före och efter ombyggnation vid samma entalpi i butiksluften. Före ombyggnad varierade kylbehovet med klimatet i butiken eller mer precist med butiksluftens entalpi. Efter ombyggnad är kylbehovet inte längre beroende av butikens klimat, vilket tyder på att infiltration av omgivande butiksluft och kylsläckage från diskarna har hindrats av dörrarna. Den tidigare ökningen av kylbehov, som inte längre finns, sommartid kommer att öka verklig elbesparing. Den försiktiga uppskattningen (75% lägre elbehov, halvering av kylbehov och dubblad effektivitet) ovan skulle vara bra att visa med ett helt års mätning av det ombyggda kylsystemet.

Troligen är verklig elbesparing ännu högre. Med den enklaste skattningen besparingen, med parasiteffekter inräknat, ungefär 450 MWh mindre elbehov årligen för den berörda butiken och ungefärliga mycket i pengar d.v.s. 450 000 kr.

En intressant uppgift som kan belysas är att motiveringen för beslutet om energieffektiviseringsåtgärderna i detta demonstrationsprojekt, var att den årliga vinsten i sänkt elbehov för att driva kylsystemet räknades till 245 MWh, och hela den ekonomiska vinsten inklusive utnyttjandet av värmeåtervinning räknades till 480 tkr.

Den största orsaken till att beräknad och verklig vinst skiljer är att anläggningens elbehov i den befintliga installationen före ombyggnad, var betydligt högre än vad den försiktiga beräkningen angav. Innan några mätningar startade fanns inga data om hur mycket el som användes. Detta är säkert den vanligaste situationen för befintliga butiker.

Pumparna borde, genom att utnyttja varvtalsstyrning, kunna halvera sina elbehov. För 8700 timmars årlig drifttid erhålles i så fall en minskning med 26 MWh per år.

Styrfunktioner

Att använda ett "standard"-styrsystem är på många sätt ett vinnande alternativ i den mycket uppsplittrade butikensbranschen. Uppsplittad i avseende att det finns väldigt många små installationsföretag, som själva inte klarar av att utveckla, dokumentera och avbugga egna system. Om det även i det här "IT-segmentet" är de öppna systemen som blir vinnare återstår att se. Ett öppet system ger användaren möjlighet att introducera egna lösningar. I detta projekt har det italienska CAREL valts. Ett skäl är att det är relativt mer öppet. I ett öppet system blir då ett krav att ingående funktionerna behöver förklaras, åtminstone på en övergripande nivå. Genom att som drifttekniker, servicetekniker eller butikspersonal återföra erfarenheter till tillverkaren, kan systemet hela tiden förbättras. I själva konceptet ligger då även en villighet hos tillverkaren att ta emot, värdera och kanske införa resultaten av erfarenheter. Nackdelen är naturligtvis att det kan uppstå olika varianter av styrsystem, som inte är kompatibla med varandra. Dessutom finns det i den svenska lösningen med indirekta system en skillnad mot övriga världens DX-system (direktexpansionssystem, direkta system). För utländska leverantörer av styrsystem är den lilla svenska marknaden kanske inte lika intressant för att få avskrivning av sina investeringar på. Innebörden blir att styrmässigt blir svenska system både enklare och samtidigt mer komplicerade att styra. DX-systemen har inga pumpar, medan antalet expansionsventiler är betydligt fler. Hur styrningen av expansionsventiler skall göras är i princip enkelt även om algoritmen i styrsystemet kan vara komplicerad i sig. Hur frekvensstyrningen i kompressorer, pumpar och fläktar skall samordnas är inte självklart. Bortsett från de många regulatorernas möjlighet att skapa självsvängning, finns det motsättningar. Minskat varvtal på fläktar och pumpar ger större tryckuppsättning i kompressorerna. Det finns optimalstyrning mellan de fyra regulatorerna, för kompressor, pumpar, kylmedelfläktar och expansionsventiler.

Samordningsbehovet mellan styrsystem och övervakning blir tydligt när kraven på styrsystemets funktion blir mer komplicerade. Övervakningen skall inte bara ge enkla larm av typen för varm temperatur, för kall temperatur eller energirapporter. Dessutom skall reglerfel, drivning i reglergivare, komponentfel och anläggningsfel, som ger ökad energianvändning kunna indikeras, spåras och åtgärdas innan det kommer som en ökad elutgift.

