

Appetitvækker

Derhjemme afrimer vi fryseren 1-2 gange om året. I supermarkeder bliver der afrimet flere gange om dagen...

Omkring halvdelen af energien til køle- og frostmøblerne i et supermarked bliver brugt på at danne rim og kondens* – det er immervæk en hel del, når man tænker på, at rim kun er til besvær.

Hvis vi kan finde en måde, så der bliver dannet mindre rim, vil der kun spares en masse energi og samtidig vil de varer, der ligger på frost og køl i supermarkederne, ikke blive udsat for så mange og så store temperatursvingninger.

I dette projekt har vi undersøgt to forskellige metoder til at reducere rimdannelsen på fordamperne.

Vi har sammenlignet rimdannelsen ved tre forskellige reguleringsstrategier for frost- og kølemøblerne. De giver forskellige temperaturvariationer både over tid og henover fordamperen. Da fordampertemperaturen er essentiel for rimdannelsen vil reguleringsstrategien have indflydelse på rimdannelsen, også selvom varenes temperatur stort set ikke variere.

Vi har undersøgt hvilken indflydelse omgivelsernes temperatur og luftfugtighed har på dannelsen af rim på fordamperne i køle- og frostmøbler. Ideen er, at det måske bedre kan betale sig at fjerne en del af luftens fugtighed i supermarkedets klimaanlæg, frem for at det sker i køle- og frostmøblerne.

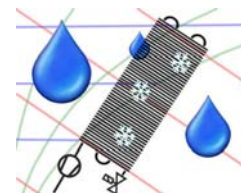


Begge metoder er undersøgt ved forsøg og ved simuleringer.

I et klimakammer har vi opbygget en lille del af et supermarked; der er en frostgondol og en kølereol med tilhørende køleanlæg (placeret uden for klimakammeret). Klimakammeret sikrer stabile omgivelser for kølemøblerne under forsøgene og gør det muligt at lave forsøg ved forskellige temperaturer og luftfugtigheder. En computer sørger for, at der automatisk bliver skiftet mellem tre forskellige reguleringsstrategier for kølereolen og frostgondolen, så der for hver tilstand i klimakammeret er målinger for alle de tre reguleringsstrategier.

Forsøgene er suppleret med simuleringer, hvor tiltagenes betydning for energiforbruget lettere kan sammenlignes.

* Ifølge erfaringer fra Knudsen Køling



Appetizer

At home, we normally defrost our freezer once or twice a year. In supermarkets, defrosting is done several times a day...

Approximately half of the energy consumption for cold-storage is used to build up frost on the evaporators* – that is a lot, considering that the frost only causes problems.

Finding a way to reduce the frost on the evaporators holds a great energy saving potential and further more the frozen and cooled food will not be exposed to as many and as high temperature variations, which will improve the food quality.

In this project, we have investigated two different methods for minimizing the frost on the evaporators.

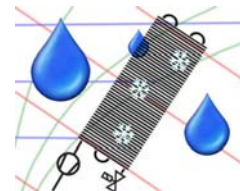
We have compared the build up of frost on the evaporators for three different regulations strategies of the evaporators. The strategies give different temperature variations both over time and over the evaporator. As the evaporation temperature is essential for the frost building, the regulation strategy will influence the frost building, even if the food temperature hardly varies.

We have investigated how the surrounding temperature and humidity affect the frost building on the evaporators. The idea is that it might be worth reducing the humidity of the air in the climate system instead of doing it in the cold storage.

Both methods have been examined both by experiments and by simulations. In a climate chamber we have build up a small part of a supermarket; there is a frost case and a cooling display connected to a refrigeration system (placed outside the climate chamber). The climate chamber keeps stabile condition for the furniture during the tests and makes it possible to do tests at different temperature and air humidity conditions. A computer changes the regulation strategy of the evaporators, so that for each condition in the climate chamber, we have measurements for all the three regulation strategies.

The experiments are complemented with simulations in order to compare the energy consumptions.

* Experiences from Knudsen Køling



Forord

Dette er afslutningsrapporten for PSO-F&U projekt 337-1111, Energoptimal håndtering af luftens fugtighed i et supermarked. Projektet er udført i perioden fra 1. februar 2005 til 31. marts 2007.

Projektet er udført med støtte fra ELFOR og som et samarbejde mellem: MEK-DTU, IPU, Danfoss og Knudsen Køling.

IPU har været projektleder og har stået for udførelsen af forsøgene i samarbejde og med sparring fra MEK-DTU, som også har lagt forsøgsfaciliteter til. Danfoss har leveret de fleste komponenter til forsøgsanlægget herunder alt til regulering og dataopsamling på forsøgsopstillingen og har desuden hjulpet ved dimensioneringen af anlægget. Knudsen Køling har leveret kølemøblerne til opstillingen og har sørget for samling af anlægget.

En stor tak til alle projektdeltagerne for et godt samarbejde og til ELFOR for at gøre det økonomisk muligt at undersøge mulighederne for reduktion af pårimningen på fordampere i supermarkeder.

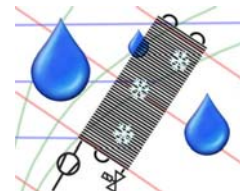
Projektansvarlig virksomhed:

Instituttet for Produktudvikling, IPU, Området for Køle- og Energiteknik

Nils Koppels Allé, bygning 402

2800 Kgs. Lyngby

CVR-nr: 11888933



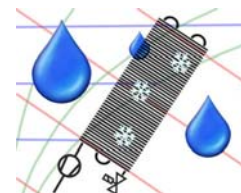
Læsevejledning

Det er valgt at opbygge rapporten du sidder med i hånden på en måde, så det er muligt at læse rapporten fra ende til anden eller plukke i det man føler har særlig interesse.

Formålet med projektet og konklusionen er trukket frem til den forreste del af rapporten, og herfra bliver det mere detaljeret når man læser sig ind i rapporten.

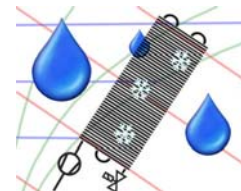
Konklusionen er gentaget til sidst i rapporten.

Rapportens dele er markeret med farver som gør det lettere at navigere i rapporten.



Indholdsfortegnelse

Appetitivækker	1
Appetizer	2
Forord	3
Læsevejledning	4
Indholdsfortegnelse	5
Konklusion	6
Formål med projektet	7
Hvorfor dannes der rim og hvordan reducerer vi det?	7
<i>Optimal regulering af fordamperne og sænkning af fugtindholdet i rumluften</i>	8
Forsøg	10
<i>Forsøgsresultater</i>	10
<i>Sensibel og latent belastning af fordamperne</i>	13
<i>Forsøgsopstilling</i>	13
<i>Forsøgsudførelse</i>	18
Simuleringer og beregninger	24
<i>Simuleringsresultater – Reguleringsstrategi</i>	24
<i>Simuleringsresultater – Fugtstyring</i>	25
<i>Baggrund for simuleringer og beregninger - Reguleringsstrategi</i>	29
<i>Baggrund for simuleringer og beregninger - Fugtbalance</i>	31
Konklusion	35
Hvordan kan der arbejdes videre med emnet af andre og med den etablerede forsøgsopstilling	36
Projektervaluering	36
Nomenklaturliste	37
Appendiks	38
<i>Projektgruppen</i>	38
<i>Kalibrering</i>	39
<i>Forsøgsoversigt</i>	40
<i>Studenterprojekt om kantvarme på kølemøbler</i>	43

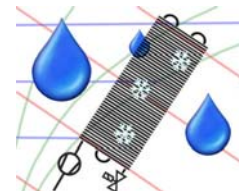


Konklusion

Det er muligt at mindske pårimningen på fordamperne i kølereoler og frostgondoler ved at sænke luftfugtigheden i supermarkedet. Når den absolutte luftfugtighed kommer under 4-5 g/kg dannes der ingen eller kun meget lidt rim på fordamperne, viser forsøgene i klimakammer. Et fugtindhold på 4-5 g/kg svarer til en relativ luftfugtighed på ca. 30% ved en lufttemperatur på 20°C. Målinger fra et supermarked i Løgumkloster (leveret fra Danfoss) over en periode fra midten af marts 2002 til slutningen af juni 2002 viser at middelværdien af luftfugtighed i butikken (målt over køle- og frostmøblerne) i åbningstiden er under 6 g/kg 34% af tiden og under 8 g/kg 87% af tiden. Der er altså ikke langt ned til en fugtighed der stort set ikke vil give pårimning på fordamperne.

Ud fra korrelationerne mellem fugtindhold i luften og pårimning af fordamperne fundet ved forsøgene er der opstillet en fugtbalance for et supermarked, som viser at det økonomisk og energimæssigt isoleret set ikke kan betale sig at fjerne fugten med et klimaanlæg, idet der bruges mere energi til affugtning i et klimaanlæg end der spares på køle- og frostmøblerne.

Forskellige reguleringsstrategier for fordamperne i køle- og frostmøbler giver anledning til forskellig pårimning af fordamperne. Af de tre reguleringsstrategier der er undersøgt, fandt vi ud af, at fordampertryksregulering giver anledning til mindst pårimning, både for frostgondolen og kølereolen. Effekten er størst for kølereolen, hvor mængden af rim og kondens er størst. Beregningerne viser, at besparelsen i kuldeydelse på fordamperen ved at benytte fordampertryksregulering frem for on-off-regulering er ca. 2% alene pga. mindre pårimning. Da fordampertryksregulering giver mulighed for at hæve sugetrykket til kompressoren kan besparelsen komme op på 17,5%.



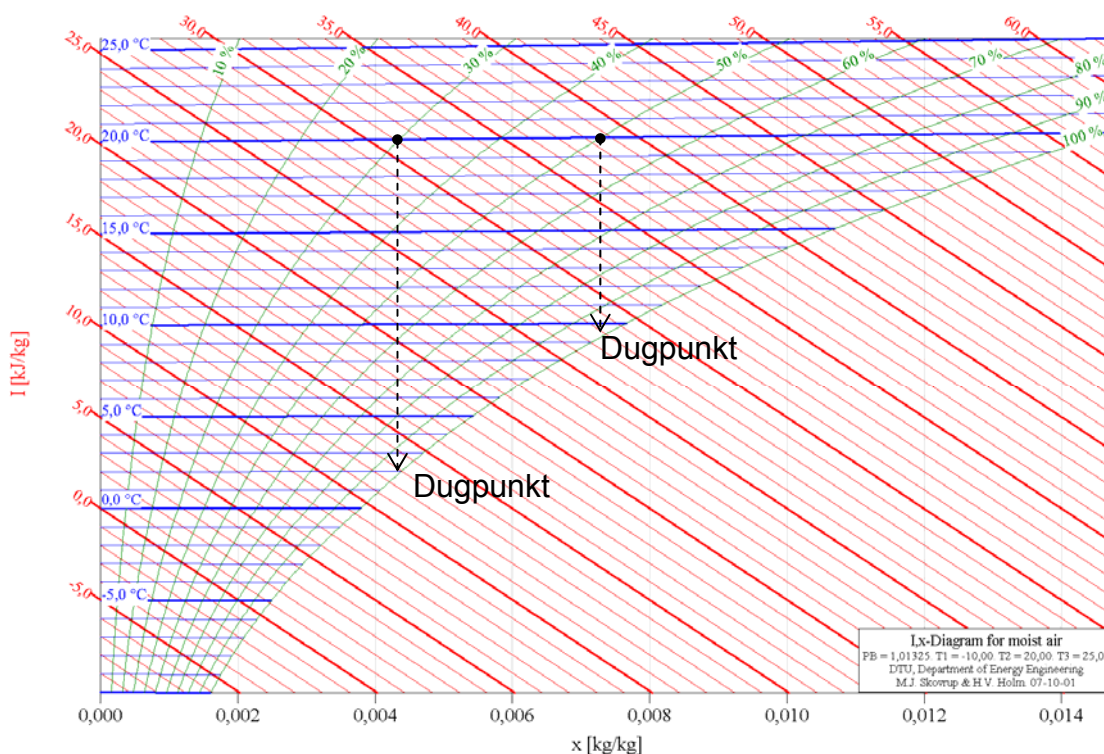
Formål med projektet

Projektet har til formål at undersøge betydningen af fordampernes reguleringsstrategi og af ændringer i indeklimaet (luftens temperatur og fugtighed) i et supermarked på dannelsen af kondens og rim på fordampere i køle- og frostmøbler. Undersøgelserne har både foregået som praktiske forsøg og som simuleringer.

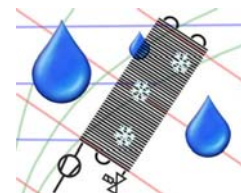
Rim- og kondensdannelsen på fordampere er u hensigtsmæssig idet, det koster energi at danne rim/kondens, rim virker isolerende, hvorved varmeoverførslen til kølemidlet mindskes, og rim bremser luftstrømmen gennem fordampere. Derfor afrimes fordampere med jævne mellemrum. Afrimning af fordampere sker ved at hæve temperaturen på fordampere over frysepunktet, således rimen kan løbe af som vand. Målet for dette projekt er at minimere udkondenseringen af vand og rimdannelse på fordampere i køle- og frostmøbler i supermarkeder, da det koster energi, samtidig med at temperaturstigningen i forbindelse med afrimningerne ikke er hensigtsmæssige for de madvarer, der opbevares i møblerne.

Hvorfor dannes der rim og hvordan reducerer vi det?

Der dannes kondens fordi temperaturen på fordampere overflade kommer under dugpunktet for den luft, der passerer fordampere. Er fordampere overflade under nul vil kondensen sætte sig på fordampere som rim.



Figur 1 Ved en rumtemperatur på 20°C vil en relativ luftfugtighed på 50% give et dugpunkt på ca. 9°C, mens dugpunktet er nede på ca. 2°C hvis den relative luftfugtighed reduceres til 30%.



Hvis vi enten kan hæve fordamperens temperatur over luftens dugpunkt eller sænke luftens dugpunkt til under fordamperens overfladetemperatur, vil der ikke dannes kondens og dermed heller ikke rim.

At hæve fordamperens overfladetemperatur er naturligvis begrænset af, at luften stadig skal køles ned til et vist niveau, men afhængig af reguleringsstrategi kan nedkølingen ske ved forskellige temperaturvariationer over tid og henover fordamperen. En optimering af reguleringsstrategien kan give lavere pårimning på fordamperne.

En sænkning af dugpunktet for luften, der passerer fordamperen, kan enten ske ved at begrænse infiltrationen af rumluft til kølemøblet og/eller ved at minimere fugtindholdet i den infiltrerede luft.

En effektiv måde at minimere infiltrationen er at benytte låg og døre på køle- og frostmøblerne. Mange mindre butikker benytter sig af dette, mens man i større supermarkeder vægter tilgængeligheden til varerne for flere kunder ad gangen højere. Det gode ved de løsninger, der skal minimere infiltrationen, er, at der også spares energi ved, at der ikke skal køles så meget. Alt infiltreret luft skal nemlig både affugtes og nedkøles.

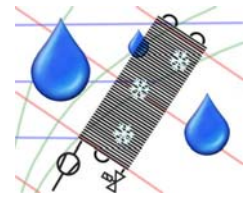
I det daglige betyder overstabling af varer en øget infiltration og dermed en forøgelse af mængden af rim, der dannes på fordamperne.

En sænkning af luftfugtigheden i supermarkedet vil betyde, at luftinfiltrationen til køle- og frostmøblerne har mindre betydning. Det kan evt. vælges kun at affugte den del af ventilationsluften som blæses ind i den del af butikken, hvor der er frost- og kølemøbler. Lidt på samme måde som man gør det i frugt- og grøntafdelingerne, hvor der konstant holdes en højere luftfugtighed end i resten af butikken. Det kan her indskydes, at det er en dårlig ide at placere disse to afdelinger for tæt på hinanden, da man risikerer, at alt den fugt man tilfører ved grøntsagerne hurtigt sætter sig som rim på de nærmeste fordampere og blokerer dem.

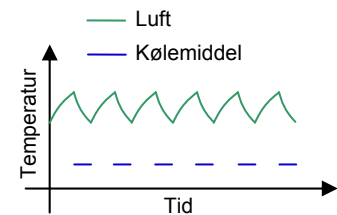
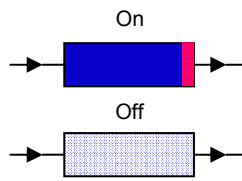
Optimal regulering af fordamperne og sænkning af fugtindholdet i rumluften

I dette projekt har vi valgt at gå i dybden med at undersøge hvilken betydning det har for pårimningen på fordamperne, hvilken reguleringsstrategi man benytter for fordamperne, og hvor langt man kan nå ved at mindske fugtindholdet i omgivelserne.

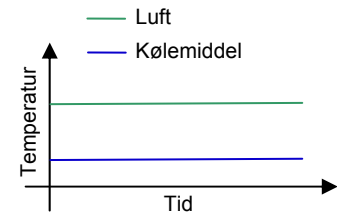
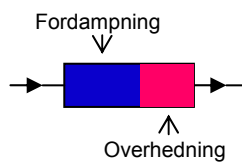
Temperaturen i køle- og frostmøblerne reguleres efter et ønsket sætpunkt, ved at styre kølemiddeltilførslen til fordamperen. Der ses på tre temperaturreguleringsstrategier: On-off-regulering, overhedningsregulering og fordampertryksregulering.



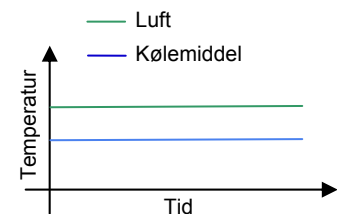
- Ved on-off-regulering åbnes og lukkes der for tilførslen af kølemiddel til fordampere afhængig af behovet for køling. Kølemidlet fordampes ved konstant tryk og overhedningen minimeres.



- Ved overhedningsregulering reguleres lufttemperaturen i kølemøblet ved at variere overhedningen i fordampere, det vil sige man varierer på, hvor stor en del af fordampere man benytter. Der lukkes hele tiden kølemiddel ind i fordampere, mængden af kølemiddel varieres i forhold til behovet for køling. Fordampningen sker ved konstant tryk.

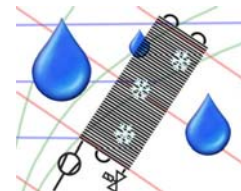


- Ved fordampertryksregulering reguleres lufttemperaturen i kølemøblet ved at styre fordampningstrykket og dermed fordampningstemperaturen, mens overhedningen minimeres.



Skitserne viser fordampere set fra kølemiddelsiden og temperaturen af kølemidlet og luften i kølemøblerne som funktion af tiden ved de forskellige reguleringsstrategier.

Ved hjælp af et klimakammer udføres forsøg med forskellige tilstande for omgivelserne (temperatur og luftfugtighed) for at undersøge, hvordan sammenhængen med pårimning er. Med beregninger og simuleringer undersøges det, om det er økonomisk og energimæssigt rentabelt at sænke luftfugtigheden i et supermarked.



Forsøg

En stor del af projektet har omhandlet forsøg på DTU, hvor der er opbygget en forsøgsopstilling med en kølereol og en frostgondol inde i et klimakammer, hvor luftens temperatur og fugtighed kan reguleres. Opstillingen giver mulighed for at udføre forsøg ved forskellige, stabile tilstande for luften (temperatur og fugtighed) i kammeret og med forskellige reguleringsstrategier for de to kølemøbler.

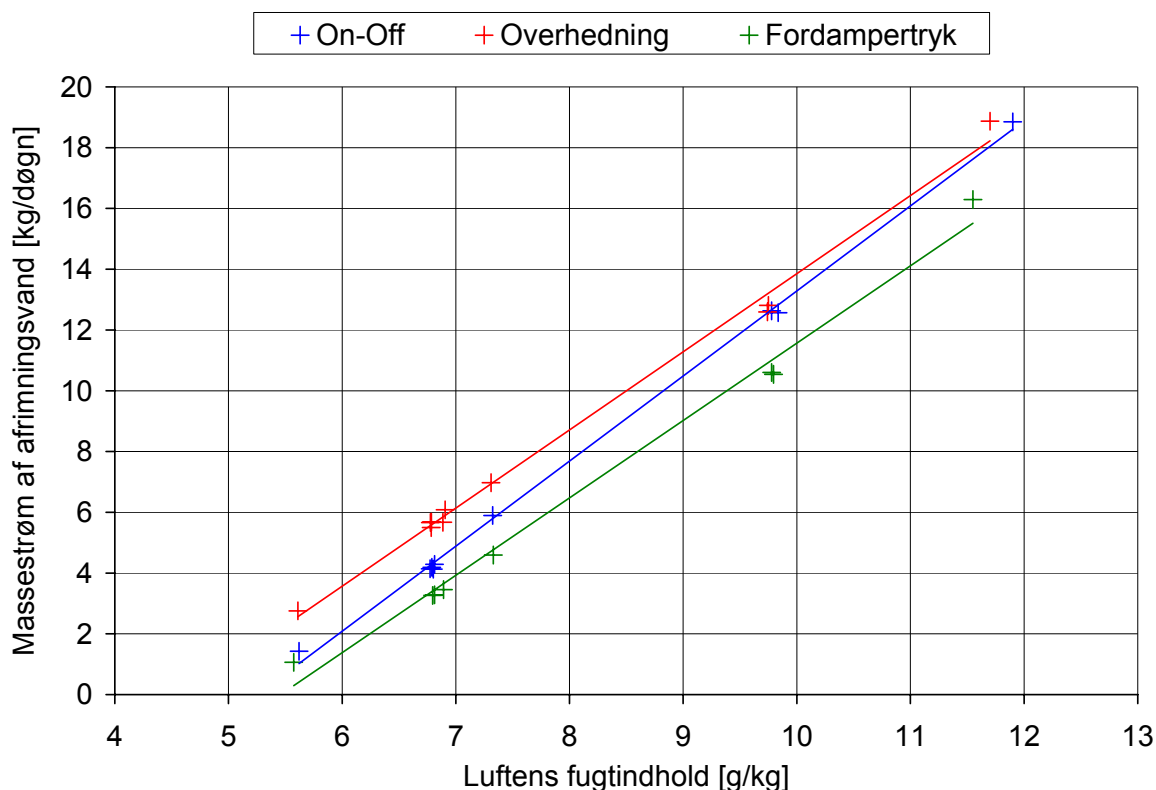
I dette afsnit gennemgås først resultaterne af forsøgene og derefter kommer mere detaljerede beskrivelser af forsøgsopstilling og -udførelse. Data for forsøgene findes bagerst i rapporten.

