

Projekttitel: Dynamisk sugetryksregulering i industrielle køleanlæg

Projektnummer: 337-064



Udarbejdet af: Jesper W. Petersen

07-07-2011

Indhold

1. Sammenfatning	3
1.1. Projektbeskrivelse	4
1.1.1. Energibesparelser	5
2. Projektudførelse	6
3. Målinger og beregninger	7
3.1. Måling af elforbruget til køleanlægget	8
3.2. Måling af isvand til simuleringsmodel.....	11
4. Muligheder og problemer	14
5. Diverse	15

Denne slutrapport indeholder "highlights" og kommentar til hvorfor Jesper Wulff Petersen konkludere, at det anvendte køleanlæg ikke var egnet til dynamisk sugetryksregulering. Han har erfaring fra et andet mejeri, hvor en ispåfrysningsspiral var blevet utæt og der kom ammoniak i isvandet. Dette resulterede i at der også skulle skiftes flere køleflader af kobber som var blevet utætte på grund af ammoniakken.

1. Sammenfatning

Projektet går ud på at undersøge energibesparelsen ved at behovsstyre sugetrykket på køleanlægget. Der er taget udgangspunkt i køleanlægget ved Christiansfeld Mejericenter, da dette køleanlæg i forvejen er udstyret med en dynamisk regulering af kondensatortrykket.

Konklusionen på projektet blev at køleanlægget ikke var egnet til dynamisk sugetryksregulering på grund af den måde køleanlægget er opbygget og anvendes. Der burde have været valgt flere forskellige køleanlæg til projektet, for at kunne finde et repræsentativt køleanlæg.

I analysen af køleanlæggets drift, kan det ses at køleanlægget kører med en næsten konstant grundlast. Denne grundlast kommer fra proceskølingen, ikke så meget fra rumkølingen. Proceskølingen foregår ved isvand, som laves på en 400 kW pladevarmeveksler og et isvandskar med ispåfrysningsspiraler. Det er disse ispåfrysningsspiraler der er dimensionsgivende for køleanlæggets sugetryk.

Et moderne mejeri i dag har et mere jævnt behov for isvand end i gamle dage, hvor man brugte isvand til indvejnningen og til pasteuriseringen som kun foregik i dagtimerne. I dag arbejdes der i skiftehold, så der er størst mulig udnyttelse af produktionsudstyret og derved bliver behovet for køling med isvand også fordelt over flere timer.

Køleanlægget på Christiansfeld Mejericenter er et samlet køleanlæg for både isvandsproduktion og direkte rumkøling. Dette medfører at køleanlægget skal køre efter isvandsanlægget da det har behov for det laveste sugetryk. Da isvandsbehovet næsten er kontinuertlig, så skal køleanlæggets sugetryk ligge mellem -8°C og -10°C for at opretholde og opbygge (akkumulere køle-energi) is på isvandsspiralen.

Dynamisk sugetryksregulering vil med fordel kunne benyttes til køleanlæg, der kun benyttes til kølerum i forbindelse med kølelagre og terminaler. Dynamisk sugetryksregulering er ikke egnet til andre kuldebehov og kølesteder, hvor der skal tages hensyn til proces- og produktionsudstyr, og hvor der er begrænset muligheder for at ændre sugetrykket. På Christiansfeld Mejericenter skal køleanlægget sektioneres, så en del af køleanlægget kan producere isvand uafhængigt af den anden del der leverer rumkøling til lagre.

1.1. Projektbeskrivelse

Undersøgelser viser, at der er meget stor forskel på, hvordan de enkelte køleanlæg drives og hvor god reguleringen er til at tage højde for den varierende belastning. Mange køleanlæg har i dag hastighedsregulering på elmotorerne for at undgå de store energitab, der er ved lave belastninger.

Projektet skal derfor redegøre for energibesparelsen, der kan opnås ved etablering af en dynamisk regulering af sugetrykket. Dette gøres ved at foretage målinger på industrielle køleanlæg, som skal danne grundlag for senere nøgletal til brug i forbindelse med vurdering af energibesparelser.

Behovsstyringen af sugetrykket skal gøres ud fra måling af udetemperaturen og den ønskede rumtemperatur. Ved at tage højde for den faldende varmebelastning ved faldende ude temperatur, forventes det at kunne spare energi til drift af køleanlæggene til kølelagre og kølede terminaler.

I projektet skal nedenstående punkter således belyses i forhold til et konstant sugetryk:

- Hvad sker der med det forholdsmæssige energiforbrug når sugetrykket bliver dynamisk
- Hvordan er energiforbruget set i forhold til ude temperaturen
- Hvad sker der med det forholdsmæssige energiforbrug når sugetrykket bliver dynamisk og der er konstant kondenseringstryk
- Hvad sker der med det forholdsmæssige energiforbrug når sugetrykket bliver dynamisk og der er dynamisk kondenseringstryk
- Hvilken indflydelse har det dynamiske sugetryk på energiforbruget til fordamper ventilatorerne

Til behovsstyring af kondensatortrykket er der installeret CP-Optimizer (udarbejdet under projektet "Optimum Condenser Control"), hvor der arbejdes efter følgende sammenhæng.

$$T_{c \text{ optimum}} (^{\circ}\text{C}) = 9,0 + T_{wb} (^{\circ}\text{C})$$

Formålet med nærværende projekt er at tilvejebringe en viden om den mest energioptimale kombination. Dvs. hvilken temperaturforskelle bør der være mellem ude temperatur og køleanlæggets sugetryk.