Med värmepumpar inkopplade har börvärdet i kylmedelskylaren höjts, för att undvika att någon värme styrs ut på taket när den behövs inomhus. Även här behövs en samordning mellan styrning av kylmedelskylaren och värmepumparna.

Detta visar på behovet av att få en samordning av alla installationers styrsystem såsom ventilation, fjärrvärme, värmepumpar och livsmedelkyla.

Kundernas reaktion efter ombyggnad

Butikens ägare kan i detalj se förändringar i kundernas beteenden i sina mätsystem av varuflöden genom att följa försäljningen och att prata med kunderna. I de ombyggda delarna av butiken, där dörrar på kyldiskarna är den tydligaste förändringen för kunderna, har omsättningen av matvaror inte påverkats negativt. Dessutom har butikspersonal frågat kunder efter synpunkter på sådant som är synligt i butiken efter ombyggnationen. Detta är dörrar, några nya diskar och en något ändrad layout av diskplacering. Kunderna tycker att butiken har blivit ännu fräschare.

Butiksägarna är efter ombyggnad nöjda med kundernas reaktioner inför nyheterna

Slutsatser

Den viktigaste slutsatsen är att det finns väldigt mycket driftkostnad att spara genom att se på hela systemet för livsmedelskyla. Befintliga installationer är och kommer att vara den stora mängden av installerade kylsystem i Sverige och satsningar måste göras för sänka energibehovet i dessa. Här förutsätts en samverkan mellan myndighet och bransch för att uppfylla Energimyndighetens mål och butikens aktiva medverkan i att öka energieffektiviserande åtgärder.

Återbetalningstiden (baserat på investering och årsvinst) är mindre än tre år. Beroende på återbetalningskravet av investeringen kan det, som i detta exempel, vara möjligt att genomföra ändringar bara med sikte på minskade driftskostnader. Ändringar i diskars kylbehov genom att sätta på dörrar har här resulterat i upp mot en halvering av kylbehovet. En av orsakerna till förändringen, som kan ses i mätningarna, är att diskarnas kylbehov tenderar att bli oberoende av fukttinnehållet i butiksluften då dörrar installeras på kyldiskarna. Enkelt kan man påstå att sommar har förvandlats till vinter i diskarna. En annan förändring är att utkylningen i lokalerna, som orsakas av kylläckage från diskarna, har minskats egentligen med hela kyleffektförändringen vintertid. Med dörrar kommer inte kall luft att läcka ut i butiken och ge utkylning. Vintertid har värmesystemet strävat efter att kompensera utkylningen med mer uppvärmning, även om det inte alltid har lyckats. Sommartid är förhållandet annorlunda. Då stiger butiksluftens fukttinnehåll och det börjar i kyldiskar bli mycket vatten som kondenserar. Den kalla luften i diskarna kommer att ge utkylning i butiken även sommartid, men betydligt mer än önskat för att upprätthålla ett behagligt inneklimat för kunder och personal. Ofta behöver delar av butikslokalen, som inte omfattas av utkylning, kylas sommartid med komfortkyla. Komfortkylans elbehov är dock betydligt mindre än den tidigare utkylningen med livsmedelskylan.

Det är inte självklart att så här stora ändringar i kyleffektbehov leder till motsvarande förändring av driftkostnaden. Den befintliga kylanläggningen kommer att vara alldeles för stor för behovet efter ombyggnad, då dörrar sätts på diskar och sänker deras kylbehov, varför någon form av anpassning på kylsystem kan vara lönsam att genomföra. I det här exemplet har ett antal

förändringar genomförts förutom att två kompressorer blev fyra mindre, varav två varvtalsstyrda. De övriga förändringar som har genomförts är flytande förångning, flytande kondensering och förbättringen av dellastverkningsgraden. Förbättringen av dellastverkningsgrad beror på både uppdelningen i fler kompressorer och införande av varvtalsstyrning. Den flytande förångningen har två syften. Dels att minska temperatursteget mellan temperaturen i förångaren och i kondensorn, som kompressorn måste skapa, och att eliminera behovet av avfrostningar. Höjs förångningstemperaturen kan temperaturen på köldbäraren, som går ut till kyldiskarna, hållas uppe och minska eller som i detta projekt helt eliminera påfrysning av is och frost på kylbatterierna i diskarna. Matvarans hållbarhet påverkas av temperaturen. Kylenheter och dess utformning skapar en viss temperatur för varorna i kylenheten. En kylenhet med dörrar innebär en jämnare temperatur som är gynnsam för varan [6].