Forsøgsresultater

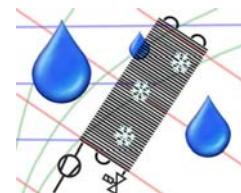
De primære resultater fra forsøgene er mængden af rim, der er dannet på fordampere ved de forskellige forhold. Ved at plote mængden af rim i forhold til den absolutte fugtighed i omgivelserne får vi nogle tydelige sammenhænge frem, specielt for kølereolen.

Kølereolen

I Figur 2 er mængden af afrimningsvand fra kølereolen plottet i forhold til det absolutte fugtindhold af luften i klimakammeret. Resultaterne er angivet med farver i forhold til hvilken af de tre reguleringsstrategier er kørt med i forsøget.

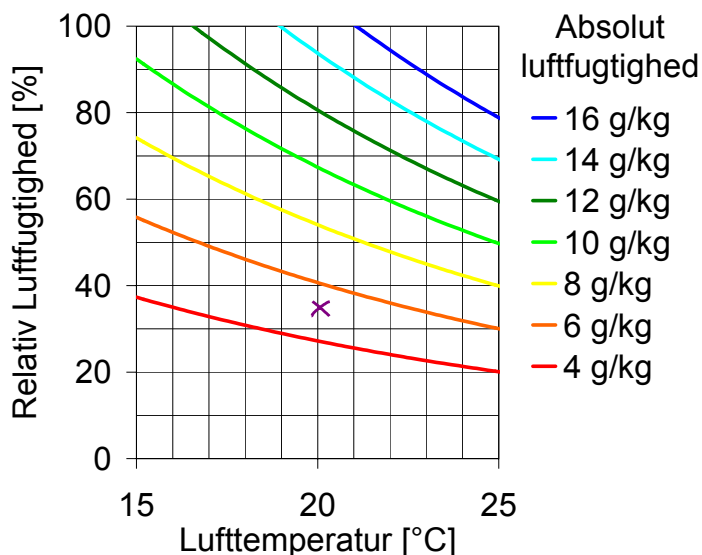


Figur 2 Der er en tydelig, lineær sammenhæng mellem mængden af rim/kondens, der dannes på kølereolens fordampere, og fugtigheden af luften i klimakammeret. Reguleringsstrategierne giver forskellige niveauer for rimmængden, der dannes.



Der er en helt tydelig sammenhæng mellem den absolutte luftfugtighed i klimakammeret og mængden af rim, der sætter sig på fordamperen i kølereolen. For hver af de tre reguleringsstrategier kan man tegne en ret linje mellem punkterne og målepunkterne deler sig meget fint op i forhold til hvilken reguleringsstrategi, der er benyttet for fordamperen.

Hvis vi først ser på sammenhængen mellem rimmængden og fugtindholdet i luften så ser vi en lineær sammenhæng, hvor linjerne ville krydse x-aksen ved ca. 5 g/kg. Dvs. at hvis fugtindholdet i supermarkedet kommer ned på ca. 5 g/kg vil der ikke blive dannet rim på fordamperne, lidt afhængig af hvilken af de tre reguleringsstrategier man benytter. I Figur 3 kan man se, at et fugtindhold på 5 g/kg svarer til en relativ luftfugtighed på knap 35% ved en temperatur på 20°C, hvilket er realistisk at have i et supermarked hovedparten af året. I de varme sommermåneder vil man formentlig have lidt højere temperatur og luftfugtighed.

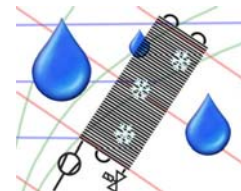


Hældningen på kurverne i Figur 2 viser, hvor stor stigningen i pårimning bliver ved en forøgelse af luftfugtigheden i

supermarkedet. Hældningen vil i høj grad afhænge af luftinfiltrationen til møblet fra omgivelserne. Eftersom forsøgene her er gennemført med natgardinet trukket ned, vil der formentlig være større infiltration og dermed større hældning på kurverne i drift i butikkens åbningstid. Der vil dog formentlig være nogenlunde samme skæring med x-aksen, da et absolut fugtindhold på 5 g/kg svarer til et dugpunkt på knap 4°C, evt. vil den være lidt lavere når infiltrationen øges.

Figur 3 Forsøgene viser at rim undgås ved en absolut luftfugtighed på 5 g/kg. En absolut fugtighed på 5 g/kg svarer til en relativ luftfugtighed på ca. 35% ved en lufttemperatur på 20°C.

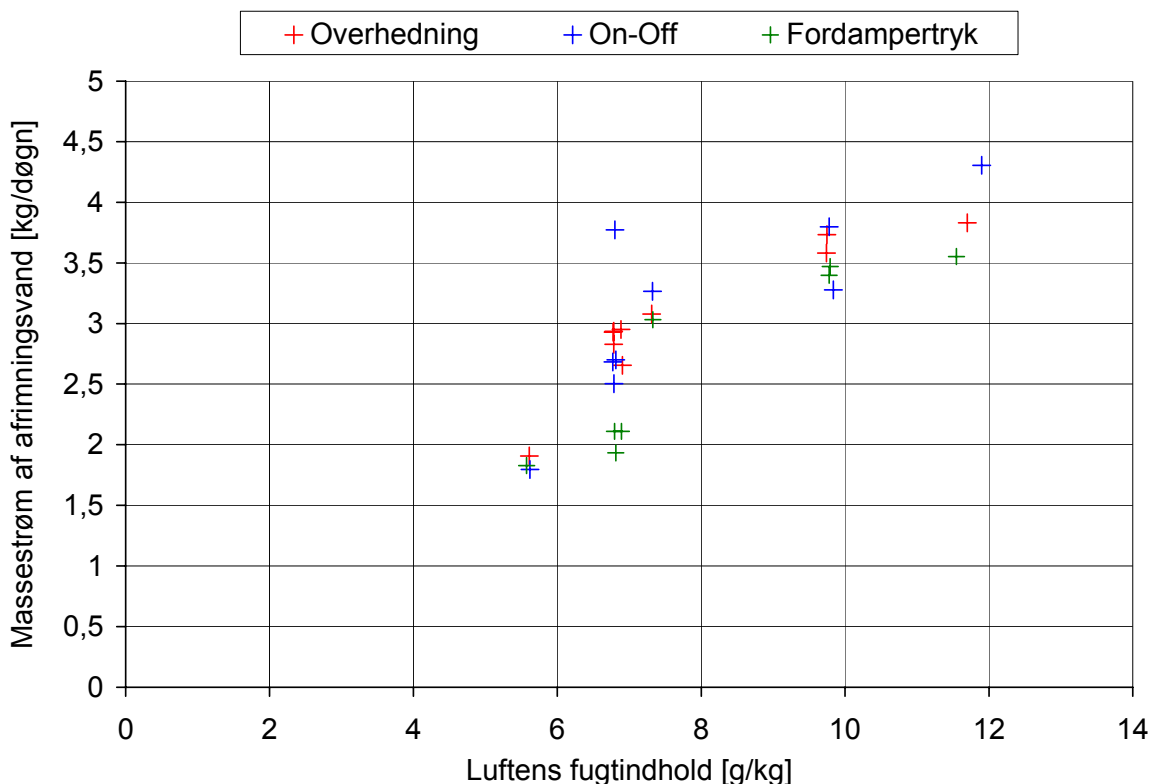
Reguleringsens betydning ses ved, at målepunkterne for de tre reguleringsstrategier deler sig pænt op. Ved at vælge at regulere lufttemperaturen i kølereolen ved at styre fordampningstrykket for kølemidlet i fordamperen, er det muligt at opnå en mindre pårimning, end med de to andre reguleringer. I alle målepunkterne er det fordampetryksreguleringen, der giver den laveste pårimning af fordamperen, derefter kommer on/off-regulering, mens overhedningsregulering giver den største pårimning. Dette skyldes formentlig, at temperaturen af fordamperen er højest for fordampetryksregulering. Ved on/off-regulering er der i on-tilstanden en temperatur, der vil være lavere og dermed vil der kunne sætte sig rim, men da der hele tiden åbnes og lukkes for kølemidlet vil varmekapaciteten i rør og finner betyde at temperaturen ikke bliver meget lav, selv i on-tilstanden. Den største pårimning sker ved overhedningsregulering. Ved overhedningsregulering justere man kuldeydelsen ved at benytte en større eller



mindre del af fordamperen til fordampning af kølemiddel, mens der i resten af fordamperen er overhedning. Temperaturen i fordamperen er ikke jævn, ved indløbet til fordamperen vil der være koldt og ved udløbet varmere. De kolde områder på fordamperen forbliver kolde og dermed kan der opbygges rim.

Frostgondolen

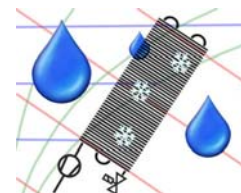
Luftinfiltrationen i frostgondolen er anderledes end i kølereolen fordi åbningen er vandret og temperaturforskellen til omgivelserne er højere. Det giver en klart lavere infiltration og en anderledes sammenhæng med fugtindholdet i omgivelsernes. I Figur 4 er målepunkterne for frostgondolen plottet i forhold til den absolutte luftfugtighed i omgivelserne, dvs. i klimakammeret.



Figur 4 I frostgondolen er sammenhængen mellem luftens fugtindhold og mængden af rim på fordamperen mere ulinear. Med fordampertryksregulering opnås der mindst rim på fordamperen.

Sammenhængen mellem pårimning og den absolutte luftfugtighed i klimakammeret er ikke så klar for frostgondolen, som vi så det for kølereolen, hvilket bl.a. kan skyldes, at massestrømmen af afrimningsvandet er mindre og dermed vil måleusikkerheder slå mere igennem. Derfor er det valgt ikke at lægge linjer / kurver ind i diagrammet.

Man fornemmer en mere ulinear sammenhæng mellem luftens fugtindhold og mængden af rim, der dannes på fordamperen i forhold til, hvad vi så for kølereolen. En kurve mellem punkterne kunne se ud til at skære x-aksen ved et absolut fugtindhold på ca. 1 g/kg, hvilket svarer til et dugpunkt på ca. -15°C og en relativ luftfugtighed på 7% ved 20°C .



Punkterne for de tre reguleringsstrategier ligger næsten oven i hinanden visse steder. On/off-reguleringen springer en del op og ned, hvilket vi ikke så for kølereolen. Der er dog en tendens til, at pårimningen ved fordampetryksregulering er lavere end for de to andre reguleringsstrategier.

Sensibel og latent belastning af fordamperne

Med udgangspunkt i målingerne af lufttemperaturen før og efter fordamperne er der foretaget overslagsberegninger i ligningsløserprogrammet Engineering Equation Solver (EES*) af bl.a. kuldeydelse og infiltrationen i møblerne.

Beregningerne viste at andelen af kuldeydelse, som går til udkondensering af vandet er stort set den samme for de tre reguleringsstrategier, nemlig ca. 10% for frost og 25% for køl, med en variation på $\pm 1\%$ -point.

Andelen af kuldeydelse som går til kondensering af vand, ligger en del lavere end de erfaringer de har hos Knudsen Køling (ca. 50%). Dette skyldes, at forsøgene er gennemført med nedrullet natgardin på kølereolen og et net henover frostgondolen. Det antages at forholdet mellem resultaterne også vil gælde for fuldt åbne kølemøbler.

Forsøgsopstilling

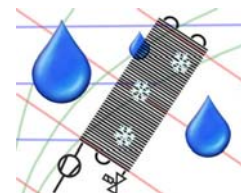
Forsøgsopstillingen består i hovedtræk af en frostgondol og en kølereol, med tilhørende fælles kølesystem opstillet i et klimakammer. På Figur 5 ses billeder af de to møbler i klimakammeret.



Figur 5 Til venstre ses kølereolen og til højre frostgondolen, som er brugt ved forsøgene.

For at skabe luftstrømninger i møblerne svarende til dem, der vil være, når de står i supermarkeder, er der fyldt "varer" i møblerne. I kølereolen består varerne af 63

* Se også nomenklaturliste bagerst i rapporten



blå plastikkasser og i frostgondolen er der lagt plader henover, som bevirker, at luften ikke kan strømme uhindret ned i selve møblet.

På billederne ses en del ledninger, der kommer ud af møblerne. Ledningerne stammer fra temperaturfølere (pt1000) og tryksensorer, som måler tilstanden af luften og kølemidlet til brug for regulering og dataopsamling.

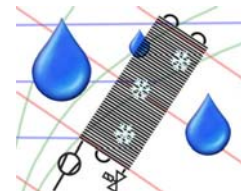
Under hvert af de to kølemøbler, ved afløbet for afrimningsvand, er der placeret en lille beholder med en pumpe. Når møblerne afrimes (hver 6. time) løber vandet ned i beholderen og pumpes ud af klimakammeret til to tønder, der er placeret på vejeceller. Herfra opsamles løbende data, hvorved mængden af rim, der er dannet på fordampere kan måles hver gang der afrimes. For kølereolen gælder dog at fordampere overfladetemperatur sjældent kommer under 0°C og derfor dannes der ikke rim på fordampere. Vanddampen i luften, der passerer fordampere, fortættes på overfladen og løber af fordampere, hvilket giver en mere konstant vandstrøm og egentlig betyder, at der ikke under alle driftstilstande er behov for afrimning.

På Figur 6 ses et billede af køleanlægget som er placeret udenfor klimakammeret.



Figur 6 Kølesystemet er opbygget meget kompakt og er placeret udenfor klimakammeret. I midten ses den blå kompressor, som kan køre med variabel hastighed ved hjælp af frekvensomformerer til højre i billedet.

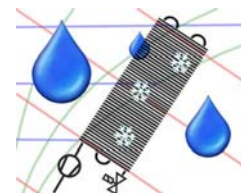
Køleanlæggets kompressor er med variabel hastighed. Hastigheden varieres i forhold til behovet for køling, således der holdes et konstant sugetryk. I et almindeligt supermarked vil der med stor sandsynlighed altid være behov for køling et eller andet sted i systemet, dermed vil kompressoren (eller kompressorpacken) sjældent stoppe helt. Da vi i forsøgsopstillingen kun har to møbler koblet til kompressoren, er der langt større sandsynlighed for, at der forekommer tidspunkter, hvor ingen af møblerne kalder på køling, hvilket vil betyde, at kompressoren stopper helt, og vil være nødt til at starte op, når der igen



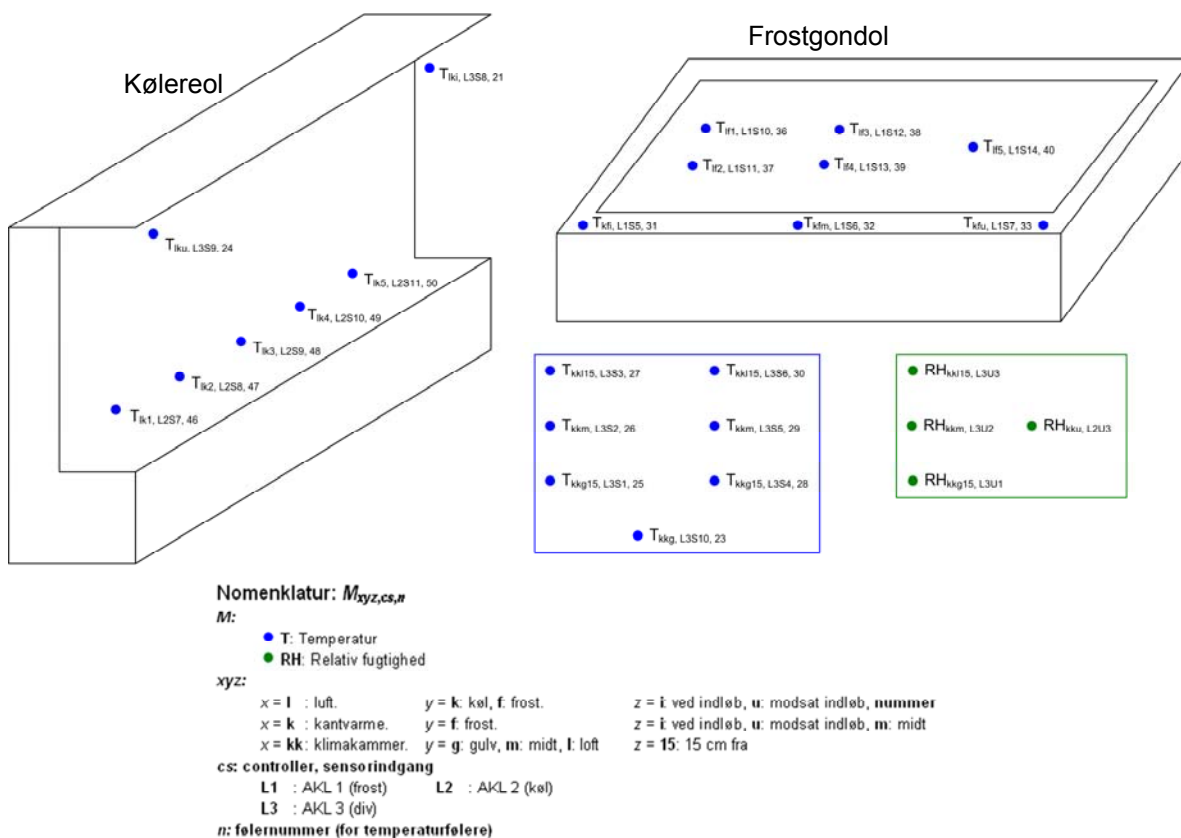
bliver behov for køling. Dette giver et mere ujævnt billede, end hvad man ville se i et supermarked, og for at undgå det er der sat en basisbelastning ind som udelukkende har til opgave at holde kompressoren i gang (ved lav hastighed). Dette er energiøkonomisk set ikke en optimal løsning, men nødvendig for at skabe forhold, der ligner virkeligheden i et supermarked.

Kondensatoren er en pladevarmeveksler, som har kølemiddel på den ene side og kølevand på den anden side. Det samme er gældende for basisbelastningen, som dermed bidrager til at køle kølevandet ned.

På Figur 7 ses systemdiagrammet for kølesystemet med placering af følere. I punkter markeret med rødt måles tryk og i punkter markeret med blå måles temperatur. Nogle målepunkter benyttes af regulatorerne i forbindelse med reguleringen af anlægget, disse er vist med en firkant, andre benyttes udelukkende til dataopsamling og er markeret med en cirkel.



Udover de målepunkter, der er direkte knyttet til kølesystemet måles kanttemperaturen på frostgondolen og lufttemperaturen flere steder i begge møblerne. Klimakammerets temperatur og luftfugtighed måles i tre højder over gulvet, for at være i stand til at registrere eventuelle lagdelinger. På Figur 8 ses placeringen af alle disse følere.

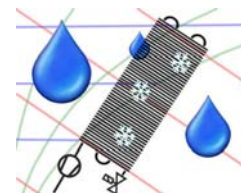


Figur 8 Placering af temperatursensorer og luftfugtighedssensorer i klimakammeret og i de to kølemøbler.

Mængden af kølemiddel i fordampere (køl, frost, basis og underkøling) styres vha. af AKV*-ventiler og tilhørende AKC*-controllere, mens trykket i fordampere (kun køl og frost) styres af ETS* - fasttryksventiler og tilhørende EKC*-controllere (leveret med speciel software). Ved at have reguleringsventiler både før og efter fordampere er det muligt at køre med tre forskellige reguleringsstrategier på de to kølemøbler.

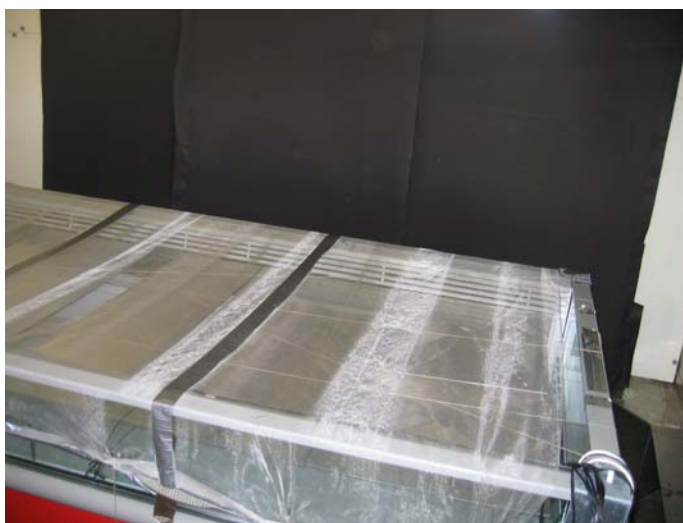
Massestrømsmålerne på kølemiddelsiden før frost- og kølefordampere er ikke blevet benyttet ved dataopsamling, fordi det viste sig ikke at være muligt at logge brugbare værdier, når der benyttes AKV-ventiler. Dette skyldes at AKV-ventilernes åbningsgrad reguleres ved, hvor stor en del af en 6 sekunders periode, de er fuldt åbne. Derfor åbner og lukker ventilerne en gang indenfor hver 6 sekunder, og gør det umuligt at gå ind og samle reelle data op f.eks. en gang i minuttet.

* Se nomenklaturliste bagerst i rapporten



Luftbevægelser i klimakammeret forårsagede på et tidspunkt så store forstyrrelser i lufttæppet på især frostgondolen, at fordamperen blokkede fuldstændig til og der blev målt temperaturer ind i fordamperen på knap 20°C. Nogle utætheder i kammeret blev tætnet og en rist blev dækket til, samtidig blev det valgt at benytte rullegardinet på kølereolen og at montere et net over frostgondolen for at mindske indflydelsen fra luftstrømningerne i klimakammeret. Dette giver formentlig mindre infiltration end hvad der ville forekomme i et supermarked i dagtimerne, men det vurderes at de relative forholde mellem rimmængden for de forskellige reguleringsstrategier er uforandret.

På Figur 9 ses møblerne med gardin og net.

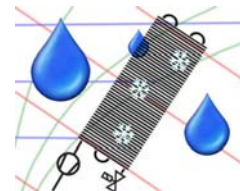


Figur 9 Møblerne som de er benyttet under forsøgene med gardin og net.