Resultaterne vil både kunne bruges af leverandører ved rådgivning samt af slutbrugerne i industrien. Energirådgiverne vil ligeledes kunne vejlede om det mest optimale sugetryk i kombination med ude temperaturen.

Projektet omfatter alle slagterier, mejerier, terminaler, kølelagre, catering grossister samt øvrige leverandører af varer på køl.

1.1.1. Energibesparelser

Statistisk falder slagterier ind under følgende:

Danmarks Statistik DB93: 151000
Beskrivelse: Slagterier mv.

Statistisk falder mejerier og iskremfabrikker ind under følgende:

Danmarks Statistik DB93: 155000
Beskrivelse: Mejerier og iskremfabrikker

Nedenstående skema viser en estimeret opdeling af elforbruget inden for køling i Danmark i år 2000 og der er givet et forsigtigt skøn på besparelsespotentialt.

Årligt opdelt elforbrug til køling			
År	Køling i DK [GWh/år]	Fødevarer og industri [GWh/år]	Besparelsespotentialt alt [GWh/år]
2000	3.600-3.950	823 - 1.053	82 - 105
	Kilde: ESO-afslutningsseminar	Kilde: ESO-afslutningsseminar	

Forbruget til køling er sat til 11 - 12 % af det samlede el-forbrug forbrug i DK.

På baggrund af elforbruget i år 2000 omhandler projektet dermed et elforbrug på:

Omhandlet elforbrug: 10% af 823 - 1053 GWh/år = **82 - 105 GWh/år**

Forbruget skal opdeles i energiforbruget til frost hvor temperaturen er under -15°C og køling hvor temperaturen er over -15°C

Årligt opdelt elforbrug til frost og køling			
År	frost [GWh/år]	køling [GWh/år]	Besparelsespotentialt køling [GWh/år]
2000	500 - 600	223 - 323	22,3 - 32,3

Optimeringen skal gerne medføre en besparelse på 10 % af det nuværende forbrug til industriel køling.

Projektets mål for realiserede el besparelser udgør dermed:

Mål, realiserede besparelser: = 22,3 - 32,3 GWh/år

2. Projektudførelse

Der er udvalgt en repræsentativ terminal til udførelse af forsøgene.

Arla Foods Amba, Christiansfeld Mejericenter

Metodikken har den ulempe at alle resultater i en forsøgsrække stammer fra et specifikt anlæg. Det vurderes imidlertid ikke at have stor indflydelse på resultaterne.

Der opsættes elmåleudstyr på kompressorer, kondensatorer og fordampere. Der opsættes temperaturmåleudstyr på udeluften, kølerumstemperaturen og sugetemperaturen/trykket.

Køleanlæggets samlede energiforbrug anvendes i følgende udstyr:

- Kompressorer, elmotorer, varmelegemer
- Pumper, kølemiddel (NH₃)
- Pumper, isvand
- Fordampere, ventilatorer
- Kondensatorer, ventilatorer, pumper
- Isvandstanke, røreværker