Den flytande kondenseringens enda syfte är att minska driftkostnaden i kompressorsystemet, genom att minska det temperatursteg som kompressorn måste skapa mellan förångning och kondensering. För att detta skulle bli möjligt har de termostatiska expansionsventilerna i köldmediekretsen bytts mot elektroniska. Elektroniska expansionsventiler har ett betydligt större reglerområde, och tillåter den i projektet införda stora variationen i kondenseringstemperatur mellan sommar och vinter. Elektroniska expansionsventiler är dyrare än mekaniska och finns inte i billiga system. I Borås är årsmedeltemperaturen drygt 6°C och det är då inte vettigt att arbeta med en kondenseringstemperatur kring 35°C. I det nya systemet kommer denna kondenseringstemperatur endast behövas när lufttemperaturen utomhus passerar 25°C.

Det är värt att notera att i projektet har inte vinsten av att de nya diskarna har lägre fläkteffekten tagits med i resultatet. Inte heller byttes det till EC-fläktar i kylmedelkylaren (KMK).

Det finns även risk att hela den uppmätta vinsten inte kommer bibehållas om inte en samordning av alla styrsystem i butiken genomförs. Butiken har styrsystem för livsmedelskyla, värmepumpar, fjärrvärme och ventilation. Efter inkopplingen av värmepumpar har det införts en temperaturdifferens mellan börvärde för kylmedel till KMK och börvärde för kylmedel till värmepumpsanläggningen. Den differensen bör kunna elimineras helt, nu är den ungefär 8°C. Den differens ger förhöjd kondenseringstemperatur i kylsystemet när inte all värme behövs till lokaluppvärmning och tappvarmvatten.

Den utkylning som har funnits i butiken, som resultat av kyl-läckage från kyldiskarna utan dörrar, är nu eliminerad. De enda diskar som inte har dörrar i butiken är några fruktdiskar. Vintertid innebär detta att ett värmebehov motsvarande utkylningen nu inte längre finns. Under de perioder under året då ingen lokaluppvärmning behövs, icke värmesäsong, har den tidigare utkylningen ofta gett en alltför kall lokal. Nu kommer det tidvis att behövas mer komfortkyla för att kyla lokalerna vid varm utetemperatur. Det kommer dock aldrig behövas lika mycket komfortkyla som utkylningen, eftersom önskemålet inte är att ha så låg temperatur i butiken. Om detta innebär bättre driftsekonomi är inte undersökt. AC-aggregat för komfortkyla är tidigare inte kända för att vara effektiva.

T.J.ING

Rekommendationer och fortsatt arbete

De enkla rekommendationer som kan ges, är att alltid sträva efter att införa:

- Flytande kondensering
- Flytande förångning
- Bra dellastfunktion
- Om möjligt eliminera avfrostning

Detta leder naturligtvis till olika överväganden kring att komma runt de hinder, som har byggts in i befintliga anläggningar i livsmedelsbutiker. Från början köptes troligen den anläggning som var billigast möjliga. Det som då inte var med i leveransen ger nu hinder vid ombyggnation och åtgärder för energieffektivisering och att sänka driftskostnader för systemen. Dessa hinder måste gås igenom och beslut fattas om vad som skall göras, beroende på målsättningen för åtgärderna.

De nu befintliga mätsystemen i butiken borde kunna få producera mätdata (som kontinuerligt analyseras och slutrapporteras) under ett helt nytt kalenderår. Då kan den årliga besparingen i elbehov och minskning av kylbehov beräknas genom mätningar.