Forsøgsudførelse

Der er som tidligere nævnt kørt med tre forskellige reguleringsstrategier for fordamperne i de to møbler. Returtemperaturen (T_3) af luften i kølemøblerne reguleres som enten:

- On-off-regulering (termostatstyring)
AKV-ventilen åbnes, når der er behov for køling (CutIn), og lukkes, når der ikke er behov for køling (CutOut). Ventilens åbningsgrad reguleres af AKC-controlleren i forhold til at have minimal overhedning i fordamperen. Trykket i fordamperen holdes konstant af ETS-ventilen og EKC-controlleren.
- Overhedningsregulering (ΔT_{OH} -regulering, modulerende termostatregulering / tilpasset overhedning)
AKV-ventilen er hele tiden mere eller mindre åben. Hvis temperaturen i møblet stiger åbnes ventilen mere, hvorved overhedningen i fordamperen falder. Er temperaturen i møblet ved at blive for lav lukker ventilen mere og overhedningen stiger. Dermed udnytter man en større eller mindre del af fordamperen afhængig af kølebehovet.
Som ved on/off-regulering holdes fordampningstrykket konstant af ETS-ventilen og EKC-controlleren.



- Fordampertryksregulering (P_0 -regulering)
Lufttemperaturen i møblet reguleres ved at styre fordampningstrykket med ETS-ventilen og EKC-controlleren. Når behovet for køling stiger sænkes fordampningstrykket og omvendt.
AKV-ventilen og AKC-controlleren styrer efter at have minimal overhedning i fordamperen.

Der er gennemført et stort antal forsøg i klimakammeret med forskellige tilstande for indeklimaet. Med hver indeklimatilstand er der kørt med alle de tre reguleringsstrategier. For at undersøge reproducerbarheden af forsøgene er der ved visse af klimakammertilstandene gennemført mere end et forsøg for hver reguleringsstrategi. De viser, at der er en stor reproducerbarhed for forsøgene.

Der er kørt forsøg ved seks forskellige kombinationer af temperatur og luftfugtighed i klimakammeret. Alle tilstande, som det forventes, at man kan opleve i et dansk supermarked.

Når vi har kørt med de tre reguleringsstrategier, er der ikke opnået helt samme lufttemperatur ind i fordamperne. Så for at kunne sammenligne målingerne har vi kørt et par ekstra forsøg, hvor sætpunktet for fordamperne er hævet og ud fra de resultater har vi korrigeret vores resultater, så vi kan se hvordan det ville have set ud hvis der havde været opnået samme temperatur. Alle resultater vist tidligere i rapporten er korrigeret.

I forbindelse med den praktiske forsøgsudførelse er vi løbet ind i en række uforudsete problemer, der har forsinket projektet. Dette har bl.a. betydet, at der desværre kun har været få måneder til at gennemføre de endelige forsøg og ikke som håbet et helt år.

Forsøgsforløb

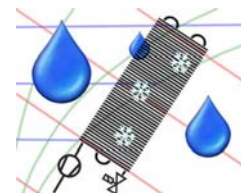
Forsøgene er gennemført ud fra følgende plan:

Når et forsøg startes, vælger man hvilken af de tre reguleringsstrategier, der skal benyttes først. Systemet starter derefter op med denne reguleringsstrategi på både frostgondol og kølereol.

Første gang klokken passerer 6⁰⁰, 12⁰⁰, 18⁰⁰ eller 24⁰⁰ begynder første måleperiode, som løber i 24 timer. Undervejs afrimes møblerne kl. 6⁰⁰, 12⁰⁰, 18⁰⁰ og 24⁰⁰, dvs. måleperioden indledes med en afrimning.

Efter 24 timer skiftes til den næste reguleringsstrategi, som får lov at svinge ind i 6 timer inden den næste måleperiode begynder. Indsvingningstiden benyttes bl.a. til at tømme de to tønder med afrimningsvand, ved at åbne for en magnetventil i bunden.

Denne cyklus med 6 timers indsvingning og 24 timers målinger gentages indtil man manuelt afbryder det. Dvs. systemet kan passe sig selv i længere tid, såfremt der ikke er behov for at ændre på indstillingerne af klimakammeret. Dermed har det været muligt at starte systemet op til en ferieuge, hvor systemet er nået igennem de tre reguleringsstrategier to-tre gange og der har vist sig en god reproducerbarhed for dataene.

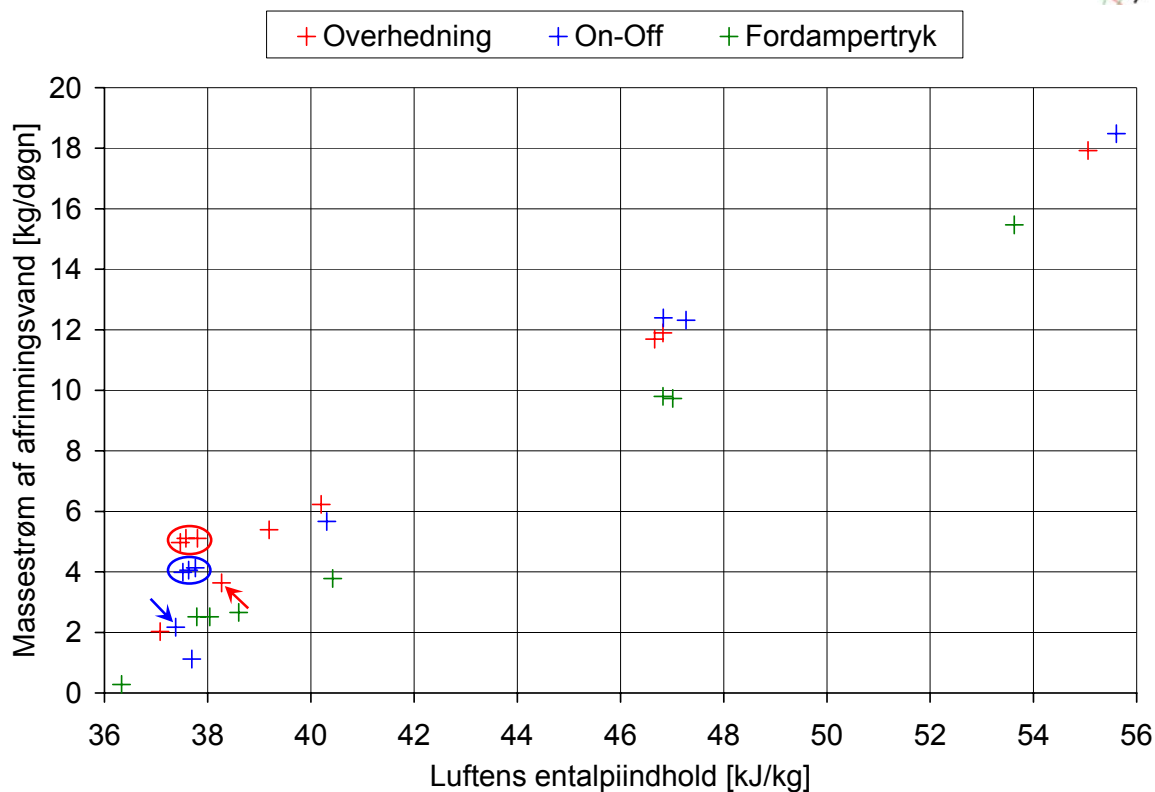
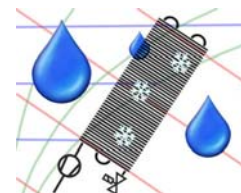


Alle parametre logges med 1 minuts interval.

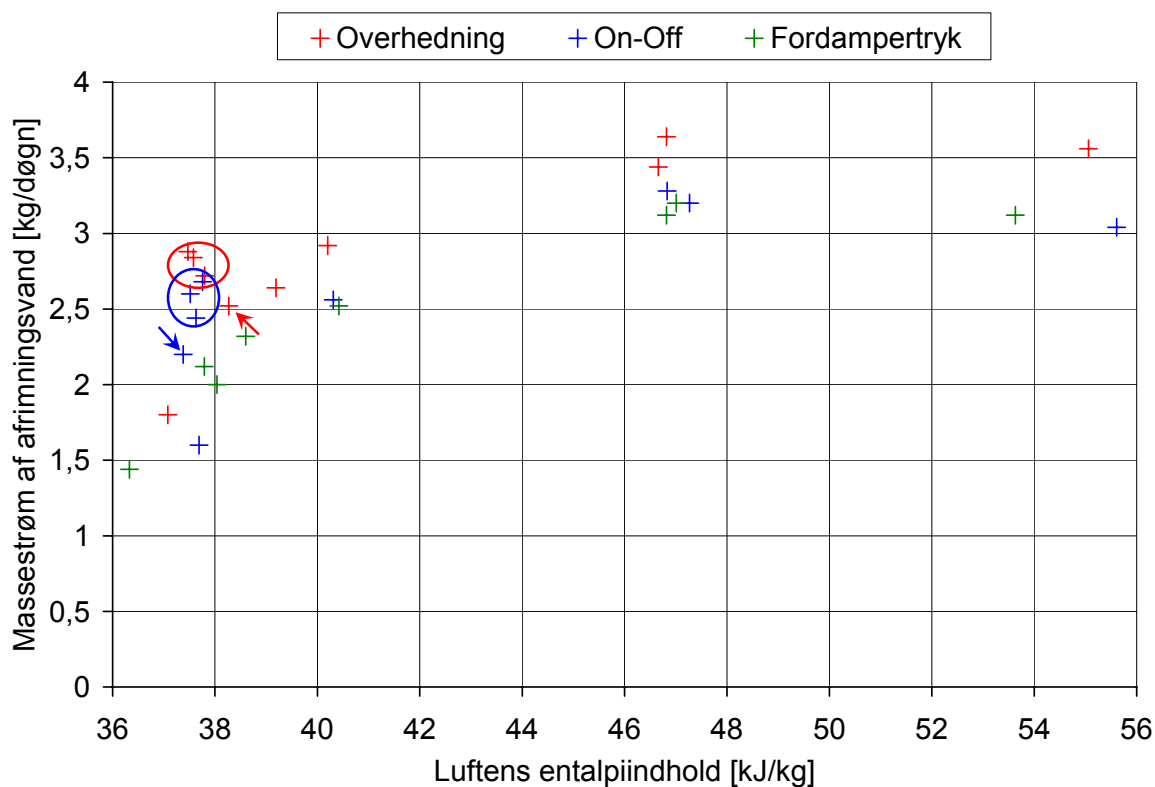
Korrektion i forhold til lufttemperaturen ind i fordampere

Lufttemperaturen før fordampere, T_3 , har ikke helt været den samme for de tre reguleringsstrategier. For at kunne sammenligne mængden af rim på fordampere for de tre reguleringsstrategier er det en forudsætning, at varerne i møblerne mærker samme (gennemsnits)temperatur og derfor er der kørt forsøg med ændret sætpunkt for derved at kunne korrigere afrimningsmængderne så de svarer til den samme lufttemperatur før fordampere. Ved udførelsen af forsøgene er klimakammeret desværre slået fra og vi har derfor kun data i et enkelt punkt for henholdsvis on/off- og modulerende termostat og ikke nogen for p_0 -regulering, desværre. Forsøgene med ændret sætpunkt er gennemført med samme tilstand af temperatur og luftfugtighed i klimakammeret, som der tidligere var udført gentagne målinger for, således der er flest mulig data at sammenligne med, hvor der har været samme entalpi af luften i klimakammeret.

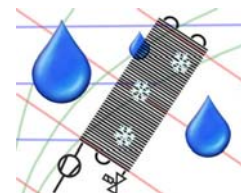
På Figur 10 og Figur 11 er massestrømmen af afrimningsvand fra kølereolen og frostgondolen optegnet som funktion af entalpiindholdet i luften i klimakammeret for alle de gennemførte forsøg. Med pil er markeret det punkt, hvor sætpunktstemperaturen har været hævet for henholdsvis on/off og modulerende termostat regulering. Der er desuden markeret hvilke punkter, der har samme entalpi. Ved at sammenholde mængden af afrimningsvand ved to forskellige sætpunkter for T_3 -temperatur, men ved samme entalpiindhold i luften i klimakammeret, fås en sammenhæng mellem T_3 -temperaturen og massestrømmen af afrimningsvand, ved konstant entalpi.



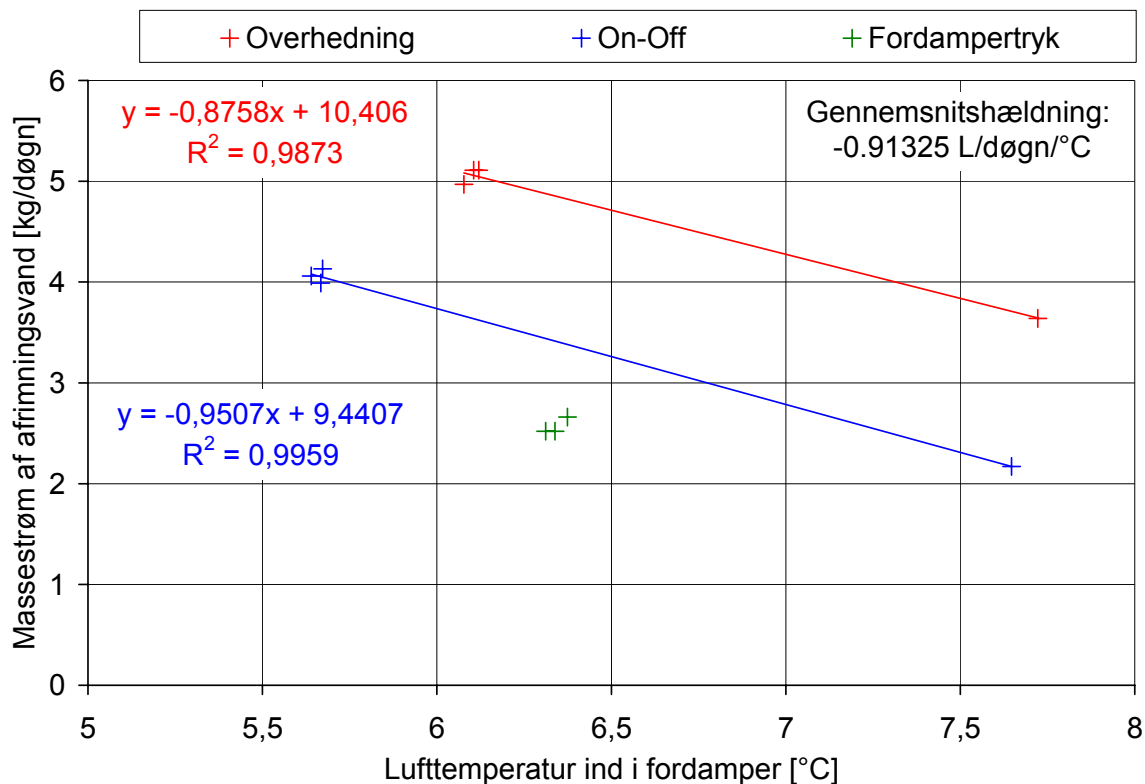
Figur 10 Massestrømmen af afrimningsvand fra kølereolen optegnet som funktion af entalpiindholdet i luften i klimakammeret. Massestrømmen er *ikke* korrigeret mht. T_3 .



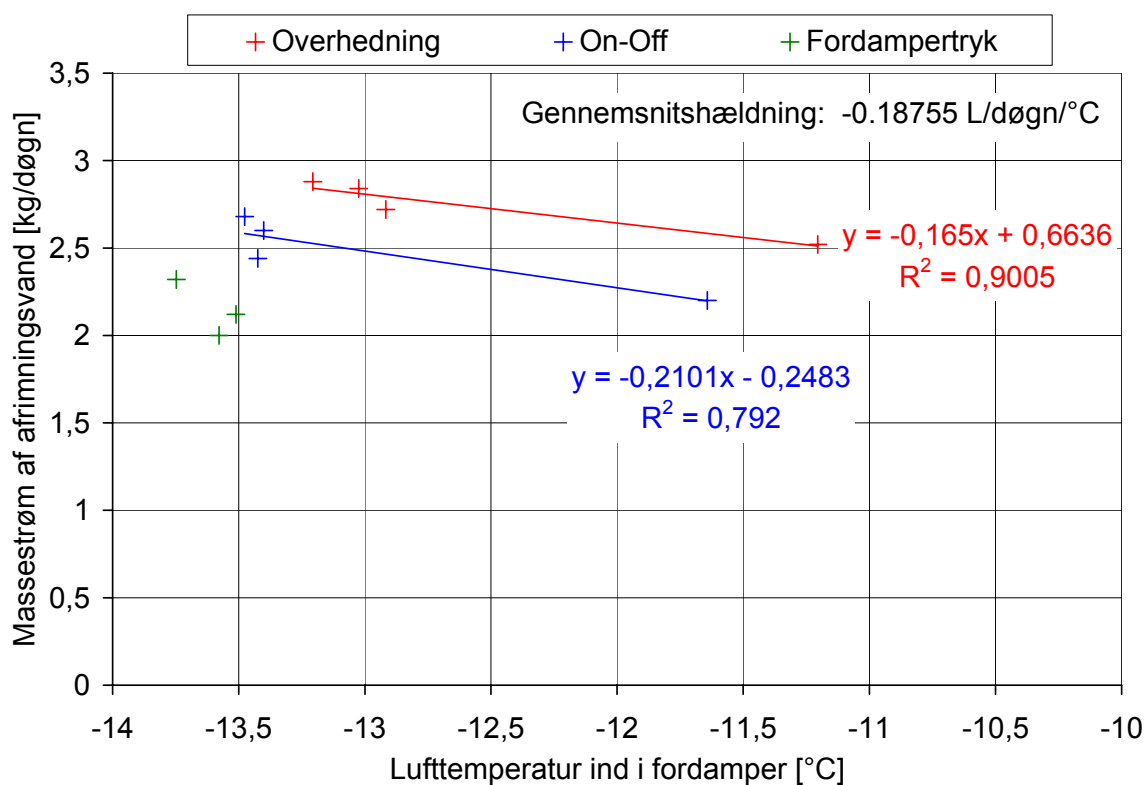
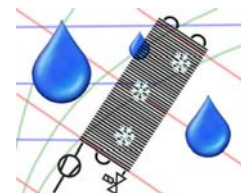
Figur 11 Massestrømmen af afrimningsvand fra frostgondolen optegnet som funktion af entalpiindholdet i luften i klimakammeret. Massestrømmen er *ikke* korrigeret mht. T_3 .



For de udvalgte punkter, med samme entalpiindhold af luften i klimakammeret, optegnes massestrømmen som funktion af den gennemsnitlige lufttemperatur ind i fordamperen, T_3 . Se Figur 12 og Figur 13.

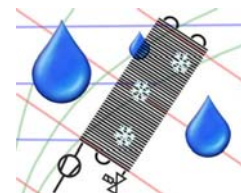


Figur 12 Massestrømmen af afrinningsvand fra kølereolen som funktion af lufttemperaturen ind i fordamperen, T_3 , ved konstant entalpiindhold af luften i klimakammeret.



Figur 13 Massestrømmen af afrimningsvand fra frostgondolen som funktion af lufttemperaturen ind i fordamperen, T_3 , ved konstant entalpiindhold af luften i klimakammeret.

Sammenhængen mellem massestrømmen af afrimningsvand og lufttemperaturen ind i fordamperen er optegnet lineært for henholdsvis kølereolen og frostgondolen. Da det ikke har været muligt at finde en sammenhæng for hver af de tre reguleringsstrategier er det i stedet valgt at benytte gennemsnittet for de to fundne til alle tre. Dermed bliver der en korrektion på $-0,91 \text{ L/døgn/}^\circ\text{C}$ for kølereolen og en korrektion på $-0,19 \text{ L/døgn/}^\circ\text{C}$ for frostgondolen. Ved korrektionen af den udkondenserede vandmængde er temperaturen ind i fordamperen korrigeret til henholdsvis $5,5^\circ\text{C}$ og $-13,5^\circ\text{C}$ for kølereolen og frostgondolen.



Simuleringer og beregninger

De primære resultater fra forsøgene har været mængden af rim eller kondens der er dannet på fordamperne. For at omregne dette til energiforbrug har vi opstillet to simuleringermodeller, én til vurdering af reguleringsstrategierne og en til vurdering fordelen ved at affugte luften i supermarkedet.

I dette afsnit præsenteres først resultaterne af simuleringerne for de to tiltag, hvorefter simuleringermodellerne beskrives og antagelserne for simuleringerne gennemgås.

Simuleringsresultater – Reguleringsstrategi

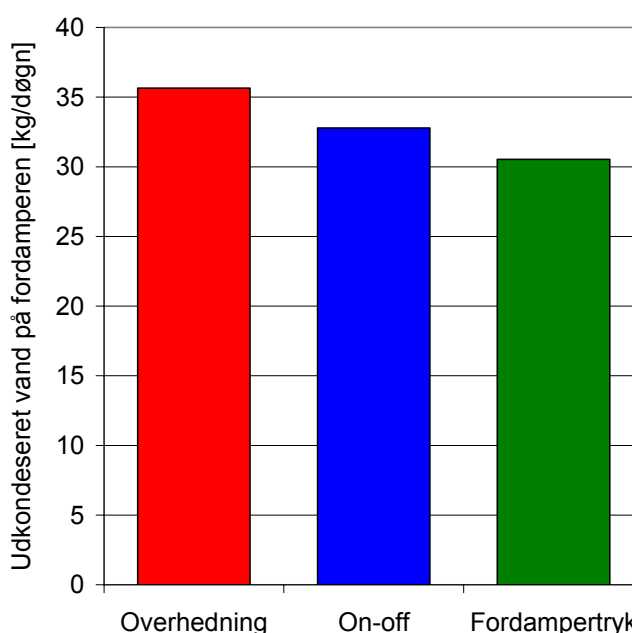
Forsøgene viste, at mængden af vand, der sætter sig som kondens på fordamperne, er afhængig af, hvilken regulering der benyttes til fordamperen, dette kan genskabes i simuleringerne. Det er valgt at fokusere på kølereolen ved simuleringerne af de tre reguleringsstrategier, da det er her der er størst infiltration og dermed mest at hente, hvis det er muligt at nedbringe mængden af rim og kondens.