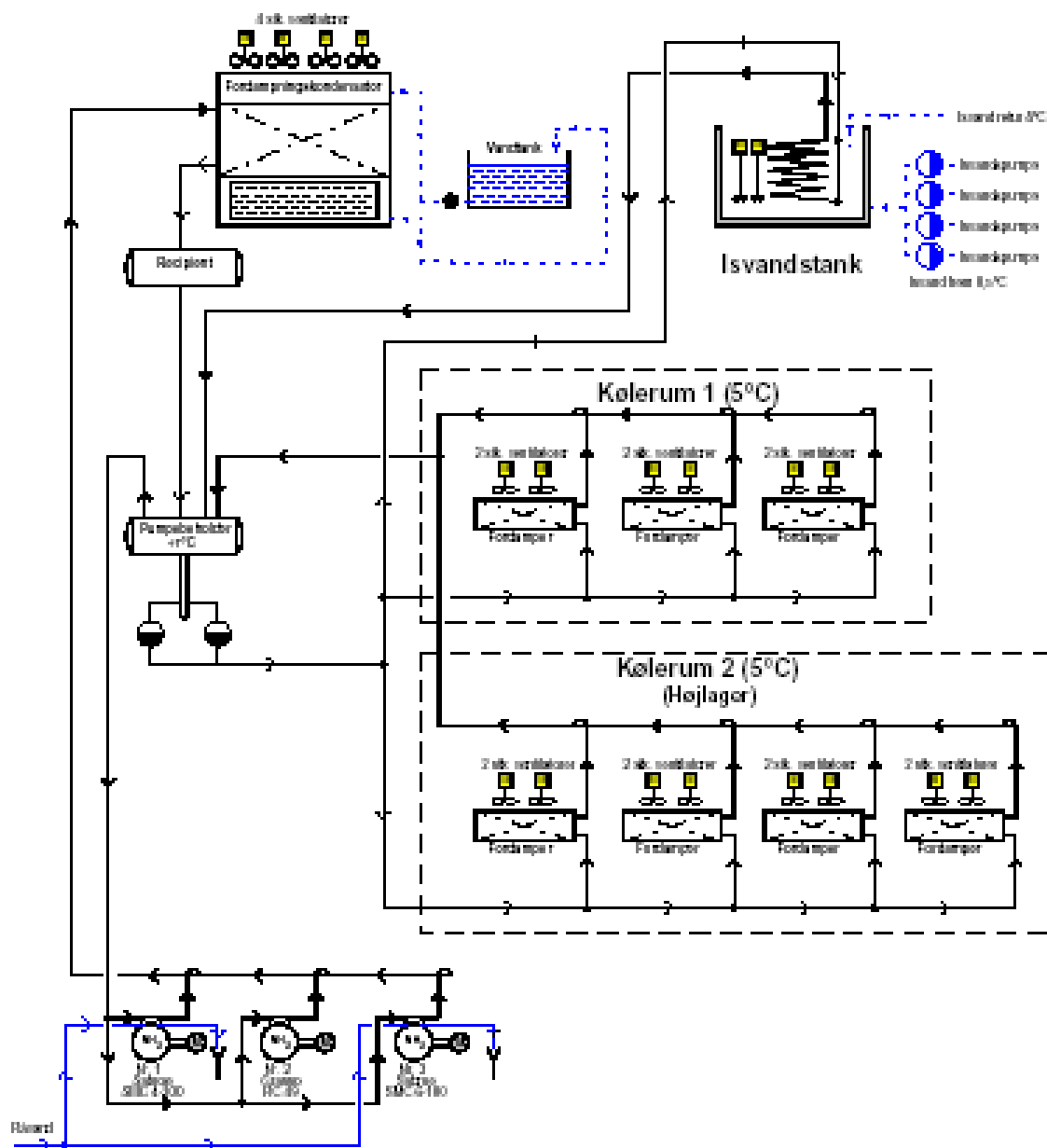
Energiforbruget er under indflydelse af følgende parameter i køleanlægget:

- Kondenseringstemperaturen
- Fordampningstemperaturen
- Trykfald i rør
- Reguleringen

Køleanlæggets parameter påvirkes af følgende udefra kommende tilstande:

- Ude temperaturen
- Den våde ude temperatur
- Kølerumstemperaturen
- Produktionsmængde
- Aktivitet

Nedenstående skitse viser opbygningen af et typisk køleanlæg på et mejeri:



3. Målinger og beregninger

Kølekompressorerne på Christiansfeld Mejericenter er med hastighedsregulerede elmotorer ved hjælp af frekvensomformere, som gør at der ikke bliver produceret mere køling end der er behov for. Endvidere er køleanlægget også forsynet med CP Optimizer som reducerer kondensatortrykket, når det er muligt.

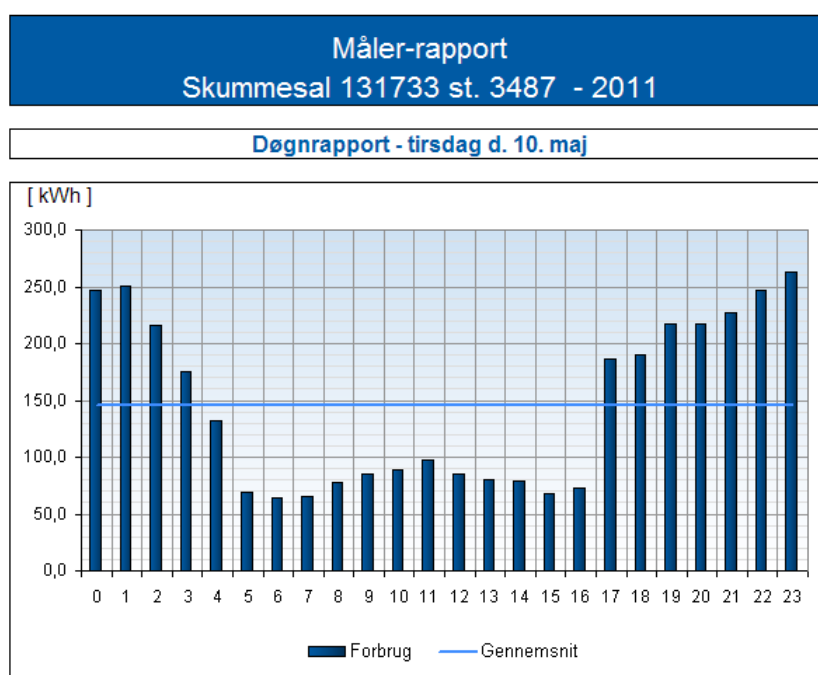
Derved opretholdes køleanlæggets gode effektivitet i situationer med varierende kølebelastning, som der er mellem sommerdrift og vinterdrift.