Det finns ett antal frågeställningar, som bör lösas för att få framtida ännu bättre kylsystem i livsmedelsbutiker:

- Införande av reglerfunktioner för kompressorstyrning, som tar hänsyn till kontinuerlig dellastfunktion i flera kompressorer. Det finns flera lösningar inom industrikylla med skruvkompressorer. Men de verkar vara okända inom butiksbranschen. Kompressorstyrningen i en chiller måste ofta samordnas med expansionsventilstyrningen.
- Riskanalys behöver göras för att hitta lösningar till om delar av butikens matvaror inte kan kylas vid haverier i kylsystemet. Påverkan på systemlösningar kan vara dubblering av funktion t ex pumpar eller uppdelning av kylbehov på mer än ett aggregat. I en butik finns stora värden i matvaror, som kan gå förlorade om matvarorna blir förstörda pga. av bristfällig kyla. System får inte konstrueras så att enskilda komponentfel kan ge totalhaverier av all kyla. Helst skall det finnas någon enkel uppbackning, reservlösning, för alla enskilda händelser.
- LCC-jämförelse (livscykelkostnadsjämförelse) mellan transkritiska CO₂-kylsystem och andra i framtiden tänkbara kylsystem inklusive värmeåtervinning för befintliga svenska butiker. Data från mätningar i verkliga existerande system finns inte idag.
- Vilka alternativa köldmedier inklusive brännbara medier finns för befintliga svenska butiker, när F-gasförordningen skärps? Vilka krav ställer detta på installation och installatör?
- Införande av pumpad CO₂ även för kyltemperaturer. När pumpad CO₂ infördes på tidigt 1990-tal var det bara i fryssystem. Då fanns det inga komponenter för de högre tryck, som krävs med CO₂ vid kyltemperaturer. Idag finns dessa komponenter. Lösningen med pumpat medium, som kokar och kondenserar, anses inom industrilösningar vara väsentligt mer ekonomiskt än butikernas vanliga DX-system. Det behövs mer tydliga LCC-jämförelse mellan pumpade CO₂-system, där CO₂ är i två faser jämfört med DX-system med termostatiska expansionsventiler. Jämförelse ska vara baserad på uppmätta data utförda i fält i befintliga butiker.

Litteraturreferenser

- [1] Landfors Kristina et al; Energieffektivisering i livsmedelsbutiker, Ö-net, Örebro, april 2000, 74 sidor
- [2] Axell Monica, Vertical cabinets in supermarkets, PhD Thesis, Chalmers Göteborg, dec 2002, 254 sidor
- [3] Lindberg Ulla et al, Supermarkets, indoor climate and energy efficiency – field measurements before and after installation of doors on refrigerated cases, Conference Proceedings, 12th International Refrigeration and Air Conditioning Conference, Purdue, USA 2008
- [4] Arias Jaime et al, Effektivare Kyla, KTH, 2004, 87 sidor
- [5] Marigny John, Analysis of simultaneous cooling and heating in supermarket refrigeration systems, KTH, 2011, 76 sidor
- [6] U. Lindberg, M. Axell, P. Fahlén (2010), Vertical display cabinets without and with doors – A comparison of measurement in a laboratory and in a supermarket, Conference IIR, Sustainability and the Cold Chain, Cambridge, 2010, 8 pages



FAKTARUTA OM BELIVS

Energimyndigheten startade Belivs 2011, Projekt 35667-1, Dnr 2011-005756. Belivs uppdrag är att vara en objektiv part och att driva utvecklingsprojekt med energieffektivisering och miljöfrågor som gemensamma nämnare bland sina medlemmar i deras fastigheter. Resultaten och erfarenheterna av projekten publiceras som rapporter på www.belivs.se och är kostnadsfria att ta del av. Alla bolag i branschen, även de som inte är medlemsföretag, kan därför dra nytta av Belivs arbete.

Varför Belivs? En stor andel elenergi används i butiker och livsmedelslokaler. Belivs uppgift är att skynda på utvecklingen mot energieffektivare livsmedelslokaler genom att driva utvecklingsprojekt. Projekten handlar om att visa att och hur energieffektiv teknik och energieffektiva system fungerar i verkligheten tillsammans med medlemmarna. En lika viktig uppgift är att föra ut erfarenheter från projekten till resten av branschen som är kopplade till livsmedelslokaler.

Belivs skall hjälpa Sverige att nå de energimålen som är uppsatta. Belivs mål är att få ut energieffektiva system och produkter tidigare på marknaden. Parallellt med en ökad energieffektivitet skall utvecklingsprojekten också förbättra eller bibehålla verksamheten och inomhusmiljön i lokalerna och vara ekonomiskt lönsamma. Det är viktigt att produkter och system som det investeras i är kostnadseffektiva.