På Figur 14 ses mængden af kondens, der dannes på fordamperen i kølereolen ifølge simuleringen. Som ved forsøgene er det tydeligt, at fordampetryks-regulering giver anledning til mindst

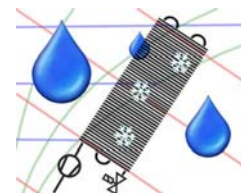
kondensdannelse. Hvor overhedningsregulering og on-off-regulering i forsøgene gav stort set den samme mængde kondens/rim, så viser simuleringerne, at der dannes mest rim ved overhedningsregulering. Tager man udgangspunkt i on-off-reguleringen, som er den der oftest benyttes til regulering af fordampere, så viser simuleringerne, at overhedningsregulering giver 9% mere kondens, mens fordampetryksregulering giver 7% mindre kondens på fordamperen i en kølereol.

I simuleringermodellen kan kuldeydelsen fra fordamperen kan opdeles. I Figur 15 kan det ses at størstedelen af kuldeydelsen fra fordamperen går til nedkøling af infiltreret luft (ca 75%) og af denne går en stor del (36%-40%) til udkondensering af vand på fordamperen.

Ved at benytte fordampetryksregulering falder behovet for kuldeydelse fra fordamperen med 2%. Årsagen til at besparelsen på fordampereens kuldeydelse er

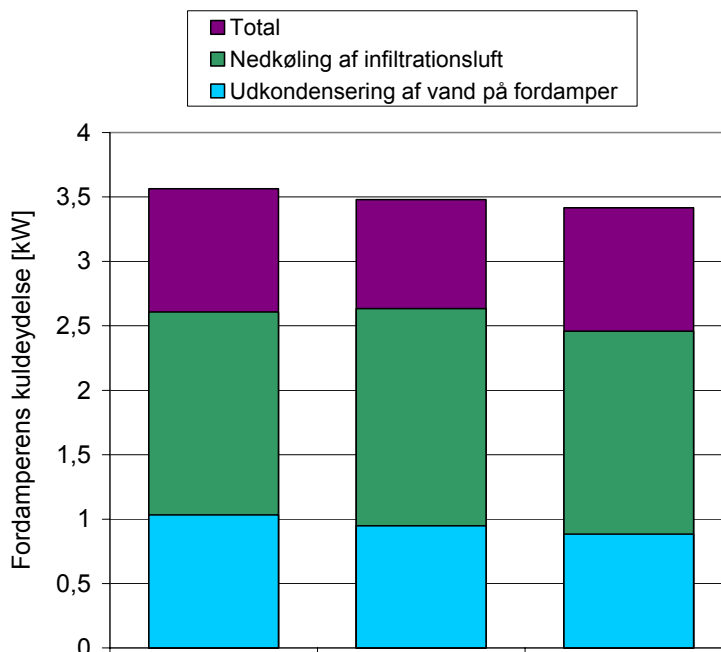


Figur 14 Simuleringerne af de tre reguleringsstrategier viser, som det også blev set for forsøgene, at der dannes mindst kondens på fordamperen i kølereolen ved fordampetryks-regulering.



lille i forhold til besparelsen i vandmængden, skyldes den store mængde infiltrationsluft, ca. 7300 kg/døgn, som skal køles ned fra 20°C til 2°C.

Udover de 2% besparelse i kuldeydelsen på grund af mindre kondens har fordampetryksregulering den anden fordel frem for on-off- eller overhedningsregulering at sugetrykket til kølereolen kan hæves fra -10°C til -5°C, hvilket giver en forbedring i COP fra ca. 3,3 til 4,0 og dermed fås en besparelse på elforbruget på 17,5%.

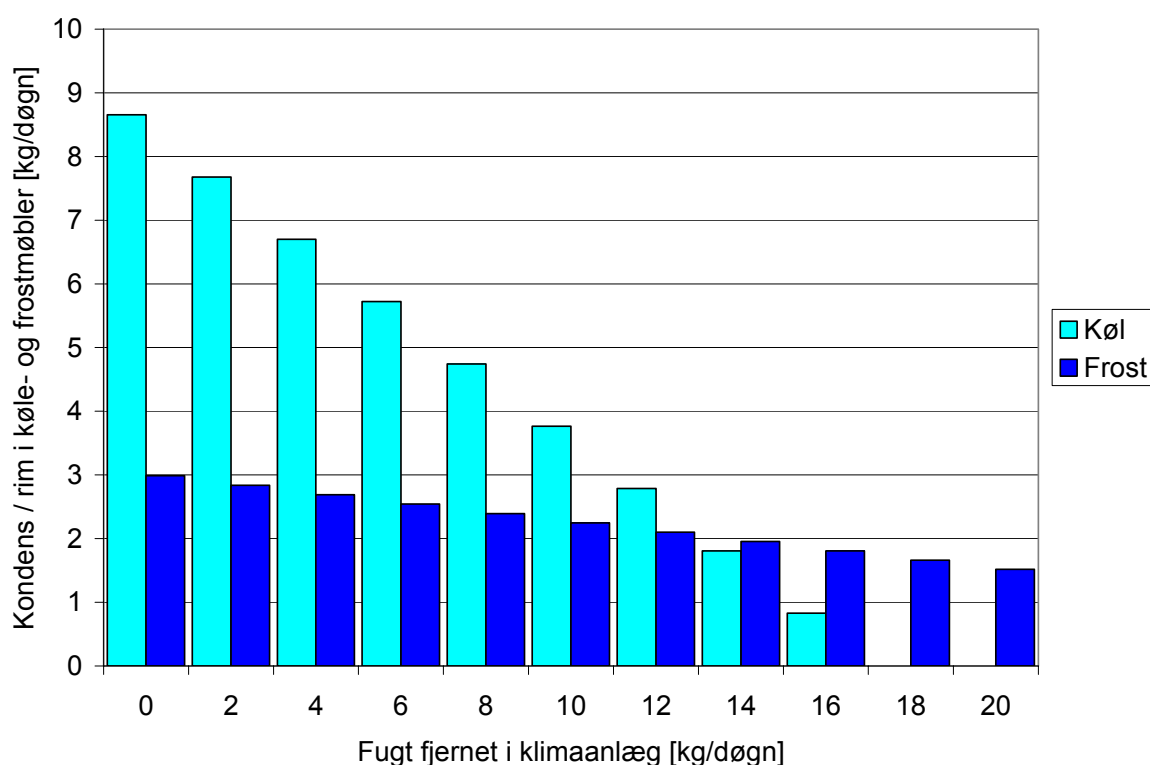
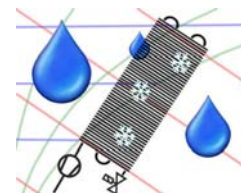


Figur 15 En stor del af fordampersens kuldeydelse bliver brugt på infiltrationsluften og en del af denne går til udkondensering af vand på fordampersens.

Simuleringsresultater – Fugtstyring

Forsøgene viste en klar sammenhæng mellem fugt i luften og mængden af kondens/rim, der dannes på fordampersens i køle- og frostmøblerne. Disse sammenhænge er benyttet i en simuleringsmodel, hvor det er undersøgt om det kan betalte sig energiøkonomisk at fjerne fugt i f.eks. et klimaanlæg, for at derved minimere dannelsen af rim på fordampersens i køle- og frostmøblerne.

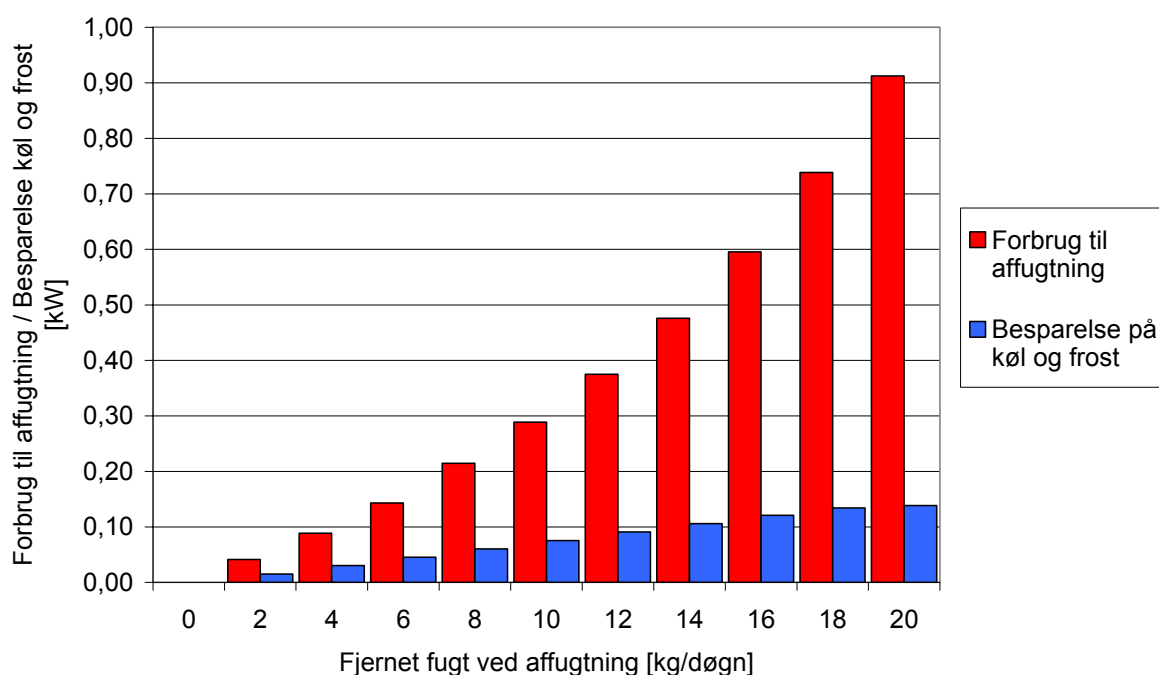
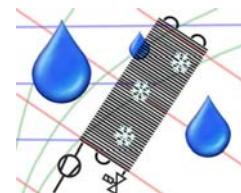
Med udgangspunkt i klimakammeret, hvor forsøgene er udført er der opbygget en simuleringsmodel, hvor der udover de to kølemøbler er regnet med at én person opholder sig i rummet. Temperaturen i rummet er 20°C og den relative luftfugtighed er 60%, når der ikke affugtes. Figur 16 viser effekten af at fjerne fugt fra luften med et klimaanlæg på mængden af rim/kondens, der dannes i møblerne.



Figur 16 Uden affugtning i rummet dannes der henholdsvis 8,7 kg/døgn og 3 kg/døgn kondens og rim på kølemøblernes fordampere. Ved at fjerne 10 kg/døgn fugt med et klimaanlæg kan mængden af kondens og rim i møblerne nedsættes til 3,8 kg/døgn og 2,3 kg/døgn.

Det ses af figuren at der skal fjernes relativt meget vand i klimaanlægget i forhold til, hvad der spares i køle- og frostmøblerne. Da fordampningstemperaturen i affugteren specielt ved de høje luftfugtigheder er højere end i køle- og frostmøblerne, er det dog ikke ensbetydende med, at der rent energiøkonomisk ikke kan betale sig, da COP er højere i affugteren end i køle- og frostmøblerne.

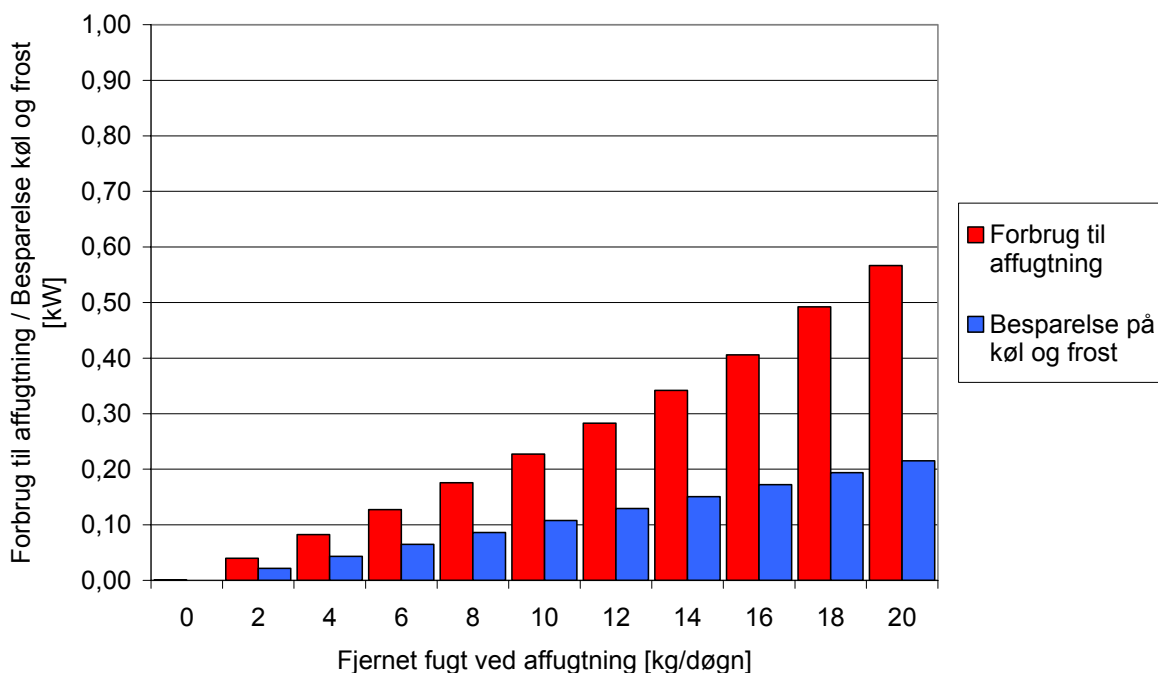
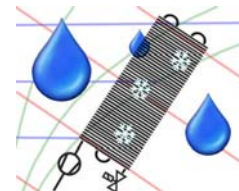
Figur 17 viser energiforbruget til affugtning (røde søjler) og den samlede energibesparelse på køle- og frostmøblerne (blå søjler).



Figur 17 Energiforbruget til affugtning i et klimaanlæg er større, end det der kan spares på køle- og frostmøblerne. Søjlerne viser, at det er i starten der er størst udbytte ved at affugte.

Ifølge beregningerne kan det ikke betale sig at affugte luften i den opstillede situation, fordi der skal benyttes mere energi til at affugte luften i klimaanlægget end der spares på køle- og frostmøblerne. I en situation hvor man af andre årsager alligevel skal køle luften i butikken er det selvfølgelig værd at tage besparelsen køle- og frostmøblerne med.

Ved beregningen af mængden af rim og kondens der dannes på fordamperne i køle- og frostmøblerne, er der benyttet den korrelation som blev fundet ud fra forsøgene. Da forsøgene er gennemført med natgardinet trukket for kølereolen og med et net lagt over frostgondolen, er mængden af infiltrationsluft sandsynligvis lav ved forsøgene. For at undersøge følsomheden overfor dette er der lavet simuleringer, hvor der regnes med 3 gange så stor pårimning af fordamperne. I Figur 18 ses energiforbruget til affugtning sammenlignet med energibesparelsen på køle- og frostmøblerne. Der er som tidligere regnet med, at den relative luftfugtighed uden affugtning er 60%, men der er regnet med, at der sætter sig 3 gange så meget vand som rim og kondens i køle- og frostmøblerne, har det været nødvendigt at øge fugttilførslen i ventilationsluften for at opretholde de 60% RH. Dette betyder, at klimaanlægget kan køre med en højere fordampningstemperatur og derved falder energiforbruget til affugtning, samtidig med at besparelsen på køle- og frostmøblerne stiger.



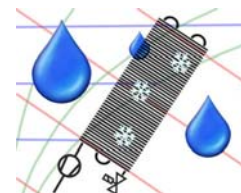
Figur 18 Ved at regne med 3 gange så stor pårimning på køle- og frostmøblerne er der bedre sammenhæng mellem energiforbruget til affugtning og energibesparelserne i køle- og frostmøblerne.

Til trods for at der regnes med øget pårimning på køle- og frostfordamperne, og at der ses på en situation med meget fugtig luft i rummet, viser simuleringerne, at det ikke kan betale sig energiøkonomisk at affugte luften i med et klimaanlæg for at mindske dannelsen af kondens og rim på fordamperne.

Årsagen til, at det ikke kan betale sig, kan findes ved at beregne en COP_{latent} for affugtningen. Når luften trækkes igennem affugterens fordamper, falder luftens temperatur og helst ned til under dugpunktet, hvorved der dannes kondens på fordamperen. Såfremt der ikke er behov for køling skal luften varmes op igen (f.eks. gennem kondensatoren) inden den blæses ud i rummet igen. Vi drager dermed kun nytte af den latente belastning på fordamperen, mens den sensible så at sige er spildt. COP udregnet i forhold til kuldeydelsen er derfor ikke dækkende for systemet. I stedet kan COP_{latent} beregnes som forholdet mellem den latente belastning af fordamperen og den tilførte effekt.

COP_{latent} er størst for de første 2 kg/døgn, der fjernes og her er den oppe på 1,27 når der regnes med den målte pårimning af fordamperne og 1,31 når der regnes med 3 gange så stor pårimning af fordamperne, som der er målt ved forsøgene. Da COP for kølemøbler ofte ligger omkring 2,75 og for frostmøbler ligger omkring 1, er der ikke den COP -mæssige fordel i at affugte i et klimaanlæg, som vi havde håbet.

Da denne konklusion kan drages ud fra en situation, der er gjort meget gunstig for affugtningen, vil den også i høj grad gælde for et virkeligt supermarked, hvor der sjældent vil være 60% relativ luftfugtighed, hvorved COP_{latent} i den situation vil



være endnu lavere samtidig med at der skal affugtes en større luftmængde i forhold til antallet af køle- og frostmøbler.

Baggrund for simuleringer og beregninger - Reguleringsstrategi

Når luftens temperatur skal reguleres, dvs. kapaciteten af fordampere skal reduceres fra sin maksimale kapacitet, så kan det gøres ved at:

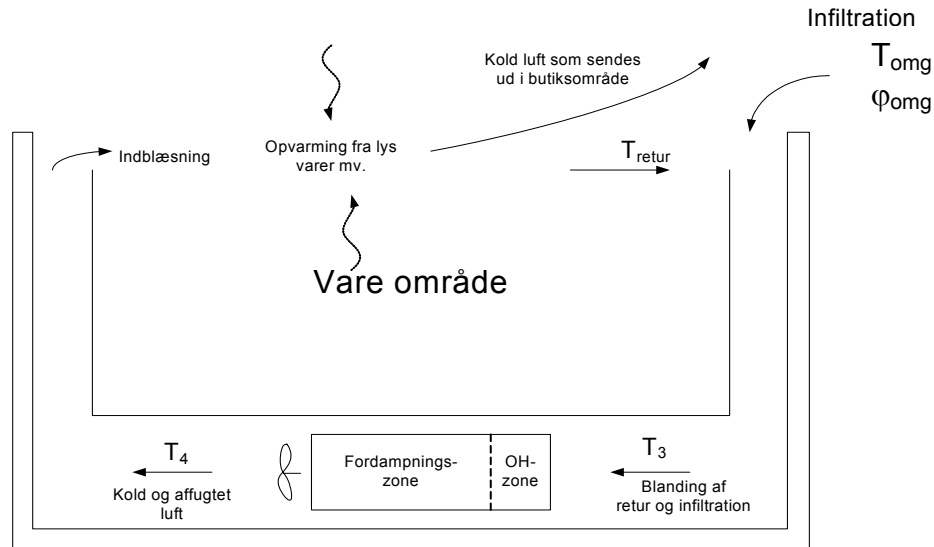
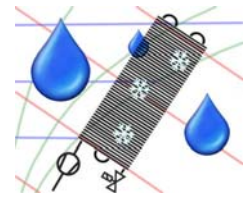
- "Slukke for den" i passende tidsintervaller (on-off-regulering)
- Hæve fordampningstemperaturen (fordampertryksregulering)
- Øge overhedningen - dvs. mindre del af fordampere benyttes til selve fordampningen af kølemiddel (overhedningsregulering)

I de to sidstnævnte tilfælde skal luften i "arealgennemsnit" opleve ca. den samme middelovertemperatur, for samme ydelse. Men der vil være større variation af overfladetemperatur med "overhedningsregulering", hvorfor der kan forventes en mere uens pårimning/udkondensering.

On-off-reguleringens ulempe - set fra et affugtnings synspunkt - er at luften i "on-perioden" trækkes ned i temperatur og alene af den grund opnår en absolut fugtighed, der er lavere. Dermed bliver forskellen mellem infiltrationens fugtindhold og kølestedets fugtindhold større i den aktive køleperiode.

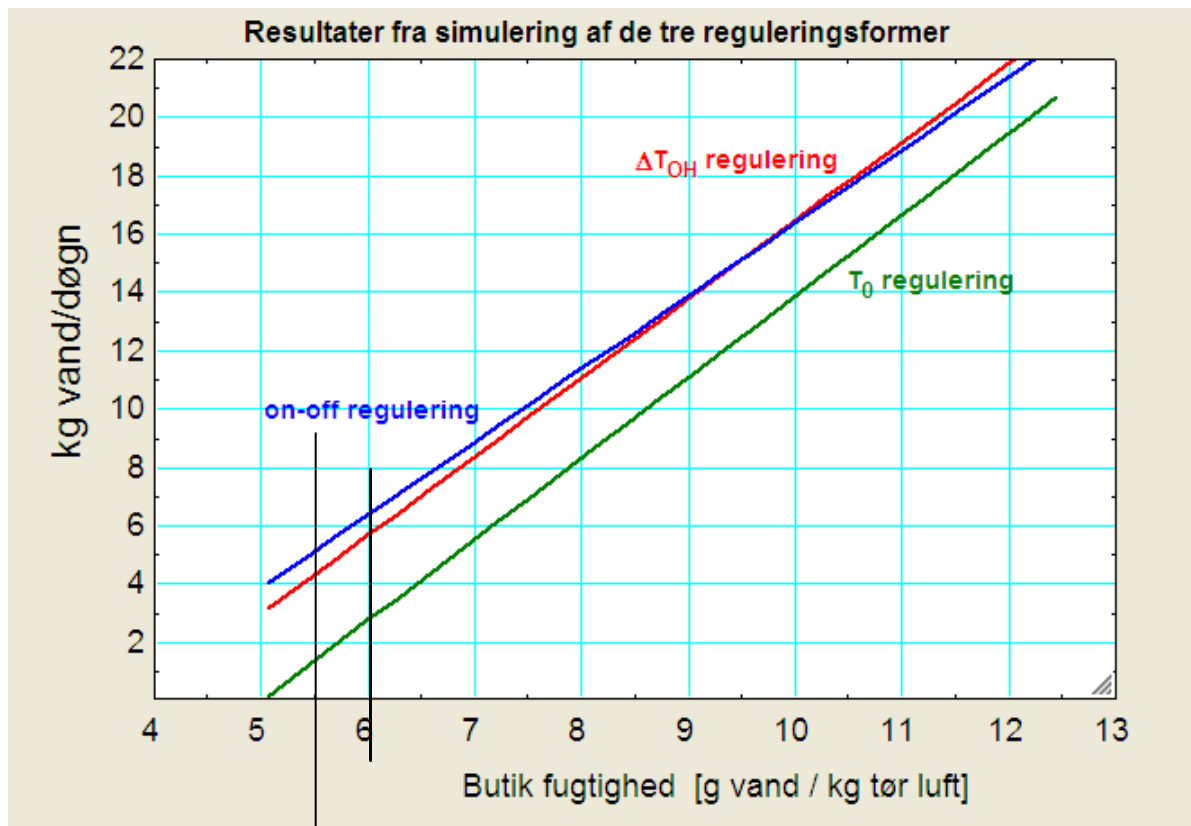
Det er vanskeligt på forhånd at udtale sig om såvel kvalitativ som kvantitativ forskel mellem de tre reguleringsformers "evne til at optage" vand fra den nedkølede luft. Der er forhold ved alle reguleringsformer, som så at sige trækker hver sin vej i forhold til den udkondenserede vandmængde. Derfor er der opbygget en simuleringssmodel - i Engineering Equation Solver. Ved reguleret fordampningstemperatur og overhedning er her tale om "steady-state" simulering. I tilfældet on-off udregnes en duty-cycle (dvs. den relative on-tid) ud fra forholdet mellem den leverede sensible kuldeydelse, og den sensible kuldeydelse der i gennemsnit er brug for, for at holde lufttemperaturen ind i fordampere på sætpunktet.