3.1. Måling af elforbruget til køleanlægget

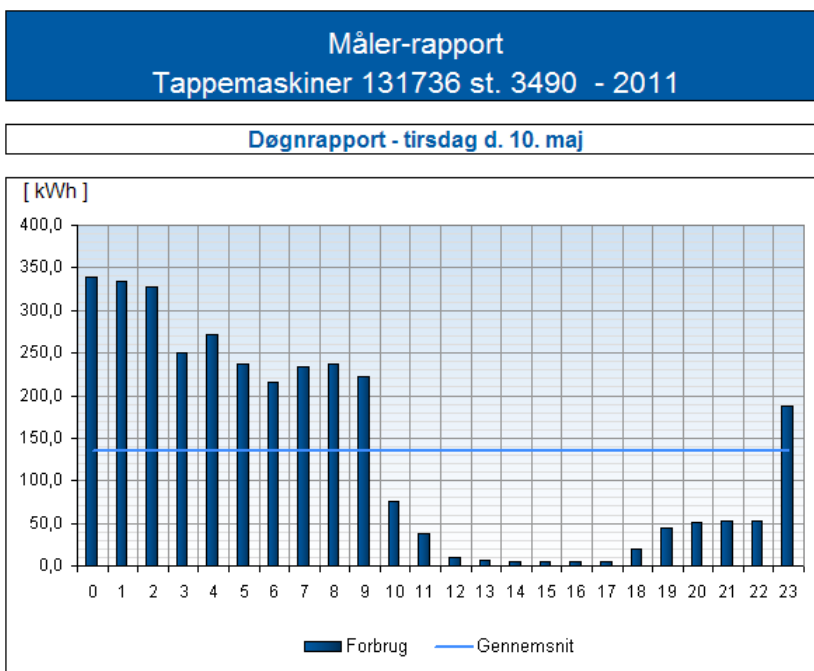
De seneste energimålinger for mejeriet viser tydeligt hvordan arbejdsprocessen er.

Råmælken bliver leveret i indvejningen, hvor den køles hvis den ikke er leveret kold nok. Derefter bliver råmælken pumpet over i nogle kølede tanke indtil den skal bearbejdes.

Når bearbejdning, behandling og tapning af mælk påbegyndes skal der trækkes ekstra på isvandet. Skummesalen er første station, hvor man separerer råmælken i fløde og mælk.



I skummesalen hvor produktionen starter, stiger energiforbruget og dermed også behovet for isvand i tidsrummet kl. 17 indtil kl. 04.



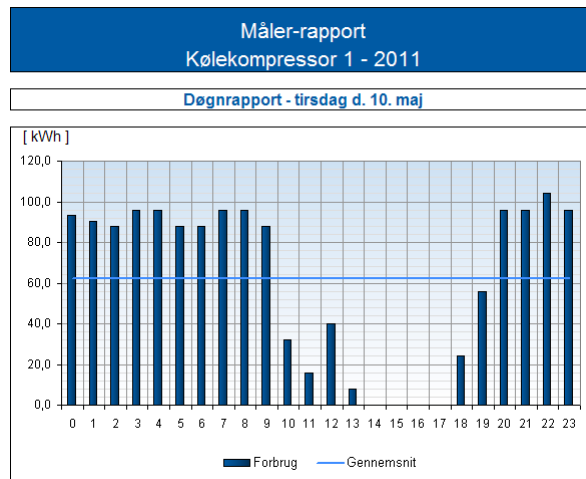
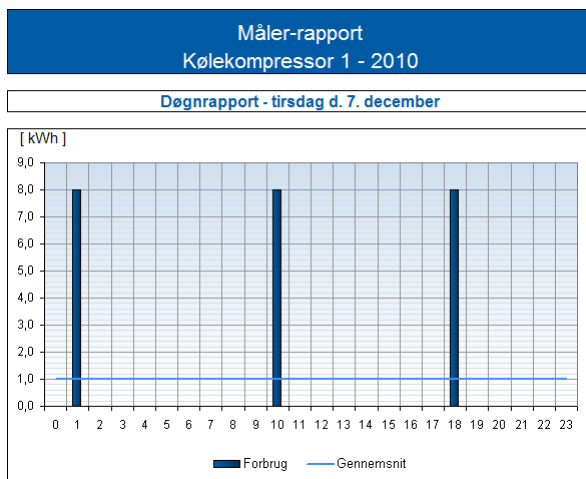
I tapperiet er arbejdsprocessen nogle timer forskudt fra kl. 23 indtil kl. 09.

Da hele køleanlægget kører på fælles sugeledning, vil kølekompresorerne regulere efter det ønskede kølebehov.

Det er isvandsspiralen der skal have en fordamningstemperatur på -8°C til -10°C for at kunne akkumulere is (kulde-energi) som er styrende for kompressorernes fordamningstemperatur.

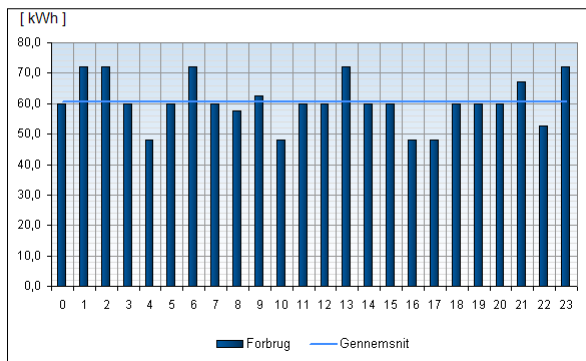
Der vil være en del træghed i isvandssystemet fra at mælkeproduktionen starter op og indkøringen er færdig, til at man kan se det på køleanlægget i form af øget kuldekald.