Tegningen i Figur 19 antyder den konceptuelle model, og de vigtigste betegnelser.

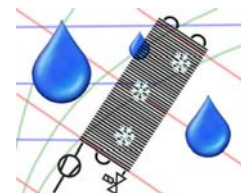


Figur 19 Luften ind i fordamperen er en blanding af recirkuleret luft og infiltrationsluft fra omgivelserne. Luften trækkes gennem fordamperen, hvor den afkøles og affugtes. Fordamperen kan opdeles i en fordampningszone, hvor der er konstant temperatur, og en overhedningszone.

Der er udført sammenlignende simuleringer svarende til måleresultaterne gengivet i Figur 2. Sammenholdning af nedenstående figur og Figur 2 kan således opfattes om modelvalidering.



Figur 20 Den beregnede sammenhæng mellem dannelsen af rim/kondens på fordamperen som funktion af den absolute luftfugtighed i omgivelserne har meget god overensstemmelse med forsøgsresultaterne i Figur 2.



Der er god overensstemmelse mellem simulering og måling. Ved simuleringen er modelinputtet "infiltrationsmængde" sat til knap 6 masse-% af luftmængden, hvilket giver det rette niveau for "udfældet vandmængde". Det skal straks bemærkes, at forsøgene (af forsøgspraktiske årsager) svarer til delvis afdækning af display-arealet. Ved fuld åbent display vil infiltrationen formentlig være på ca. 15 % niveau.

Teorien (simuleringen) bekræfter, at det er regulering af fordampningstemperaturen, som giver den mindste udkondenserede vandmængde. Størrelsesorden på reduktionen i vandmængden, ved valg af denne reguleringsform, er 10-15%.

Overhedningsreguleringen er på niveau med on/off, men førstnævnte vil give en noget mere skæv pårimning, og vil i praksis kræve hypigere afrimninger.

Simuleringsmodellen er brugt til at besvare følgende spørgsmål:

1. Hvor stor en del af køleydelsen på en kølereol stammer fra infiltrationen, og hvordan er dette yderligere opdelt på sensibel (temperatursenkning) og latent belastning (udkondensering af vand)?
2. Hvad er el-besparelsesniveauet ved at ændre fra on/off til fordampningstemperaturregulering

Her fokuseres på kølereol, og ikke frostgondol, hvor den udkondenserede vandmængde (pga. mindre infiltration) er af mindre betydning.

Valgt case

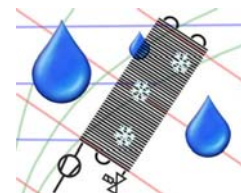
Butiks temperaturen er 20 °C og har en relativ fugtighed på 50 %. T_3 reguleres til 6°C, og infiltrationen sættes til 15 %. Ved on/off og overhedningsregulering vælges en fordampningstemperatur på -10 °C.

Reguleringsform	On/off	Overhedning	Fordampningstemp
T_0 [°C]	-10	-10,0	-4,4
ΔT_{OH} [K]	8	15,4	8
Duty-cycle [%]	87	100	100
Vandmængde [kg/døgn]	32,78	35,65	30,54
\dot{Q}_{TOT} [kW]	3,479	3,564	3,416
\dot{Q}_{INF} [kW]	2,633	2,608	2,459
$\dot{Q}_{Kondens-vand}$ [kW]	0,948	1,032	0,884

Baggrund for simuleringer og beregninger - Fugtbalance

Fugtindholdet i luften i et supermarked afhænger af mængden af fugt, der tilføres, og mængden af fugt, der fjernes fra supermarkedet. Fugttilførslen til supermarkedet kommer bl.a. fra personer, fordampning fra madvarer og ventilationens indblæsningsluft. Mens fugten hovedsagligt fjernes ved kondensering og pårimning på fordampere i køle- og frostmøbler samt med ventilationen.

Formålet med at opstille fugtbalancen er at undersøge om det kan betale sig at sænke luftfugtigheden omkring frost- og kølemøbler for derved at mindske pårimningen på fordampere. Først er der set på en situation uden affugtning og



derefter på hvilken betydning det har at sænke luftfugtigheden og hvad det koster i energi i forhold til den mængde energi, der går til at danne rim og kondens på fordamperne i køle- og frostmøblerne

Der er set på en "worst case" situation for dannelsen af kondens og rim i køle- og frostmøblerne, med meget høj luftfugtighed samtidig med at affugterens overfladetemperatur optimeres i forhold til at give mest muligt affugtning per kW tilført energi.

Fugtbalancen er opstillet for klimakammeret, hvor forsøgene er udført og der regnes med at der sammen med kølereolen og frostreolen er én person tilstede. Der er set bort fra fordamning fra madvarer. Luftsiftet er sat til 2 h^{-1} og fugtindholdet i indblæsningsluften er justeret i forhold til at skabe en relativ luftfugtighed på 60% i situationen uden affugtning.

Under disse forhold dannes der meget rim og kondens på fordamperne. Ud fra korrelationerne fundet ved forsøgene vil der ved disse forhold sætte sig 159 g/h rim på frostfordamperen og 588 g/h på kølefordamperen.

Et klima anlæg indsættes i modellen og sættes til at fjerne først 2 kg/døgn fugt op til 20 kg/døgn fugt, hvorved luftfugtigheden i rummet falder. Fugten fjernes ved at lede luften gennem en fordamper, således der dannes kondens/rim. Der regnes med, at der ikke er behov for køling og at luften derfor opvarmes igen, f.eks. gennem kondensatoren. Dvs. at det kun er den latente del af belastningen, der udnyttes. For at vurdere effektiviteten af affugteren udregnes mængden af vand der fjernes fra fordamperen i forhold til den effekt systemet tilføres. Fordampningstemperaturen optimeres i forhold til fugtindholdet i butiksluften, så der opnås maksimal affugtning ved mindst muligt energiforbrug (se alle antagelser for beregningerne sidst i dette afsnit).

Antagelser for fugtbalancen

Rummet

Der er regnet på et rum med samme dimensioner som klimakammeret hvor forsøgene er udført.

Rumhøjde: 2,02 m

Rumareal: $3,64 \text{ m} \times 5,65 \text{ m}^2$

Rumtemperatur: 20°C

Relativluftfugtighed (uden affugtning): 60%

Ude

Udetemperatur: Varieres i forhold til at opnå 60% inde

Relativ luftfugtighed ude: 70%

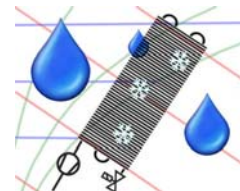
Personer

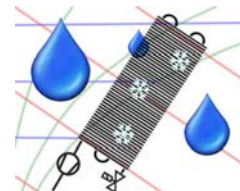
1 person tilstede i rummet

Fugtafgivelse fra person: 2,3 kg/døgn

Ventilation

Luftsifte: 2 h^{-1}





Klimaanlæg/affugter

Overfladetemperatur af affugterens fordampner optimeres i forhold til at opnå højest mulig COP_{latent} ved de givne temperatur og fugtforhold i butikken.

Temperaturvirkningsgrad af affugteren er sat til 0,5, dvs. at luften på vej gennem fordampneren antages at blive afkølet halvdelen af temperaturforskellen mellem rumtemperaturen og fordampningstemperaturen. Hvis fordampningstemperaturen er 10°C og rumtemperaturen er 20°C , regnes der med at luften ud af fordampneren er 15°C .

COP af klimanlægget/affugteren er beregnes som:

$$COP_{\text{klima}} = 0,0875 \cdot T_{\text{OF,Klima}} + 3,625$$

Frostgondol

1 frostgondol

$$COP_{\text{frost}} = 1$$

Reguleringsstrategi: Fordampnertryksregulering

Sammenhæng mellem rimdannelse [kg/s] og rumluftens absolutte fugtindhold [g/kg]:

$$x_{\text{Rum}} = -0,0258 \cdot m_{\text{H}_2\text{O},\text{frost}}^2 + 2,7049 \cdot m_{\text{H}_2\text{O},\text{frost}} + 1$$

Kølereol

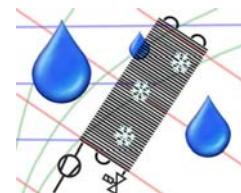
1 kølereol

$$COP_{\text{køl}} = 2,75$$

Reguleringsstrategi: Fordampnertryksregulering

Sammenhæng mellem rimdannelse [kg/s] og rumluftens absolutte fugtindhold [g/kg]:

$$x_{\text{Rum}} = 0,3894 \cdot m_{\text{H}_2\text{O},\text{køl}} + 5,4812$$

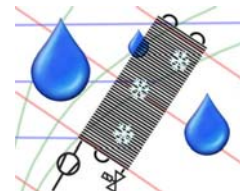


Konklusion

Det er muligt at mindske pårimningen på fordamperne i kølereoler og frostgondoler ved at sænke luftfugtigheden i supermarkedet. Når den absolutte luftfugtighed kommer under 4-5 g/kg dannes der ingen eller kun meget lidt rim på fordamperne, viser forsøgene i klimakammer. Et fugtindhold på 4-5 g/kg svarer til en relativ luftfugtighed på ca. 30% ved en lufttemperatur på 20°C. Målinger fra et supermarked i Løgumkloster (leveret fra Danfoss) over en periode fra midten af marts 2002 til slutningen af juni 2002 viser at middelværdien af luftfugtighed i butikken (målt over køle- og frostmøblerne) i åbningstiden er under 6 g/kg 34% af tiden og under 8 g/kg 87% af tiden. Der er altså ikke langt ned til en fugtighed der stort set ikke vil give pårimning på fordamperne.

Ud fra korrelationerne mellem fugtindhold i luften og pårimning af fordamperne fundet ved forsøgene er der opstillet en fugtbalance for et supermarked, som viser at det økonomisk og energimæssigt isoleret set ikke kan betale sig at fjerne fugten med et klimaanlæg, idet der bruges mere energi til affugtning i et klimaanlæg end der spares på køle- og frostmøblerne.

Forskellige reguleringsstrategier for fordamperne i køle- og frostmøbler giver anledning til forskellig pårimning af fordamperne. Af de tre reguleringsstrategier der er undersøgt, fandt vi ud af, at fordampertryksregulering giver anledning til mindst pårimning, både for frostgondolen og kølereolen. Effekten er størst for kølereolen, hvor mængden af rim og kondens er størst. Beregningerne viser, at besparelsen i kuldeydelse på fordamperen ved at benytte fordampertryksregulering frem for on-off-regulering er ca. 2% alene pga. mindre pårimning. Da fordampertryksregulering giver mulighed for at hæve sugetrykket til kompressoren kan besparelsen komme op på 17,5%.



Hvordan kan der arbejdes videre med emnet af andre og med den etablerede forsøgsopstilling

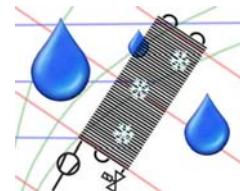
Selvom der ikke blev fundet store forskelle i pårinningsgraden af fordamperne i forhold til reguleringsstrategien af fordamperne er det stadig et område, hvor der er potentiale for besparelser. Det kan derfor være interessant at få undersøgt f.eks. følgende forhold nærmere:

- Minimering af infiltration i møblerne
- Betydningen af overstablede varer
- Betydning af afdækkede møbler (benyttes i flere mindre supermarkeder)
- Optimering af afrimning (naturlig, melt, el, gas...)
- Forskelle mellem HFC-kølemidler og CO₂
- Optimal klimazoneinddeling i supermarkeder

Projektervaluering

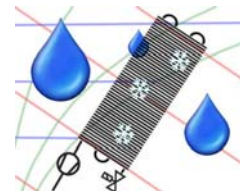
- Det viste sig at være sværere end forventet at etablere en robust forsøgsopstilling, og der er derfor gået langt mere tid med forsøgsopstillingen end det var forventet.
- Med forsøgsopstillingen oppe og køre var det en udfordring at få helt sammenlignelige data for de tre reguleringsstrategier og det blev derfor nødvendigt at lave korrektioner på forsøgsdataene.
- Ved simuleringer med fugtig luft skal man have "tungen lige i munden".

Alt i alt et meget lærerigt projekt på flere områder og niveauer.



Nomenklaturliste

AKC	Reguleringsenhed til AKV
AKV	Pulsbreddemoduleret elektronisk ekspansionsventil
EES	PC-program til ligningsløsning. www.fChart.com
EKC	Reguleringsenhed til ETS
ETS	Fasttryksventil
KVP	Håndindstillet ventil
OH	Overhedning af kølemiddel [K]
T ₃	Lufttemperatur før fordampere [°C]
T ₄	Lufttemperatur efter fordampere [°C]
TC	Mekanisk ekspansionsventil

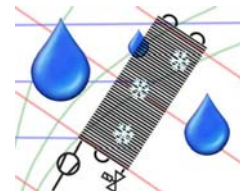


Appendiks

Projektgruppen

Projektgruppen for "Energioptimal håndtering af luftens fugtighed i et supermarked" har bestået af:

IPU:	Arne Jakobsen Mette Havgaard Morten Juul Skovrup Stig Andersen
MEK-DTU:	Hans Jørgen Høgaard Knudsen
Danfoss:	Bjarne Dindler Rasmussen Christian Bendtsen Peter Eriksen
Knudsen Køling:	Finn Christensen Torben Olsen

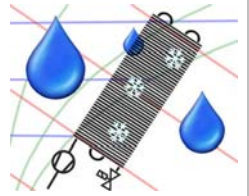


Kalibrering

Inden forsøgene påbegyndtes blev alle temperaturfølere kalibreret op i mod DTU's platinføler i punkter fra -30°C til 70°C . Kalibreringen gav kun anledning til meget små korrektioner af de målte værdier. Korrektionerne er lagt ind i dataopsamlingen således målingerne automatisk korrigeres. Det vurderes dog, at korrektionerne er så små, at man en anden gang vil kunne springe kalibreringen over med disse pt1000-følerne.

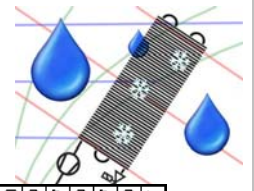
Luffugtighedsfølerne var det desværre ikke muligt at kalibrere op i mod et mere præcist instrument, inden de blev taget i brug. I stedet er de korrigeret i forhold til hinanden, ved at placere fugtfølerne samlet og derefter køre med forskellige indstillinger i klimakammeret, hvorefter der fundet middelværdier for følerne og der er bestemt en korrektionsligning for hver føler.

Trykfølerne er ikke forsøgt kalibreret.

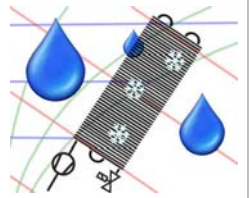


Forsøgsoversigt

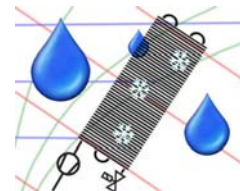
Forsøgsoversigt, fordampertryksregulering - gennemsnitsværdier																	
Generelt Parameter	Forsøg 3		Forsøg 6		Forsøg 12		Forsøg 15		Forsøg 18		Forsøg 22		Forsøg 25		Forsøg 28		
	09-03-07 00:00	12-03-07 18:00	12-03-07 18:00	20-03-07 06:00	24-03-07 00:00	24-03-07 06:00	21-03-07 06:00	21-03-07 06:00	25-03-07 00:00	25-03-07 00:00	24-00:00	24-00:00	24-00:00	24-00:00	24-00:00	24-00:00	24-00:00
Forsøgs start																	
Forsøgs slut																	
Forsøgsdøgn [time]	24:00:00	24:00:00	24:00:00	24:00:00	24:00:00	24:00:00	24:00:00	24:00:00	24:00:00	24:00:00	24:00:00	24:00:00	24:00:00	24:00:00	24:00:00	24:00:00	24:00:00
Temperatur i klimakammer [C]	21,66	22,02	22,02	24,09	21,84	20,42	21,98	20,42	21,98	20,42	20,42	20,42	20,61	20,97	20,97	20,97	20,97
Relativ luftfugtighed [%]	44,78	33,40	33,40	60,32	58,88	58,88	58,47	44,85	58,88	44,85	44,85	44,85	44,43	43,95	43,95	43,95	43,95
Dugpunkt [C]	9,16	5,20	5,20	13,44	13,44	13,44	8,05	8,05	13,44	8,05	8,05	8,05	8,09	8,26	8,26	8,26	8,26
Entalpi [kJ/kg]	40,42	36,33	36,33	53,63	46,82	47,01	37,79	37,79	46,82	37,79	37,79	37,79	38,04	38,60	38,60	38,60	38,60
Fugtindhold [g/kg]	7,33	5,37	5,37	11,55	9,78	9,80	6,80	6,80	9,78	6,80	6,80	6,81	6,81	6,89	6,89	6,89	6,89
Kondenseringstemperatur [C]	35,65	33,02	33,02	32,64	33,83	34,41	32,64	32,64	33,83	34,41	32,64	32,97	32,97	34,01	34,01	34,01	34,01
Temperatur efter kompressor [C]	108,08	102,80	102,80	99,94	103,34	106,00	100,37	100,37	103,34	106,00	100,37	101,61	101,61	104,94	104,94	104,94	104,94
Overfladetemperatur af kompressor [C]	33,25	33,64	33,64	32,34	32,60	33,58	32,95	32,95	32,60	33,58	32,95	33,10	33,10	33,68	33,68	33,68	33,68
Underkøling [K]	8,69	10,56	10,56	12,82	11,13	9,94	12,82	12,82	11,13	9,94	12,82	10,98	10,98	9,83	9,83	9,83	9,83
Kølercool																	
Parameter																	
CutIn [C]	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
CutOut [C]	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Regulering	Fordampertryk	Fordampertryk	Fordampertryk	Fordampertryk	Fordampertryk	Fordampertryk	Fordampertryk	Fordampertryk	Fordampertryk	Fordampertryk	Fordampertryk	Fordampertryk	Fordampertryk	Fordampertryk	Fordampertryk	Fordampertryk	Fordampertryk
Samlet afimningstid [min], [%]	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	119
Samlet off-tid [min], [%]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Massestrøm af afimningsvand i kølercool [L/døgn]	3,780	0,280	0,280	15,470	9,800	9,730	2,520	2,520	9,800	15,470	2,520	2,520	2,520	2,660	2,660	2,660	2,660
Fordampningstemperatur [C]	1,96	1,75	1,75	0,69	1,50	1,66	1,90	1,96	1,50	0,69	1,66	1,96	1,96	1,89	1,89	1,89	1,89
Aktuel overhedning	5,28	5,40	5,40	5,99	5,47	5,34	5,29	5,25	5,47	5,34	5,29	5,25	5,25	5,31	5,31	5,31	5,31
Reference overhedning	5,20	5,26	5,26	5,66	5,20	5,24	5,19	5,20	5,26	5,66	5,19	5,17	5,17	5,20	5,20	5,20	5,20
Gennemsnitlig lufttemperatur for fordampertryk [C]	6,39	6,36	6,36	6,40	6,38	6,38	6,31	6,34	6,38	6,36	6,31	6,34	6,34	6,37	6,37	6,37	6,37
Gennemsnitlig fordampertemperatur [C]	3,79	3,81	3,81	3,93	3,67	3,63	3,92	3,88	3,67	3,81	3,63	3,63	3,63	3,86	3,86	3,86	3,86
Gennemsnitlig lufttemperatur efter fordampertryk [C]	4,27	4,27	4,27	4,21	4,21	4,19	4,38	4,36	4,21	4,27	4,19	4,36	4,36	4,35	4,35	4,35	4,35
Gennemsnitlig lufttemperatur i kølercool [C]	5,68	5,63	5,63	5,46	5,62	5,61	5,70	5,71	5,62	5,46	5,61	5,70	5,71	5,71	5,71	5,71	5,71
Lufttemperatur efter fordampertryk [C]	5,98	5,99	5,99	5,94	5,98	5,98	5,98	5,98	5,98	5,94	5,98	5,98	5,98	5,99	5,99	5,99	5,99
Lufttemperatur efter fordampertryk [C]	4,14	4,13	4,13	3,86	4,11	4,09	4,23	4,23	4,11	4,13	4,09	4,23	4,23	4,21	4,21	4,21	4,21
Massestrøm korrigeret til S3 = 5,5°C	4,60	1,06	1,06	16,29	10,60	10,54	3,26	3,29	10,60	16,29	3,26	3,29	3,29	3,46	3,46	3,46	3,46
Frostgondol																	
Parameter																	
CutIn [C]	-15	-15	-15	-15	-15	-15	-15	-15	-15	-15	-15	-15	-15	-15	-15	-15	-15
CutOut [C]	-17	-17	-17	-17	-17	-17	-17	-17	-17	-17	-17	-17	-17	-17	-17	-17	-17
Regulering	Fordampertryk	Fordampertryk	Fordampertryk	Fordampertryk	Fordampertryk	Fordampertryk	Fordampertryk	Fordampertryk	Fordampertryk	Fordampertryk	Fordampertryk	Fordampertryk	Fordampertryk	Fordampertryk	Fordampertryk	Fordampertryk	Fordampertryk
Samlet afimningstid [min], [%]	118	112	112	115	120	121	117	119	120	115	117	119	119	119	119	119	119
Samlet off-tid [min], [%]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Massestrøm af afimningsvand i frostgondol [L/døgn]	2,520	1,440	1,440	3,120	3,120	3,200	2,120	2,000	3,120	3,120	2,120	2,000	2,000	2,320	2,320	2,320	2,320
Fordampningstemperatur [C]	-24,98	-24,04	-24,04	-26,34	-27,07	-26,88	-25,34	-25,46	-27,07	-26,88	-25,34	-25,46	-25,46	-25,73	-25,73	-25,73	-25,73
Aktuel overhedning	7,16	7,16	7,16	8,05	7,62	7,64	7,31	7,36	7,62	7,64	7,31	7,36	7,36	7,43	7,43	7,43	7,43
Reference overhedning	6,14	6,02	6,02	6,90	6,53	6,53	6,16	6,22	6,53	6,53	6,16	6,22	6,22	6,27	6,27	6,27	6,27
Gennemsnitlig lufttemperatur for fordampertryk [C]	-12,90	-13,04	-13,04	-12,99	-13,17	-13,18	-13,51	-13,58	-13,17	-13,04	-13,51	-13,58	-13,58	-13,75	-13,75	-13,75	-13,75
Gennemsnitlig fordampertemperatur [C]	-24,44	-23,51	-23,51	-25,78	-26,37	-26,13	-24,68	-24,80	-26,37	-26,13	-24,68	-24,80	-24,80	-25,01	-25,01	-25,01	-25,01
Gennemsnitlig lufttemperatur efter fordampertryk [C]	-21,23	-20,49	-20,49	-22,41	-23,03	-22,89	-21,91	-21,99	-23,03	-22,89	-21,91	-21,99	-21,99	-22,16	-22,16	-22,16	-22,16
Gennemsnitlig lufttemperatur i frostgondol [C]	-16,14	-15,60	-15,60	-16,87	-17,64	-17,46	-16,57	-16,67	-17,64	-17,46	-16,57	-16,67	-16,67	-16,77	-16,77	-16,77	-16,77
Lufttemperatur for fordampertryk [C]	-13,59	-13,72	-13,72	-13,57	-13,27	-13,24	-13,62	-13,60	-13,27	-13,59	-13,62	-13,60	-13,60	-13,56	-13,56	-13,56	-13,56
Lufttemperatur efter fordampertryk [C]	-21,92	-21,28	-21,28	-23,95	-24,50	-24,50	-22,93	-22,93	-24,50	-24,50	-22,93	-22,93	-22,93	-23,12	-23,12	-23,12	-23,12
Massestrøm korrigeret til S3 = 13,5°C	3,03	1,83	1,83	3,55	3,40	3,47	2,11	1,93	3,40	3,55	2,11	1,93	1,93	2,11	2,11	2,11	2,11