Energiforbruget for vinter og sommer synliggøres i følgende grafer:



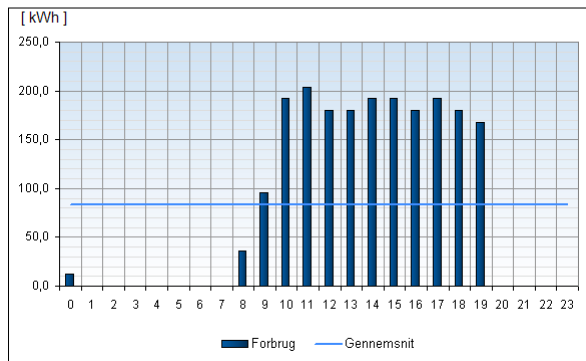
Måler-rapport
 Kølekompresor 2 - 2010

Døgnrapport - tirsdag d. 7. december



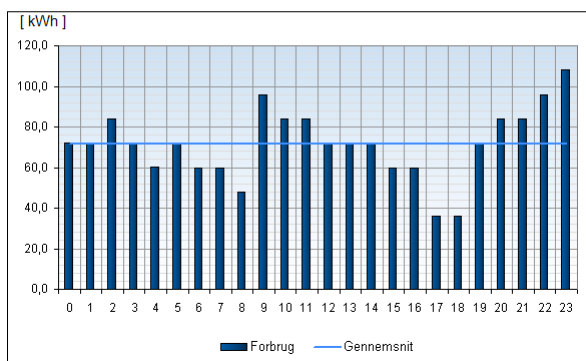
Måler-rapport
 Kølekompresor 2 - 2011

Døgnrapport - tirsdag d. 10. maj



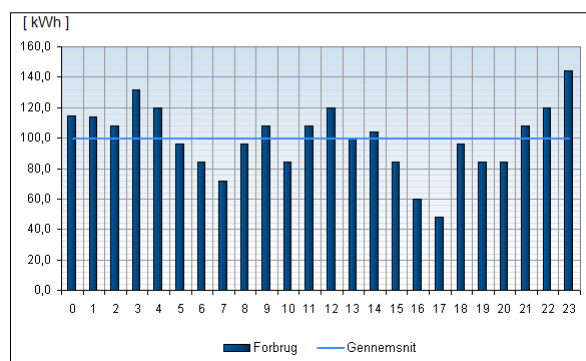
Måler-rapport
 Kølekompresor 3 - 2010

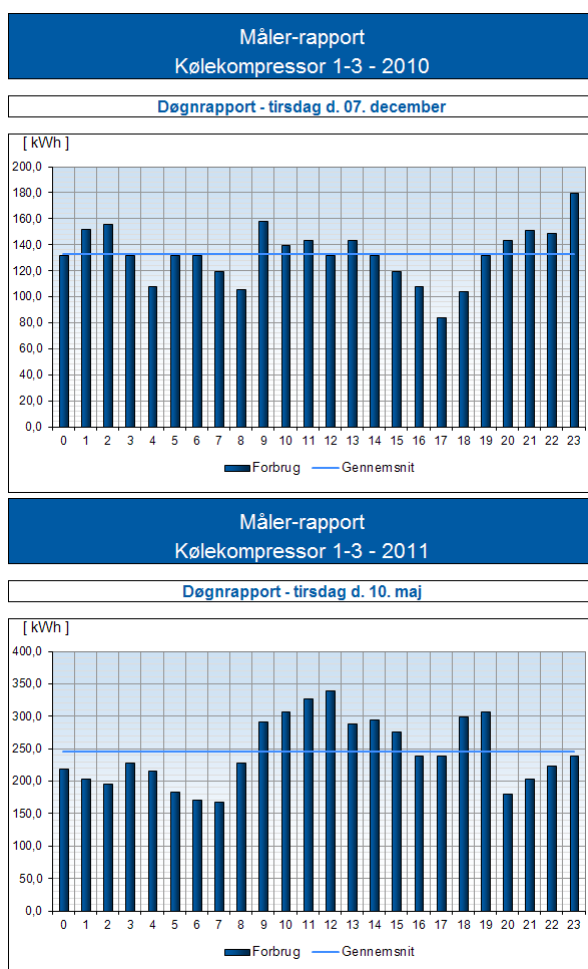
Døgnrapport - tirsdag d. 7. december



Måler-rapport
 Kølekompresor 3 - 2011

Døgnrapport - tirsdag d. 10. maj





Kølebehovet den 07. december er hovedsagligt kun til produktionen (forbrug af isvand), da udetemperaturen er lavere end den ønskede rumtemperatur.

3.2. Måling af isvand til simuleringsmodel

Isvandsforbruget er stort set konstant hen over året, da det hovedsagligt anvendes til køling efter pasteuriseringen samt en mindre del til henholdsvis køling ved indvejningen og køling af lagertanke.

Kølebelastningen med isvand i de forskellige processor på mejeriet foregår næsten kontinuert, dvs. indvejningen fra om formiddagen til om eftermiddag (kl. 10-16), tapperiet begynder om aften og fortsætter om natten (kl. 19-05). Hovedparten af isvandsforbruget ligger i de 2 tidsrum og der vil der være behov for et sugetryk på -8°C til -10°C for at opretholde eller påfryse is på rørslangen.

Begrundelsen for at anvende ispåfrysningsslangen til lagring af kølekapacitet er at man har en buffer der kan klare spidsbelastningerne. Derfor må man ikke afsmelte isen, da det kræver en del energi og tid at starte en ispåfrysning fordi fordampoverfladen (rørslangen) ikke er så stor, da man udnytter isens smeltevarme til

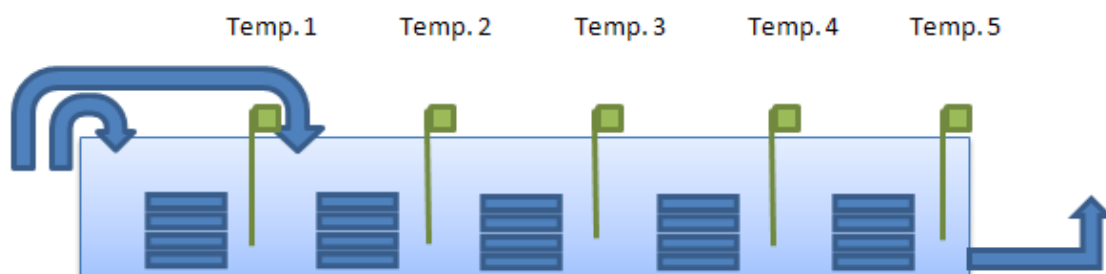
køling. Endvidere kan en frilæggelse (afsmelter al isen) af isvandsslangen skabe korrosion på rørslangen.

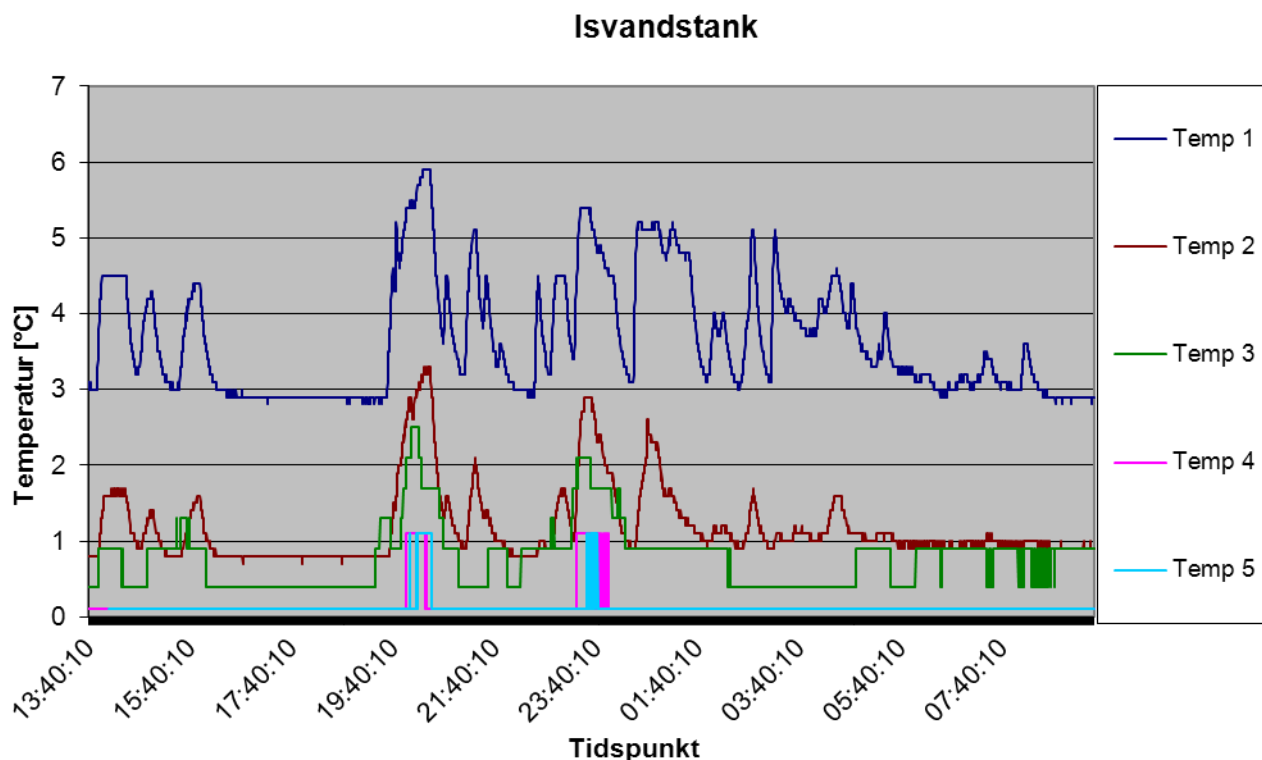
Kølebelastningen i kølerummene varierer meget hen over året, men de har nok det største daglige behov midt på dagen (kl. 12-16), og især i den varmeste periode er belastningen høj. Dette skyldes at kølerummene's belastning i høj grad er afhængig af den udendørs temperatur på grund af transmissionstabet gennem bygningsdelene og fra luftskiftet gennem døre og porte.