Forsøgsoversigt, overhedningsregulering - gennemsnitsværdier												
Generelt	Parameter											
	Forsøg 2	Forsøg 8	Forsøg 11	Forsøg 14	Forsøg 17	Forsøg 21	Forsøg 24	Forsøg 27	Forsøg 30	Forsøg 32		
Forsøgs start	07-03-07 18:00	15-03-07 06:00	19-03-07 00:00	22-03-07 18:00	26-03-07 12:00	01-04-07 00:00	04-04-07 18:00	08-04-07 12:00	12-04-07 06:00	15-04-07 00:00		
Forsøgs slut	08-03-07 18:00	16-03-07 06:00	20-03-07 00:00	23-03-07 18:00	27-03-07 12:00	02-04-07 00:00	05-04-07 18:00	09-04-07 12:00	13-04-07 06:00	16-04-07 00:00		
Forsøgsperiode [timer]	24:00:00	24:00:00	24:00:00	24:00:00	24:00:00	24:00:00	24:00:00	24:00:00	24:00:00	24:00:00		
Temperatur i klimakammer [C]	21,49	22,67	25,11	21,77	21,91	20,45	20,26	20,13	21,51	20,65		
Relativ luftfugtighed [%]	45,13	32,33	57,63	38,90	58,46	44,70	45,18	45,57	42,63	44,79		
Dugpunkt [C]	9,12	5,29	16,17	13,39	13,40	8,03	8,01	8,03	8,29	8,24		
Entalpi [kJ/kg]	40,20	37,08	55,06	46,66	46,82	37,80	37,58	37,47	39,19	38,27		
Fugtindhold [g/kg]	7,31	5,61	11,70	9,74	9,75	6,78	6,78	6,78	6,91	6,89		
Kondenseringstemperatur [C]	33,34	32,94	33,47	33,40	33,60	32,86	32,96	32,71	33,22	33,30		
Temperatur efter kompressor [C]	97,81	97,75	99,10	98,65	99,23	97,72	97,89	97,13	98,73	98,97		
Overfladetemperatur af kompressor [C]	31,16	31,63	31,30	31,46	31,53	32,43	32,28	31,93	32,10	32,63		
Underkøling [K]	17,95	18,05	17,92	17,97	18,01	17,97	18,06	18,04	18,02	18,11		
Køleareal												
Parameter	Forsøg 2	Forsøg 8	Forsøg 11	Forsøg 14	Forsøg 17	Forsøg 21	Forsøg 24	Forsøg 27	Forsøg 30	Forsøg 32		
CutIn [C]	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7		
CutOut [C]	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5		
Regulering	Overhedning	Overhedning	Overhedning	Overhedning	Overhedning	Overhedning	Overhedning	Overhedning	Overhedning	Overhedning		
Samlet afrimningstid [min], [%]	121	120	122	121	120	120	120	120	120	120		
Samlet off-tid [min], [%]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Massestrøm af afrimningsvand i køleareal [L/døgn]	6,230	2,030	17,920	11,690	11,900	5,110	5,110	4,970	5,390	3,640		
Fordampningstemperatur [C]	-10,45	-10,45	-10,44	-10,45	-10,45	-10,46	-10,46	-10,46	-10,46	-10,46		
Aktuel overhedning	17,69	17,70	17,99	17,87	17,90	17,50	17,49	17,45	17,65	17,08		
Reference overhedning	9,62	10,00	9,59	9,69	9,77	10,00	9,99	10,00	10,00	9,99		
Gennemsnitlig lufttemperatur for fordampner (S3) [C]	6,31	6,30	6,54	6,49	6,50	6,12	6,11	6,08	6,26	6,72		
Gennemsnitlig fordampoverfladetemperatur (S5) [C]	5,49	5,30	4,53	5,38	5,35	5,48	5,48	5,48	5,52	7,50		
Gennemsnitlig lufttemperatur efter fordampner (S4) [C]	5,32	5,27	4,89	5,34	5,34	5,28	5,27	5,26	5,31	7,21		
Gennemsnitlig lufttemperatur i køleareal [C]	5,77	5,72	5,57	5,80	5,72	5,72	5,72	5,72	5,74	7,54		
Lufttemperatur for fordampner (S3) regulering [C]	5,64	5,64	5,64	5,64	5,64	5,63	5,64	5,64	5,64	7,64		
Lufttemperatur efter fordampner (S4) regulering [C]	5,60	5,59	5,47	5,51	5,47	5,52	5,51	5,49	5,57	7,26		
Massestrøm korrigeret til S3 = 5,5°C	6,97	2,76	18,87	12,59	12,81	5,68	5,66	5,50	6,08	5,67		
Frostgondol												
Parameter	Forsøg 2	Forsøg 8	Forsøg 11	Forsøg 14	Forsøg 17	Forsøg 21	Forsøg 24	Forsøg 27	Forsøg 30	Forsøg 32		
CutIn [C]	-13	-13	-13	-13	-13	-13	-13	-13	-13	-13		
CutOut [C]	-15	-15	-15	-15	-15	-15	-15	-15	-15	-15		
Regulering	Overhedning	Overhedning	Overhedning	Overhedning	Overhedning	Overhedning	Overhedning	Overhedning	Overhedning	Overhedning		
Samlet afrimningstid [min], [%]	118	108	111	115	118	114	114	115	118	110		
Samlet off-tid [min], [%]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Massestrøm af afrimningsvand i frostgondol [L/døgn]	2,920	1,800	3,560	3,440	3,640	2,720	2,840	2,880	2,640	2,520		
Fordampningstemperatur [C]	-31,02	-31,20	-31,10	-31,04	-30,89	-31,07	-31,04	-31,16	-31,11	-30,15		
Aktuel overhedning	17,60	18,12	17,79	16,46	16,17	17,30	16,99	17,10	16,77	18,64		
Reference overhedning	10,00	10,00	9,91	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00		
Gennemsnitlig lufttemperatur for fordampner (S3) [C]	-27,22	-27,22	-26,20	-27,32	-27,79	-26,26	-26,49	-26,69	-26,90	-24,09		
Gennemsnitlig fordampoverfladetemperatur (S5) [C]	-21,41	-21,09	-21,06	-22,54	-22,90	-21,44	-21,74	-21,87	-21,96	-19,27		
Gennemsnitlig lufttemperatur efter fordampner (S4) [C]	-16,04	-15,47	-15,35	-17,00	-17,35	-16,02	-16,23	-16,38	-16,54	-14,09		
Gennemsnitlig lufttemperatur i frostgondol [C]	-13,40	-13,49	-13,10	-13,16	-13,19	-13,32	-13,25	-13,30	-13,24	-11,57		
Lufttemperatur for fordampner (S3) regulering [C]	-22,53	-21,95	-22,76	-24,00	-24,41	-22,72	-23,02	-23,21	-23,29	-20,69		
Lufttemperatur efter fordampner (S4) regulering [C]	3,08	1,91	3,83	3,58	3,73	2,83	2,93	2,94	2,66	2,95		

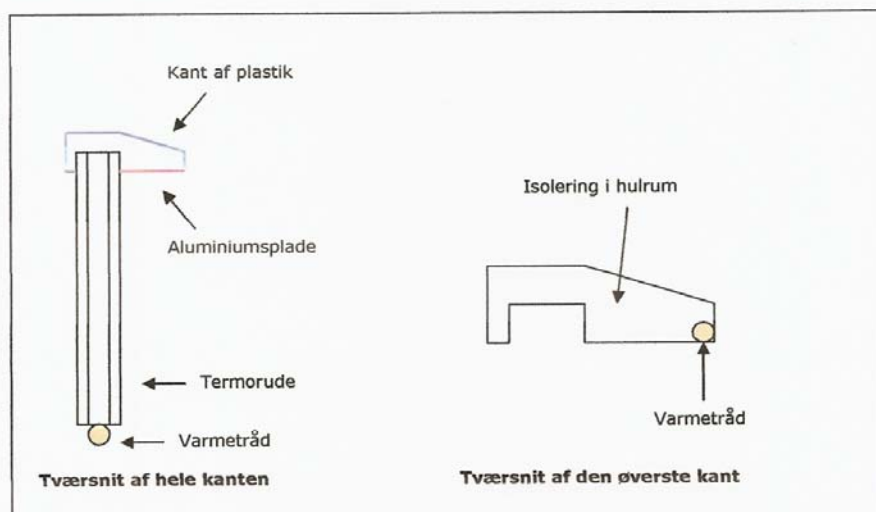


Forsøgsoversigt, on/off-regulering - gennemsnitsværdier												
Generelt												
Parameter	Forsøg 4	Forsøg 7	Forsøg 10	Forsøg 16	Forsøg 19	Forsøg 23	Forsøg 26	Forsøg 29	Forsøg 31			
Forsøgs start	10-03-07 06:00	14-03-07 00:00	17-03-07 18:00	25-03-07 06:00	29-03-07 00:00	03-04-07 12:00	07-04-07 06:00	11-04-07 00:00	13-04-07 18:00			
Forsøgs slut	11-03-07 06:00	15-03-07 00:00	18-03-07 18:00	26-03-07 06:00	30-03-07 00:00	04-04-07 12:00	08-04-07 06:00	12-04-07 00:00	14-04-07 18:00			
Forsøgsdøgn [time]	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00			
Temperatur i klimakammer [C]	21,37	23,24	25,15	21,37	22,13	20,20	20,27	20,34	20,00			
Relativ luftfugtighed [%]	44,99	31,28	58,48	58,85	58,16	45,32	45,21	45,18	45,08			
Dugpunkt [C]	9,14	5,32	16,44	13,44	13,53	8,00	8,04	8,09	8,06			
Entalpi [kJ/kg]	40,31	37,69	55,61	46,83	47,27	37,52	37,63	37,76	37,38			
Fugtindhold [g/kg]	7,32	5,62	11,90	9,78	9,84	6,77	6,79	6,81	6,80			
Kondenseringstemperatur [C]	32,72	32,29	33,46	33,07	32,91	32,44	32,32	32,32	32,59			
Temperatur efter kompressor [C]	99,52	98,52	101,30	100,15	99,97	98,29	98,21	99,09	99,42			
Overfladetemperatur af kompressor [C]	34,74	34,45	35,12	34,24	34,61	34,14	34,65	35,19	35,25			
Underkøling [K]	17,39	17,61	17,46	17,60	17,68	17,62	17,67	17,66	17,67			
Køleroleol												
Parameter	Forsøg 4	Forsøg 7	Forsøg 10	Forsøg 16	Forsøg 19	Forsøg 23	Forsøg 26	Forsøg 29	Forsøg 31			
CutIn [C]	7	7	7	7	7	7	7	7	7			
CutOut [C]	5	5	5	5	5	5	5	5	5			
Regulering	On-Off	On-Off	On-Off	On-Off	On-Off	On-Off	On-Off	On-Off	On-Off			
Samlet afmåningstid [min], [%]	120	120	120	120	119	121	120	120	120			
Samlet off-tid [min], [%]	905	915	906	912	910	951	957	948	981			
Massestrøm af afmåningsvand i køleroleol [L/døgn]	5,670	1,120	18,480	12,390	12,320	3,990	4,060	4,130	2,170			
Fordampningstemperatur [C]	-15,84	-14,83	-16,72	-16,47	-16,35	-15,55	-15,53	-15,58	-13,80			
Aktuel overhedning	22,60	21,62	23,38	22,23	23,07	22,22	22,16	22,23	22,46			
Reference overhedning	9,34	9,30	8,51	8,81	8,82	9,38	9,42	9,23	8,99			
Gennemsnitlig lufttemperatur for fordamp (S3) [C]	5,75	5,84	5,91	5,76	5,77	5,67	5,64	5,67	5,63			
Gennemsnitlig fordampoverfladetemperatur (S2) [C]	2,72	3,25	2,15	2,64	2,59	3,05	2,90	2,97	2,67			
Gennemsnitlig lufttemperatur efter fordamp (S4) [C]	3,94	3,88	3,39	3,85	3,79	4,01	3,95	3,99	3,99			
Gennemsnitlig lufttemperatur i køleroleol [C]	5,06	5,01	4,85	5,03	5,00	5,08	5,05	5,08	5,08			
Lufttemperatur for fordamp (S3) regulering [C]	5,29	5,33	5,23	5,28	5,27	5,26	5,28	5,23	5,26			
Lufttemperatur efter fordamp (S4) regulering [C]	3,91	3,88	3,43	3,85	3,79	3,96	3,91	3,95	3,95			
Massestrøm korrigeret til S3 = 5,5°C	5,90	1,43	18,85	12,63	12,56	4,14	4,19	4,29	4,13			
Frostgondol												
Parameter	Forsøg 4	Forsøg 7	Forsøg 10	Forsøg 16	Forsøg 19	Forsøg 23	Forsøg 26	Forsøg 29	Forsøg 31			
CutIn [C]	-13	-13	-13	-13	-13	-13	-13	-13	-13			
CutOut [C]	-15	-15	-15	-15	-15	-15	-15	-15	-15			
Regulering	On-Off	On-Off	On-Off	On-Off	On-Off	On-Off	On-Off	On-Off	On-Off			
Samlet afmåningstid [min], [%]	117	111	111	121	119	116	114	113	109			
Samlet off-tid [min], [%]	628	770	596	486	471	595	586	622	738			
Massestrøm af afmåningsvand i frostgondol [L/døgn]	2,560	1,600	3,040	3,280	3,200	2,600	2,440	2,680	2,200			
Fordampningstemperatur [C]	-31,80	-31,70	-31,29	-31,35	-31,32	-31,52	-31,50	-31,72	-30,37			
Aktuel overhedning	15,19	14,89	15,43	14,69	13,81	14,69	14,69	14,79	15,06			
Reference overhedning	9,95	9,98	9,95	9,84	9,63	9,63	9,86	9,94	9,99			
Gennemsnitlig lufttemperatur for fordamp (S3) [C]	-12,67	-13,27	-12,00	-12,89	-13,41	-13,40	-13,42	-13,48	-11,64			
Gennemsnitlig fordampoverfladetemperatur (S2) [C]	-25,49	-25,06	-25,17	-26,22	-26,61	-25,37	-25,43	-25,26	-22,60			
Gennemsnitlig lufttemperatur efter fordamp (S4) [C]	-20,95	-20,92	-20,99	-22,20	-21,62	-21,62	-21,62	-21,51	-19,09			
Gennemsnitlig lufttemperatur i frostgondol [C]	-15,86	-15,82	-15,44	-16,94	-17,29	-16,35	-16,41	-16,25	-14,15			
Lufttemperatur for fordamp (S3) regulering [C]	-13,46	-13,81	-13,21	-13,42	-13,36	-13,47	-13,43	-13,51	-11,92			
Lufttemperatur efter fordamp (S4) regulering [C]	-21,82	-21,84	-22,49	-23,38	-24,11	-22,39	-22,45	-22,22	-19,58			
Massestrøm korrigeret til S3 = 13,5°C	3,27	1,80	4,31	3,80	3,28	2,68	2,50	2,70	3,77			



Studenterprojekt om kantvarme på kølemøbler

Analyse af kantvarme ved kølemøbler



Projekt udført ved Danmarks Tekniske Universitet
Juni 2006

Iben Moll Rasmussen, s031982

Indhold

NOMENKLATUR	3
INDLEDNING.....	4
FORMÅL	4
AFGRÆNSNING.....	4
METODE.....	4
BESKRIVELSE AF KANTEN	5
FORSØG I KLIMAKAMMER	6
FORMÅL	6
FORSØGSBESKRIVELSE.....	6
RESULTATBEHANDLING.....	7
KONKLUSION	11
MODELLERING	12
REGULERING.....	19
KONKLUSION	21
REFERENCER	22

BILAG 1: Look up tabel i EES

BILAG 2: Integraltabel i EES

BILAG 3: Udregning af effekt til kantvarme

Vedlagt på CD-ROM: Anvendte forsøgsdata samt EES modeller

Nomenklatur

Symbol	Enhed	Beskrivelse
m	kg	Masse af den øverste kant
c_p	$\frac{J}{kg \cdot K}$	Varmekapacitet for kanten
τ	s	Tid
\dot{Q}	W	Kantvarmen
\bar{h}	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$	Konvektive varmeovergangstal
A	m^2	Overfladeareal af den øverste kant
T_∞	K	Temperatur af luften i klimakammer
T_{kant}	K	Temperatur af den øverste kant
g	m/s^2	Tyngdeaccelerationen
ν	m^2/s	Luftens kinematiskse viskositet
α	m^2/s	Luftens diffusivitet
O	m	Kantens omkreds
k	$\frac{W}{m \cdot K}$	Luftens varmeledningsevne

Indledning

Formål

På frostgondoler i supermarkeder er der ofte problemer med vand på kanten som følge af at kanttemperaturen ligger under dugpunktet for luften i supermarkedet. En våd kant giver kunderne en dårlig oplevelse hvorfor man ønsker at undgå denne vanddannelse på kanten. Der er derfor installeret kantvarme i gondolerne. Problemet er bare at kantvarmen kun kan være tændt eller slukket hvorfor man ofte vælger at køre med kantvarmen tændt hele tiden selvom det ikke er nødvendigt. Fra et energimæssigt synspunkt vil det derfor være smart hvis man kunne minimere forbruget af kantvarme samtidig med at kanten holdes tør.

Formålet med dette projekt er derfor at finde frem til en styrestrategi for kantvarmen i frostgondoler, således at der ikke sætter sig dug på kanten samtidig med at energiforbruget til kantvarmen minimeres.

Afgrænsning

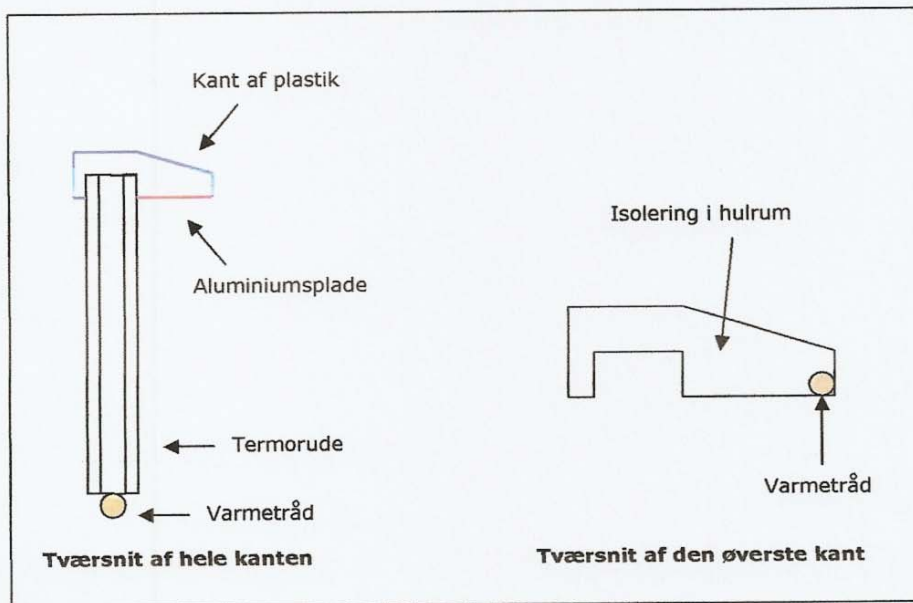
I dette projekt ses der kun på den kant som kunderne kommer i berøring med, selvom der er installeret kantvarme flere steder, jf. beskrivelsen af kantvarmen på side 5.