En regulering af kondensatortrykket er derimod rentabelt, da der er overskud af kondensatorkapacitet når kølebehovet falder dette gælder også når den udendørs temperatur falder. Til regulering af kondensatortrykket benyttes en CP-Optimizer, som er monteret ved Arla Foods Christiansfeld Mejericenter.

Beskrivelse af forholdene ved køleanlægget:

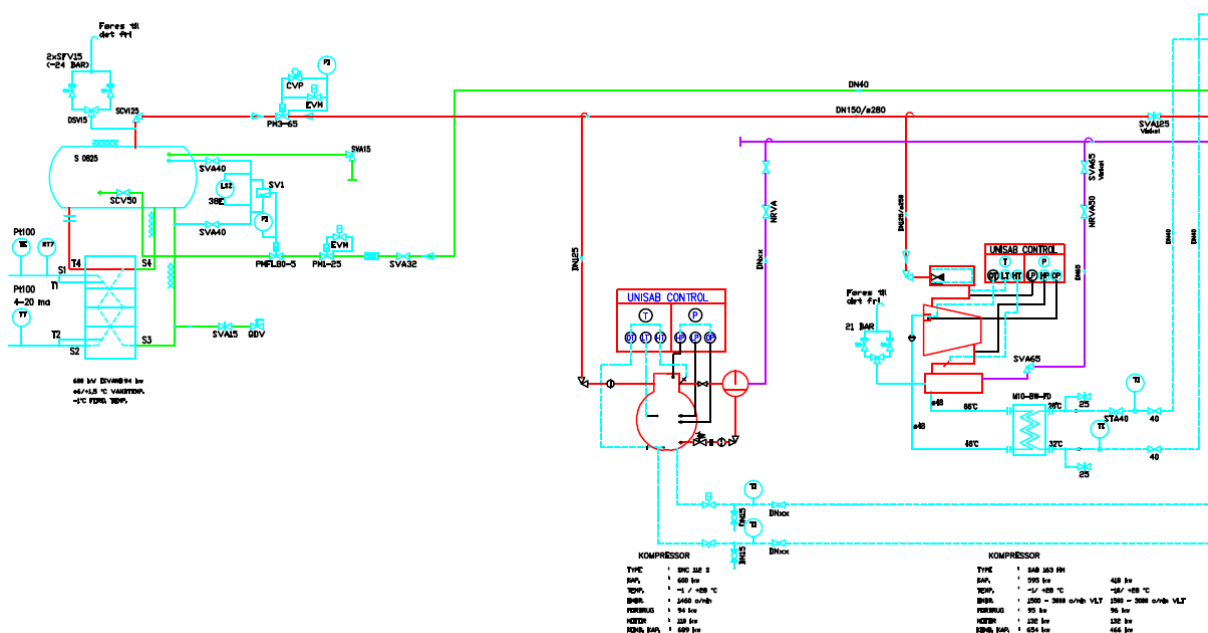
Der er foretaget målinger på isvandstemperaturen 5 forskellige steder i isvandstanken. Der er 2 indløb i isvandstanken hvoraf den første står for hovedparten af returvandet fra produktionen. Vandet løber gennem tanken, da fremløbspumperne er placeret i modsat ende af returstudene og derved fås der en god cirkulation omkring isvandsspiralerne. Der er omløb på rørtrækket, så hvis der slet ikke er noget kølebehov så vil returtemperaturen tilnærme sig fremløbstemperaturen, da der så kun vil være et transmissionstab i rørtræk og pumper.





Det kan ses at Temp. 1 kun kommer ned på ca. 3 °C på en døgn cyklus, dvs. at der skal være kulde på den første spiral konstant for at der ikke skal ske en total afsmeltning af isen. Dette til trods for at målingen er foretaget i november, hvor der ikke har været det store kølebehov fra påvirkninger af udetemperaturen.

Det kan endvidere ses, at der er et konstant forbrug af isvand enten til køling af lagertanke eller til køling af produkterne i produktionen.



Isvand retur fra produktionen løber gennem en pladevarmeveksler inden det løber tilbage til isvandstanken. Denne pladevarmeveksler har et sugetryk på ca. $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$ for at køle isvand ned til ca. $+3\text{ }^{\circ}\text{C}$. *Kommentar fra Jesper Wulff Petersen, SE Big Blue - som det ses på temperaturmålingerne i isvandstanken, så kommer temperaturen først ned på ca. $+3\text{ }^{\circ}\text{C}$ efter gennemløb i den første spiral. Dette betyder at returvandet fra pladevarmeveksleren har en noget højere temperatur.*

Det var påtænkt at pladevarmeveksleren skulle have sin egen kølekompressor. Men da flow og returtemperaturen varierer så meget på isvand at kompressorreguleringen ikke kan følge med, har man været nødsaget til at køle pladevarmeveksleren på den centrale pumpeseparator som køre med et sugetryk på $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$.