Metode

Projektet består af to dele. Den første del er en forsøgsdel hvor der laves målinger på en frostgondol i et klimakammer på DTU for at finde kanttemperaturen ved forskellige tilstande i klimakammeret og ved forskellige indstillinger for kantvarmen. Den anden del er en modelleringsdel hvor der opstilles en matematisk model for kanttemperaturen. Idéen er så at få den matematiske model til at stemme overens med virkeligheden (dataene fra forsøgene) ved at tilpasse den matematiske model så der kan laves en styrestrategi.

Beskrivelse af kanten

Kanten, på den frostgondol der ønskes undersøgt, består af en termorude samt en plastikkant øverst. Et tværsnit af kanten ses på Figur 1. Kantvarmen består af to varmetråde. Den ene varmetråd sidder på indersiden af plastikkanten omgivet af isolering og den anden sidder neden under termoruden, jf. Figur 1. Begge varmetråde afgiver den samme effekt overalt. Kantvarmen kan enten være tændt eller slukket og den indstilles til at være tændt en given procentdel af et selvvalgt interval på mellem 6 og 60 min.



Figur 1: Tværsnit af kant

Forsøg i klimakammer

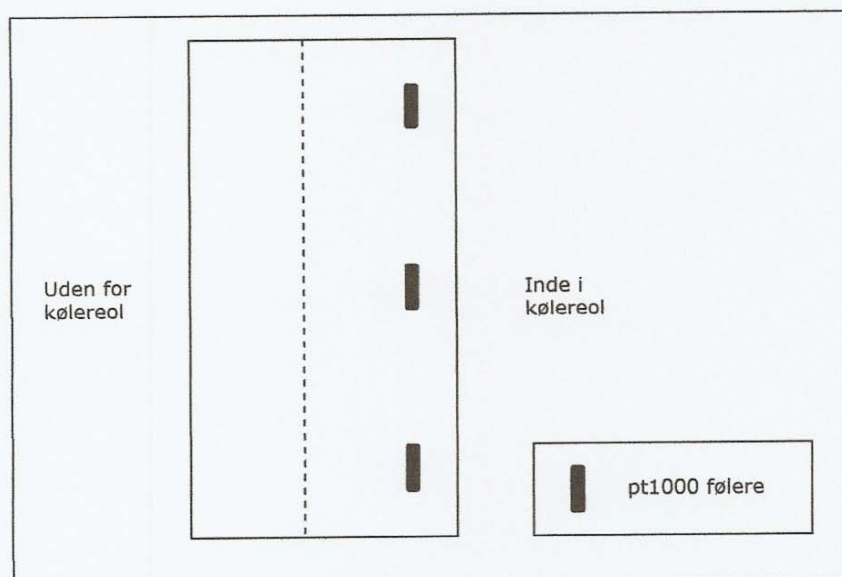
Formål

Formålet med forsøgene er at undersøge sammenhængen mellem kanttemperaturen på oversiden af plastikkanten og omgivelsernes tilstand, temperatur og relativ fugtighed, under forskellige indstillinger for kantvarmen.

Forsøgsbeskrivelse

Forsøgene er udført i klimakammer på DTU hvori det er muligt at styre temperatur og relativ fugtighed og der er lavet forsøg med tre forskellige indstillinger for klimakammeret. Forsøgene er udført med temperaturer på 15, 20 og 25 °C i klimakammeret. Den relative fugtighed holdes konstant på 50 % i alle tre forsøg, da det kan antages at den relative fugtighed ikke har indflydelse på kantens temperatur. De 50 % er valgt da luftfugtigheden i supermarkeder sjældent er højere end denne værdi. Temperaturerne er valgt ud fra at temperaturen i et supermarked vil ligge i dette interval. I forsøgene sættes intervallet for kantvarmen til 10 min. og kantvarmen sættes til at være tændt i 0, 15, 25, 40, 50, 75 og 100 % af de 10 min.

Kanttemperaturen måles tre forskellige steder på kanten så der er monteret tre pt1000 følere langs med kanten, jf. Figur 2.

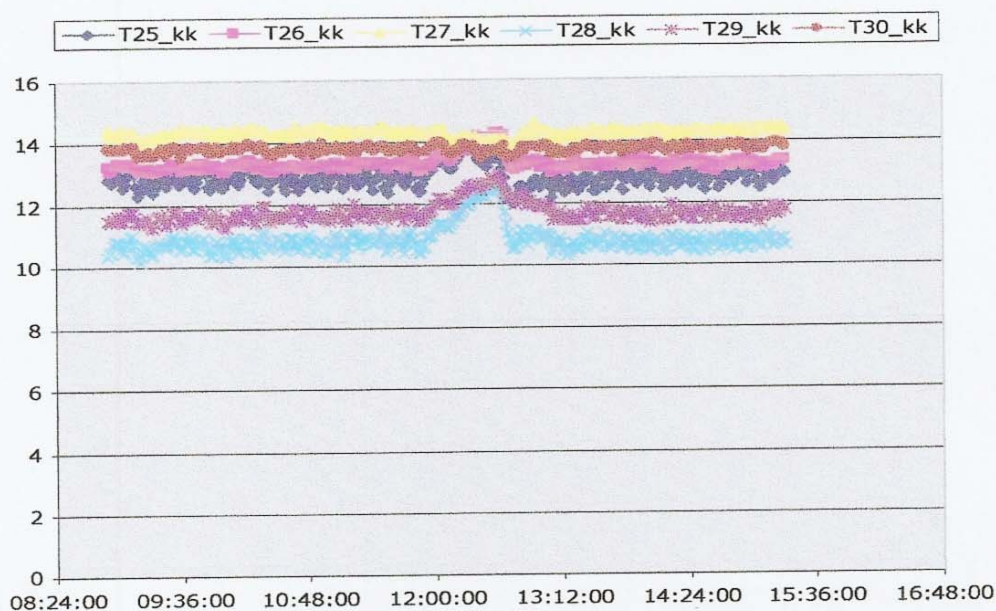


Figur 2: Plastikkant set fra oven

Resultatbehandling

Temperatur og relativ fugtighed i klimakammer

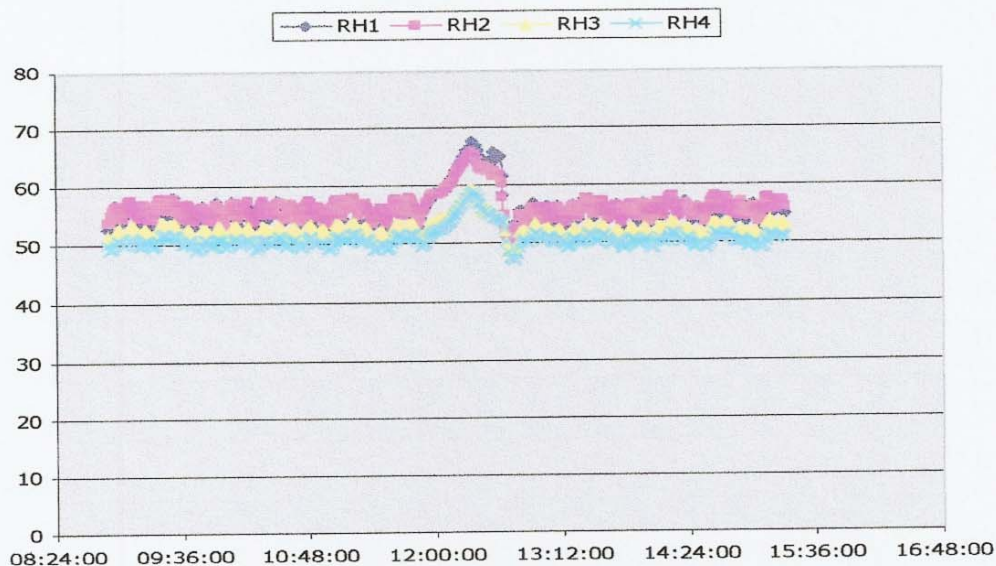
Det viser sig at temperaturerne er noget lavere end de ønskede værdier men de er stort set stabile hvilket de også skal være. På Figur 3 ses de faktiske temperaturer i klimakammeret når den ønskede temperatur er på 15 °C. Det eneste tidspunkt de svinger lidt er under afrimning. Det ses at temperaturerne ca. ligger mellem 10,5 og 14,5 °C alt efter hvor i kammeret der måles. For ønskede temperaturer på 20 og 25 °C er mønstret det samme som ved de 15 °C. Her ligger de faktiske temperaturer for 20 °C mellem 14,5 og 19,5 °C og for 25 °C ligger de mellem 19 og 25 °C.



Figur 3: Temperatur i klimakammer ved en ønsket temperatur på 15 °C

Når man ser på de relative fugtigheder svinger de enkelte fugtfølere en del og er ofte højere end de ønskede 50 %. Under afrimning svinger de mere end ellers. På Figur 4 ses de relative fugtigheder for en ønsket temperatur på 15 °C og mønstret er det samme når den ønskede temperatur er på hhv. 20 og 25 °C.

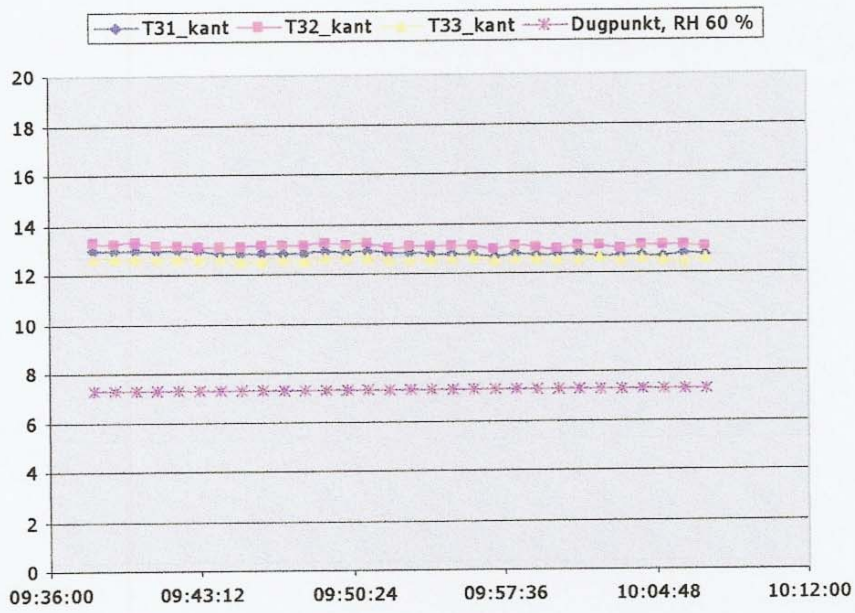
Da kanttemperaturen som nævnt ikke afhænger af den relative fugtighed gør det ikke noget at denne ikke er helt stabil. Det vigtigste er, at temperaturen i kammeret er stabil hvilket den også er når man ser på hver føler for sig.



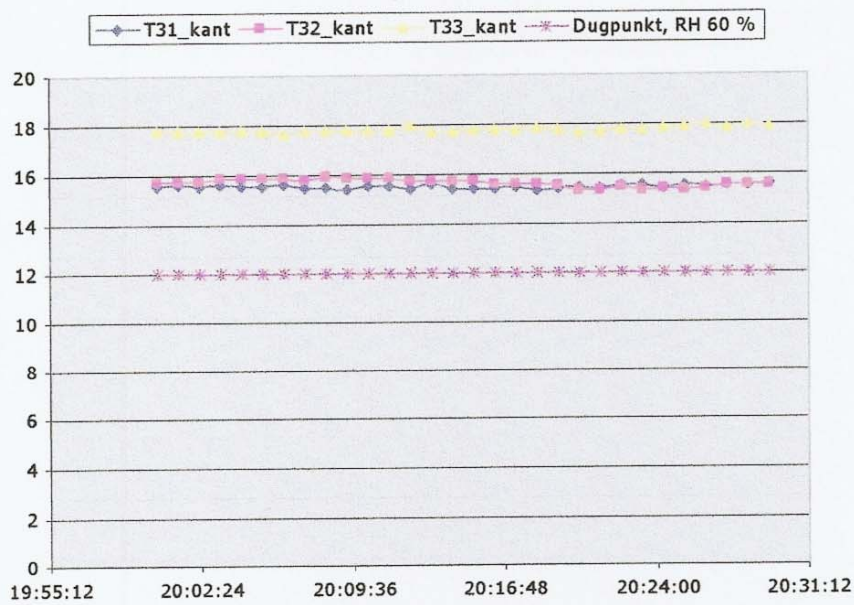
Figur 4: Relativ fugtighed i klimakammer ved ønskede værdier på 15 °C og 50 %

Kanttemperaturer

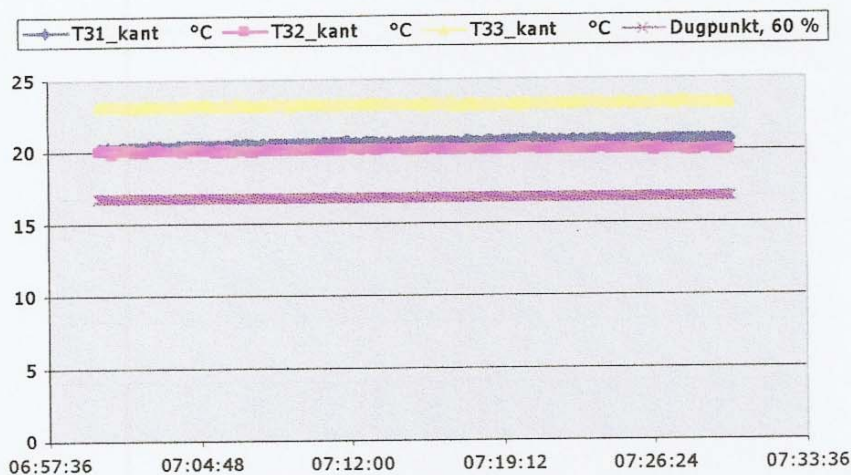
På Figur 5 til Figur 7 ses kanttemperaturerne samt dugpunkterne for de tre forsøg hvor kantvarmen er sat til 0 %. Dugpunktet er regnet ud fra den ønskede temperatur og en fugtighed på 60 % da dette er den højeste fugtighed der vil kunne være i et supermarked. Det ses at kanttemperaturerne er nogenlunde konstante hvilket de også bør være eftersom kantvarmen er slukket. Desuden ses det at kanttemperaturen ikke er ens på hele kanten. Dette kan der være flere grunde til, men et godt bud er at luftstrømmen hen over kanten er uensartet. Grunden til at kanttemperaturerne ligger tæt på temperaturen i klimakammeret er at kanten kun er i kontakt med omgivelsernes luft samt at kanten er lavet af plastik som virker isolerende. Derudover ses det tydeligt at kanttemperaturerne ikke nærmer sig dugpunkterne hvilket betyder at der ikke vil sætte sig dug på kanten og den vil således forblive tør selvom kantvarmen er slukket konstant. Man kan derfor undre sig over hvorfor der overhovedet er kantvarme installeret på denne type gondol.



Figur 5: Kanttemperaturer ved T 15 C i klimakammer



Figur 6: Kanttemperaturer ved T 20 C i klimakammer



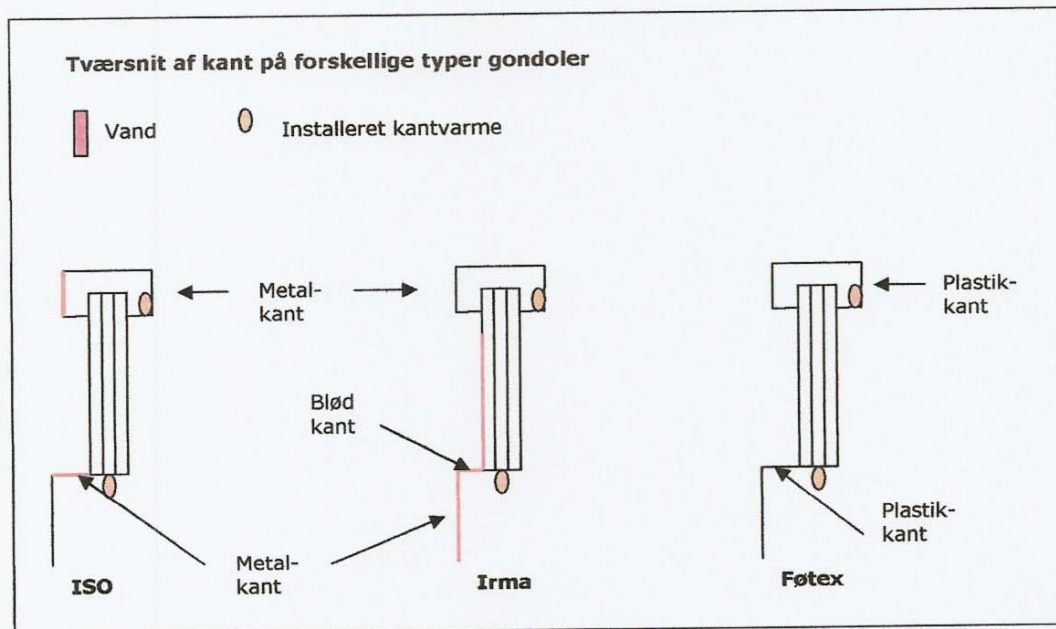
Figur 7: Kanttemperaturer ved T 25 C i klimakammer

Ud fra forsøgene må det konstateres at de gondoler hvorpå der sætter sig vand på den øverste kant må være af en anden type end den der er anvendt her. På mange frostgondoler i supermarkeder er kanten ikke lavet af plastik men af metal hvilket kan være en medvirkende årsag til at kanten bliver våd, da metal er meget bedre til at lede varme end plastik, hvorfor kanten vil blive koldere når der slukket for kantvarmen. En anden ting der kan være årsag til om der dannes dug eller ej på den øverste kant er om kanten er i kontakt med den kolde luft i gondolen; altså om den kolde luft i gondolen rammer den øverste kant eller om den rammer nede på glasset.

For at finde ud af på hvilke typer gondoler der er problemer med våde kanter, er frostgondolerne i ISO, Irma og Føtex i Lyngby studeret. I alle tre supermarkeder anvendes forskellige typer gondoler, hvor tværsnit af kanterne er vist på Figur 8. Fælles for de tre typer gondoler er dog at de består af en termorude, mens kanterne under samt over ruden er forskellige.

I ISO var der tændt for kantvarmen i nogle gondoler mens der i andre var slukket. I de gondoler hvor kantvarmen var tændt var der ingen problemer. I de gondoler hvor kantvarmen var slukket var der derimod vand på ydersiden af den øverste kant samt på kanten under glasset, jf. Figur 8. I Irma var der heller ikke problemer i de gondoler hvor kantvarmen var tændt. I gondolerne med slukket kantvarme var der vand på glasset, på den bløde kant under glasset samt på metalkanten ved den bløde kant, jf. Figur 8. På den øverste metalkant var der derimod ingen problemer og årsagen til dette er nok at den kolde luft slet ikke er i kontakt med denne kant, da den kolde luft rammer glasset ca. 10 cm under den

øverste kant. I Føtex var der ingen varme i den øverste kant, måske er der slet ikke installeret kantvarme i denne kant ellers var den bare slukket, mens der var tændt for kantvarmen ved glasset. Der var ingen gondoler med vand på i Føtex. Det var også på gondolerne i Føtex at den kolde luft ramte glasset længst væk fra den øverste kant – nemlig ca. 15 cm under kanten.



Figur 8: Tværsnit af kant på forskellige typer gondoler

Konklusion

På baggrund af resultaterne for forsøgene samt observationerne i de tre supermarkeder kan det konstateres at den valgte gondol ikke er den bedste til forsøg med kantvarme i den øverste kant, da denne er lavet af plastik, som virker isolerende. Hvis man vil undgå vand på den øverste kant bør man således lave denne kant af plastik frem for metal. Dette medfører desuden at kantvarmen i den øverste kant kan sløjfes. Hvis den øverste kant er lavet af metal har det også betydning om den kolde luft fra gondolen er i kontakt med kanten eller ej – hvis den er det, er der nemlig stor sandsynlighed for at der vil sætte sig dug på kanten.

Derudover kan det konstateres at man bør lave forsøg hvor temperaturerne af termoruden samt kanten under glasset undersøges, da der i supermarkederne er store problemer med vand på disse kanter. I de supermarkeder hvor den øverste kant var af metal var der også problemer med vand men dette bliver svært at lave forsøg med i klimakammeret medmindre man kan udskifte plastikkanten til en af metal.

Modellering

Ud fra dataene fra forsøgene ønskes det nu at modellere kantens temperatur som funktion af kantvarmen og lufttemperaturen i klimakammeret med henblik på at finde en styrestrategi for kantvarmen.

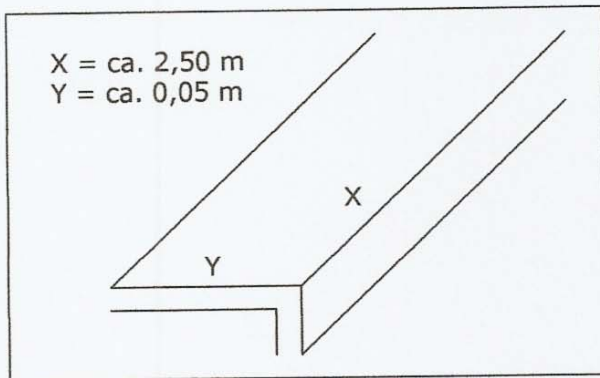
Temperaturen af kanten svinger meget alt efter om der måles på undersiden, på siden eller på oversiden af kanten. Da vi kun har lavet temperaturmålinger på oversiden af kanten bliver det svært at opstille en energibalance for hele kanten, så der ses kun på den kant hvor der er foretaget målinger. Følgende energibalance kan derfor opstilles:

$$m \cdot c_p \cdot \frac{dT_{kant}}{d\tau} = \dot{Q} - \bar{h} \cdot A \cdot (T_{kant} - T_{\infty})$$

$\bar{h} \cdot A$ beregnes teoretisk, hvorefter \dot{Q} og $m \cdot c_p$ beregnes ud fra dataene fra forsøgene. Det er ikke muligt at anvende den målte effekt fra varmetråden, da varmen fra varmetråden bliver tilført både til under-, side- og overkanten, hvorfor \dot{Q} (tilført varmemængde til overkanten) beregnes ud fra forsøgsdata. I denne model antages det at \dot{Q} er konstant hvilket i praksis ikke vil være tilfældet - \dot{Q} vil afhænge af hvor længe kantvarmen er tændt ad gangen, men da det vil gøre modellen meget mere kompliceret, ses der bort fra dette. Grunden til at \dot{Q} ikke er konstant er at varmetråden er placeret et stykke væk fra overkanten, så jo længere tid kantvarmen er tændt des mere varme vil der bevæge sig op til overkanten.

Udregning af $\bar{h} \cdot A$

Overfladearealet af kanten beregnes ud fra kantens dimensioner, der er vist på Figur 9. Arealet bliver således 0,125 m².



Figur 9: Dimensioner af oversiden af kanten

På oversiden af kanten er der naturlig konvektion, så for at finde det konvektive varmeovergangstal skal man først finde Nusselt-tallet der beregnes ud fra Rayleigh-tallet.

$$Ra_L = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_{kant} - T_\infty) \cdot L^3}{\nu \cdot \alpha} \quad [1, \text{ side 507}]$$

$$\beta = \frac{1}{T_\infty} \quad [1, \text{ side 500}]$$

$$L = \frac{A}{O} \quad [1, \text{ side 512}]$$

g er tyngdeaccelerationen og ν og α findes ved tabelopslag for luft ved $T_\infty = 300 \text{ K}$.

$$g = 9,8 \text{ m/s}^2$$

$$\nu = 15,89 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \quad [1, \text{ side 831}]$$

$$\alpha = 22,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \quad [1, \text{ side 831}]$$

Da $(T_{kant} - T_\infty)$ ikke er konstant udregnes Ra_L for forskellige temperaturdifferenser for at se hvor stor betydning det har. Den maksimale temperaturdifferens er på ca. 10 K, så Ra_L udregnes for en temperaturdifferens på 2,5 K, 5 K, 7,5 K og 10 K.

$$\overline{Nu}_L = 0,54 \cdot Ra_L^{0,25} \quad [1, \text{ side 513}]$$

$$\bar{h} = \frac{\overline{Nu}_L \cdot k}{L} \quad [1, \text{ side 507}]$$

hvor k findes ved tabelopslag for luft ved $T_\infty = 300$ K.

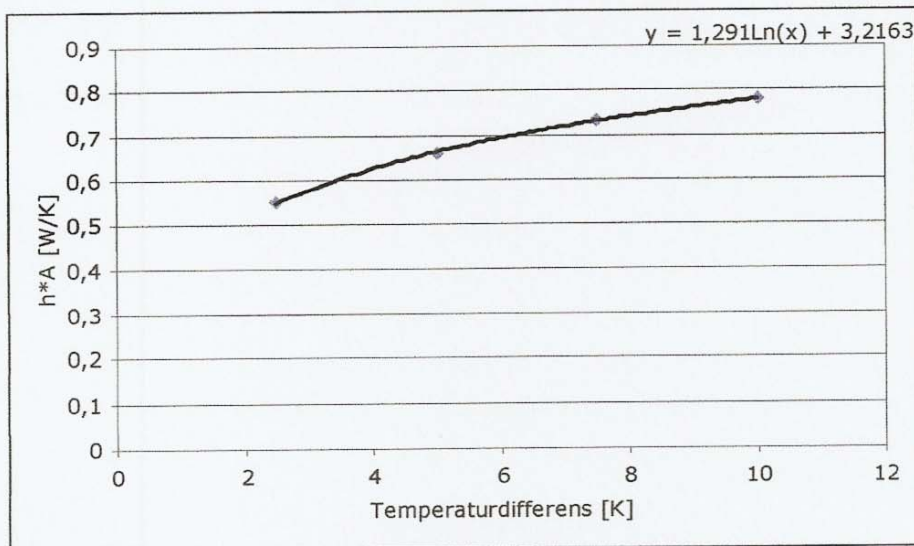
$$k = 26,3 \cdot 10^{-3} \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K}) \quad [1, \text{ side } 831]$$

I nedenstående tabel ses $\bar{h} \cdot A$ for de forskellige temperaturdifferenser.

$(T_{kant} - T_\infty)$ [K]	$\bar{h} \cdot A$ [W/K]
2,5	0,55
5	0,66
7,5	0,73
10	0,78

Det ses at temperaturdifferensen har betydning for $\bar{h} \cdot A$, så det vil ikke være korrekt at antage at $\bar{h} \cdot A$ er konstant. I stedet findes sammenhængen mellem de to, således at det konvektive varmeovergangstal bliver en funktion af temperaturdifferensen mellem kanttemperaturen og temperaturen af luften i supermarkedet. Dataene fra ovenstående tabel plottes i Excel og der findes en funktion for $\bar{h} \cdot A$ vha. en tendenslinie, jf. Figur 10. Dvs. at

$$\bar{h} \cdot A = 1,291 \cdot \text{Ln}(T_{kant} - T_\infty) + 3,2163$$



Figur 10: $\bar{h} \cdot A$ som funktion af $(T_{kant} - T_\infty)$

Udregning af \dot{Q}

\dot{Q} beregnes ud fra dataene fra en temperatur på 15 °C i klimakammeret og en kantvarme på 100 %. I denne situation er $\frac{dT_{kant}}{d\tau} = 0$ da kanttemperaturen er konstant. Følgende energibalance kan derfor opstilles

$$0 = \dot{Q} - \bar{h} \cdot A \cdot (T_{kant} - T_{\infty})$$

$$0 = \dot{Q} - (1,291 \cdot \ln(T_{kant} - T_{\infty}) + 3,2163) \cdot (T_{kant} - T_{\infty})$$

Fra dataene findes

$$(T_{kant} - T_{\infty}) = (23,4 - 13,3)K = 10,1K$$

Hvilket medfører at

$$0 = \dot{Q} - (1,291 \cdot \ln(10,1) + 3,2163) \cdot (10,1)$$

$$\dot{Q} = 63W$$

Den målte effekt til kantvarmen er ifølge BILAG 3 ca. 125 W, så det er ikke helt urealistisk at den afgivne varmemængde på oversiden af kanten ligger omkring de 60 W. Dog ville jeg nok have forventet en lidt lavere værdi, da undersiden af kanten er lavet af aluminium og samtidig er i kontakt med den kolde luft i gondolen, så jeg ville nok forvente at meget af varmen blev afsæt her samt på den lodrette del af plastikkanten, der også er i kontakt med den kolde luft.

Udregning af $m \cdot c_p$

$m \cdot c_p$ beregnes ud fra dataene fra en temperatur på 15 °C i klimakammeret og en kantvarme på 75 %. Når kantvarmen er tændt og temperaturen af kanten er stigende findes hældningen til

$$\frac{dT_{kant}}{d\tau} = 0,15$$

I samme periode er

$$(T_{kant} - T_{\infty}) = (20 - 13,5)K = 6,5K$$

Når energibalancen opstilles medfører dette at

$$m \cdot c_p \cdot 0,15 = 63 - (1,291 \cdot \ln(6,5) + 3,2163) \cdot (6,5)$$

$$m \cdot c_p = 176 J/K$$

Endelig energibalance

Den endelige energibalance kan nu opstilles

$$176 \cdot \frac{dT_{kant}}{d\tau} = \dot{Q} - (1,291 \cdot \ln(T_{kant} - T_{\infty}) + 3,2163) \cdot (T_{kant} - T_{\infty})$$

og \dot{Q} kan så enten være 0 eller 63 W.

Implementering i EES

Den fundne energibalance implementeres nu i EES, hvor værdierne for \dot{Q} og T_{∞} til hvert tidspunkt slås op i en "Look up" tabel, der er indsat fra Excel. Denne tabel indeholder forsøgsdata fra forsøget med 15 °C i klimakammeret og en kantvarme der er tændt 25 % af tiden, jf. BILAG 1.

Da EES kan have problemer med at regne på logaritmiske funktioner erstattes funktionen for $\bar{h} \cdot A$ med en lineær funktion. Funktionen for tendenslinien på Figur 10 erstattes derfor med $\bar{h} \cdot A = 0,0304 \cdot (T_{kant} - T_{\infty}) + 0,49$, der er fundet ved at indtegne en ny tendenslinie.

Modellen i EES kommer til at se således ud, hvor T_{∞} omgivelser er det samme som T_{∞} .

```
$IntegralTable Tid:60;T;Q_dot
```

```
MCP=176
```

```
HA=(0,0304*(T-T_omgivelser)+0,49)
```

```
tid_start=4680
```

```
tid_slut=8160
```

```
T0=INTERPOLATE('15C';'Tid';'T_kant';Tid=4680)
```

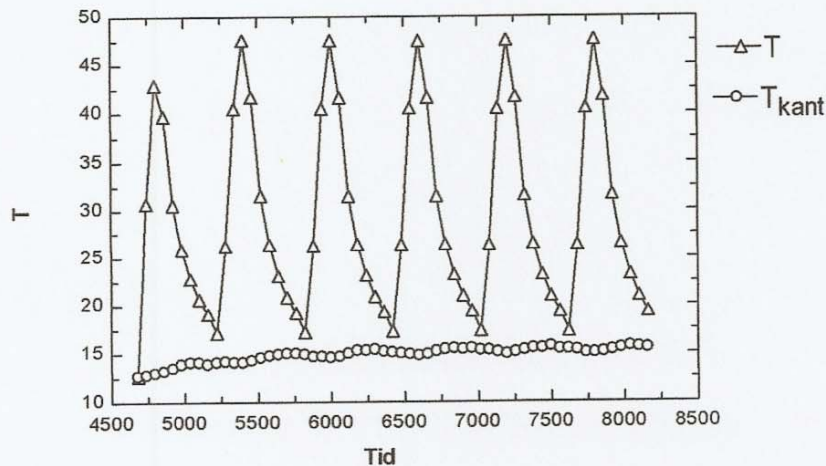
```
T_omgivelser=INTERPOLATE('15C';'Tid';'T_omgivelser';Tid=Tid)
```

```
Q_dot=INTERPOLATE('15C';'Tid';'Q_dot';Tid=Tid)
```

```
MCP*T_dot=Q_dot-HA*(T-T_omgivelser)
```

```
T=T0+INTEGRAL(T_dot;Tid;tid_start;tid_slut)
```

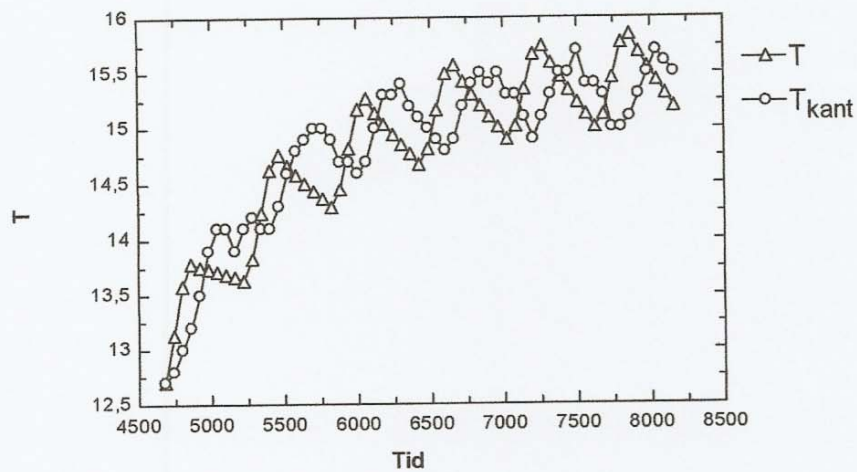
Ud fra den integraltabel EES laver vha. funktionen \$IntegralTable, se BILAG 2, kan man nu plote kanttemperaturen fra EES (T) som funktion af tiden. Herefter laves et overlay-plot af kanttemperaturen fra forsøget (T_{kant}) vha. "Look up" tabellen for at se om de stemmer overens. Graferne ses på Figur 11.



Figur 11: Graf for målt og beregnet kanttemperatur

Det ses tydeligt at de to grafer langt fra er ens, så ved at ændre på værdierne af $m \cdot c_p$ og $\bar{h} \cdot A$ kan man prøve at få de to grafer til at blive ens. Ved at øge $m \cdot c_p$ mindskes størrelsen af udsvinget og ved at øge $\bar{h} \cdot A$ rykker grafen for T tættere på grafen for T_{kant} .

Ved at øge $m \cdot c_p$ med en faktor 50 og $\bar{h} \cdot A$ med en faktor 15 kommer graferne til at se ud som på Figur 12.



Figur 12: Graf for målt og beregnet kanttemperatur når den beregnede temperatur er tilpasset den målte

Det ses at graferne stemmer overens bortset fra de ligger forskudt i forhold til hinanden. Det betyder at der er en tidsforsinkelse der ikke er taget højde for i simuleringen.

Regulering

Modellen i EES skal nu modificeres så den kan bruges til regulering. I stedet for at fastsætte kantvarmen ønsker man at holde kanttemperaturen på en temperatur der ligger lidt over dugpunktet. Da kanttemperaturen i forsøgene ikke kom tæt på dugpunktet giver det derimod ikke så meget mening at styre efter dugpunkts-temperaturen. I stedet kan man fastsætte en ønsket kanttemperatur på eksempelvis 22 °C så der styres efter at kanten altid har en behagelig temperatur når kunderne rører ved den.

Et godt bud på hvordan modellen i EES så kommer til at se ud er således:

```
$IntegralTable Tid:60;T;Q_dot
{Denne funktion beregner kantvarmen. Hvis temperaturen er under 22 C skal
kantvarmen være tændt ellers skal den være slukket}
FUNCTION Kantvarme(Temp)
if (Temp<22) then
Kantvarme=63
else
Kantvarme=0
ENDIF
END

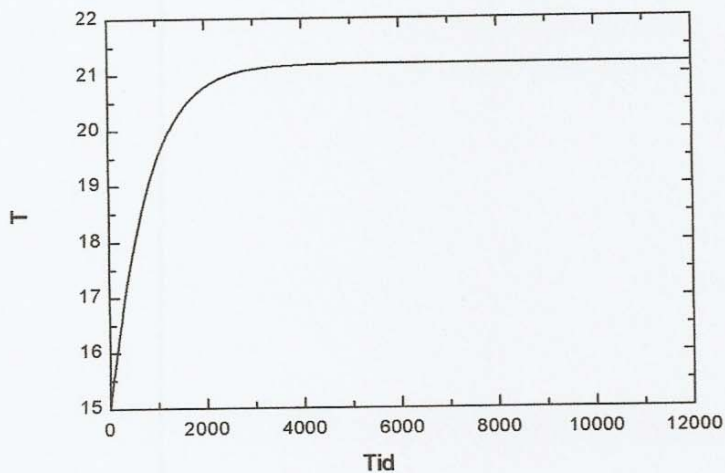
T_omgivelser=15      {Det fastsættes hvad omgivelsernes temperatur skal
være}
tid_start=0
tid_slut=12000      {Det fastsættes hvor længe simuleringen skal køre}

MCP=176*50
HA=(0,0304*(T-T_omgivelser)+0,49)*15

T0=T_omgivelser      {Starttemperaturen fastsættes til omgivelsernes tempe-
ratur}
Q_dot=Kantvarme(T)   {Kantvarmen findes vha. funktionen Kantvar-
me(Temp)}

MCP*T_dot=Q_dot-HA*(T-T_omgivelser)
T=T0+INTEGRAL(T_dot;Tid;tid_start;tid_slut)
```

Når omgivelsernes temperatur sættes til 15 °C er der ingen problemer med modellen for så skal kantvarmen være tændt hele tiden da temperaturen aldrig når helt op på 22 °C, jf. Figur 13.



Figur 13: Regulering ved 15 °C i omgivelsernes temperatur

Når omgivelsernes temperatur så sættes op til 20 °C får EES problemer med at finde en løsning. Jeg tror at fejlen ligger i funktionen der beregner kantvarmen hvor det går galt når kantvarmen skal være lig nul. Af tidsmæssige årsager har det dog ikke været muligt at få rettet fejlen, hvorfor reguleringsmodellen ikke kan anvendes pt.

Regulering i praksis

I praksis skal man være opmærksom på at når kantvarmen er tændt er den både tændt nede ved glasset og ved den øverste kant, så man skal lave reguleringen ud fra det sted, hvor kanten bliver koldest, da duggen vil sætte sig her først. Det skal man derfor undersøge inden man beslutter sig for en reguleringsstrategi. Mht. den gondol der er blevet lavet forsøg med, skal der derfor nok reguleres ud fra temperaturen nede ved glasset da der ikke var problemer med dug på den øverste plastikkant.

Konklusion

Ud fra forsøgene kan det konkluderes at dannelse af dug er afhængig af hvilken type gondol der anvendes og det bedste vil således være hvis den øverste kant er lavet af plastik. Dette medfører at der kun vil være problemer med dug ét sted – nemlig på kanten under termoruden. Hvis den øverste kant er lavet af metal er det af betydning om den kolde luft fra gondolen er i kontakt med kanten eller ej – hvis den er det, er der nemlig stor sandsynlighed for at der vil sætte sig dug på kanten.

Ud fra modelleringen kan det konkluderes at det er svært at opstille en ligning for kanttemperaturen ud fra teoretiske beregninger, da det viser sig at de teoretiske værdier ligger langt fra de værdier der skal benyttes for at graferne for den målte og beregnede kanttemperatur stemmer overens. Derudover skal man være opmærksom på at der er en tidsforsinkelse i beregningsmodellen, i forhold til de målte temperaturer, som er svært at implementere i beregningsmodellen. Det vigtigste er dog også at udsvingene er de samme og at temperaturerne ligger på samme niveau.

Ud fra reguleringsmodellen kan det konkluderes at ønsker man en kanttemperatur på 22 °C når der kun er 15 °C i supermarkedet skal kantvarmen være tændt konstant og så når man endda ikke helt op på de 22 °C. For temperaturer på 20 °C og 25 °C i supermarkedet kom modellen ikke til at virke pga. problemer når kantvarmen skal skifte fra tændt til slukket. Det er derfor ikke muligt at give et konkret bud på en reguleringsstrategi. Dog er jeg rimelig sikker på at idéen til opbygning af reguleringsmodellen er i den rigtige retning, jeg har bare ikke nået at få den til at virke optimalt.

Dato: 25/6-06 Iben Moll Rasmussen: Iben Rasmussen

Referencer

[1] Incropera F, De Witt D, Introduction To Heat Transfer, Fourth edition. John Wiley & Sons, 2002.

BILAG 1: Look up tabel i EES

Tid	T_kant	Q_dot	T_omgivelser
4680	12,7	63	13,5
4740	12,8	63	13,3
4800	13	63	13,5
4860	13,2	0	13,5
4920	13,5	0	13,4
4980	13,9	0	13,3
5040	14,1	0	13,3
5100	14,1	0	13,2
5160	13,9	0	13,3
5220	14,1	0	13,3
5280	14,2	63	13,4
5340	14,1	63	13,3
5400	14,1	63	13,4
5460	14,3	0	13,2
5520	14,6	0	13,2
5580	14,8	0	13,1
5640	14,9	0	13,2
5700	15	0	13,1
5760	15	0	13,2
5820	14,9	0	13,3
5880	14,7	63	13,2
5940	14,7	63	13,3
6000	14,6	63	13,2
6060	14,7	0	13,2
6120	15	0	13,2
6180	15,3	0	13,3
6240	15,3	0	13,3
6300	15,4	0	13,3
6360	15,2	0	13,3
6420	15,1	0	13,3
6480	15	63	13,3
6540	14,9	63	13,2
6600	14,8	63	13,2
6660	14,9	0	13,2
6720	15,2	0	13,2
6780	15,4	0	13,4
6840	15,5	0	13,4
6900	15,4	0	13,4
6960	15,5	0	13,3
7020	15,3	0	13,2
7080	15,3	63	13,2
7140	15,1	63	13,2
7200	14,9	63	13,3
7260	15,1	0	13,3
7320	15,3	0	13,3
7380	15,5	0	13,3
7440	15,5	0	13,3
7500	15,7	0	13,3

7560	15,4	0	13,3
7620	15,4	0	13,2
7680	15,3	63	13,2
7740	15	63	13,3
7800	15	63	13,4
7860	15,1	0	13,4
7920	15,3	0	13,3
7980	15,5	0	13,3
8040	15,7	0	13,3
8100	15,6	0	13,2
8160	15,5	0	13,2

BILAG 2: Integraltabel i EES

Tid	T	Q_dot
4680	12,7	63
4740	13,13	63
4800	13,58	62,88
4860	13,79	0,16
4920	13,75	-0,05908
4980	13,73	0
5040	13,71	0
5100	13,69	0
5160	13,66	-0,03476
5220	13,63	0,04801
5280	13,83	62,98
5340	14,24	63,06
5400	14,63	62,86
5460	14,76	0,1689
5520	14,66	-0,06024
5580	14,58	0
5640	14,51	0
5700	14,43	0
5760	14,37	-0,02897
5820	14,29	0,02489
5880	14,45	62,95
5940	14,82	63,07
6000	15,17	62,85
6060	15,27	0,176
6120	15,14	-0,06082
6180	15,04	0
6240	14,94	0
6300	14,85	0
6360	14,77	-0,02259
6420	14,68	9,54E-14
6480	14,81	62,93
6540	15,16	63,08
6600	15,49	62,84
6660	15,57	0,1814
6720	15,42	-0,06082
6780	15,3	0
6840	15,2	0
6900	15,1	0
6960	15,01	-0,01564
7020	14,9	0,02489
7080	15,02	62,91
7140	15,35	63,09
7200	15,67	62,83
7260	15,74	0,1849
7320	15,59	-0,06024
7380	15,46	0
7440	15,34	0
7500	15,23	0

7560	15,13	-0,00811
7620	15,01	0,048
7680	15,12	62,89
7740	15,45	63,1
7800	15,77	62,82
7860	15,84	0,1867
7920	15,69	-0,05908
7980	15,55	0
8040	15,43	0
8100	15,31	0
8160	15,19	0

BILAG 3: Udregning af effekt til kantvarme

Målt spænding, $U = 230 \text{ V}$

Målt strøm, $I = 0,54 \text{ A}$

Effekt, $P = U \cdot I \approx 125 \text{ W}$