For at pladevarmeveksleren kan køre på pumpeseparatoren med et fordampningstryk på $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$, er der indbygget en fordampningsstrykbegrænser, der skaber et kunstigt tryktab før pladevarmeveksleren. Dette gøres for at sugetrykket i pladevarmeveksleren ikke bliver lavere end $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, for falder temperaturen kan der ske en frysning/frostsprængning af pladevarmeveksleren.

IPU har lavet en computer simulering på isvandstankens kuldeakkumulering ud fra data på køleanlægget og de målte temperaturer på isvandet fra november måned. Denne simulering viste at man i teorien kunne spare op til 10 % på energiforbruget, ved at hæve sugetrykket på køleanlægget så man udnytter at isen afsmeltede helt mindst en gang i døgnet, dvs. at al akkumuleringen udnyttes.

Dette er desværre ikke tilrådeligt da der derved kommer tæring på isvandsspiralen, der er lavet af jernrør, med risiko for ammoniak udslip.

4. Muligheder og problemer

Arla Foods Christiansfeld Mejericenter har planer om at ændre og udvide den måde hvorpå de fremstiller isvand. Dette betyder at den fremtidige isvandsproduktion ikke vil benytte isvandsspiraler til at fremstille isvand med, men der skal laves plade-is i en tank på et separat køleanlæg. Christiansfeld Mejericenter har siden 2009 haft planer om ændringen af isvandssystemet, men har endnu ikke fået bevilliget penge til det. *Kommentar fra Jesper Wulff Petersen, SE Big Blue - Christiansfeld Mejericenter har fået ombygget og udvidet køle- og isvandsanlægget i 2012-13. Isvandsproduktionen foregår på ispåfrysningsskiver af rustfrit stål efter et andet princip end de gammeldags ispåfrysningsspiraler.*

Dynamisk sugetryksregulering vil med fordel kunne benyttes til køleanlæg, der kun benyttes til kølerum i forbindelse med kølelagre og terminaler. Dynamisk sugetryksregulering er ikke egnet til andre kuldebehov og kølesteder, hvor der skal tages hensyn til proces- og produktionsudstyr, hvor der er begrænset muligheder for at ændre sugetrykket.

Skulle Christiansfeld Mejericenter kunne være anvendt som referanceanlæg, ville køleanlægget skulle sektioneres med ekstra pumpeseparator, så en del af kølean-

lægget ville kunne producere isvand uafhængigt af den anden del der leverer rumkøling til de forskellige lagre.

Ved Arla Foods Vejle Eksport Terminal har man fået dimensioneret køleanlægget med tilstrækkelig store fordamperflader til at man kan hæve sugetrykket (manuelt fra CTS) i de perioder på året, hvor udetemperaturen tillader et højere sugetryk. Desværre har det vist sig at man ikke kan få den effekt (besparelse) som var tiltænkt, fordi det højere sugetryk gør at der ikke bliver bundet så meget eller intet fugt på fordamperen. Det gjorde at bygningsdele blev fugtige, med den risiko det giver men også at emballagen på varerne blev blød og gik itu. Derfor var man nødsaget til at stille sugetrykket tilpas lavt så man fik den affugtende effekt. Dette har resulteret i at man ikke benytter denne funktion på køleanlægget.

5. Diverse

Vedhæftet til sidst i denne rapport er rapporten fra IPU omkring modellering af køleanlæg.



Modellering af køleanlæg

Axel Wright Larsen

Morten Juel Skovrup

Version 1.50. 2009-09-24

PSO projekt nummer 337-064.



Indholdsfortegnelse

Indledning	3
Anlæg	4
Model.....	5
Belastninger	5
Isvandstank	5
Kølerum	5
Stempelkompressor	5
Skruekompressorer	6
Separatorer	6
Kondensator side.....	6
Regulering	6
Resultater	8
Konklusion og anbefalinger	10
Referencer	11
Appendiks A. Kodestumper	12
Isvandstank	12
Kølerum	14
Separatorer	15
Sætpunktregulator.....	16



Indledning

Nærværende rapport dokumenterer modelleringen af køleanlægget ved Christiansfeld Mejericenter. Hensigten med modellen er at kunne undersøge reguleringsstrategier, hvor kompressorernes kapacitet ikke styres efter et konstant sugetryk; men mere efter hvilket kølebehov der eksisterer på de enkelte kølesteder.

Ideen er at se på de enkelte kølesteder, og ud fra afvigelsen mellem den ønskede og den reelle lufttemperatur, vurdere om der er behov for et lavere sugetryk eller om sugetrykket omvendt kan hæves. I praksis involverer det at se på hvor temperaturen ligger i det termostat-bånd der er defineret for det enkelte kølested.

Danfoss har tidligere udviklet en tilsvarende regulering (P0-optimering) til brug i supermarkedskøleanlæg – ideen er at udvikle en algoritme der kan benyttes på industrielle distribuerede systemer.

Model og forslag til regulering er udviklet som en del af PSO-projektet: Dynamisk sugetryksregulering i industrielle køleanlæg. Projekt nummer 337-064.



Anlæg

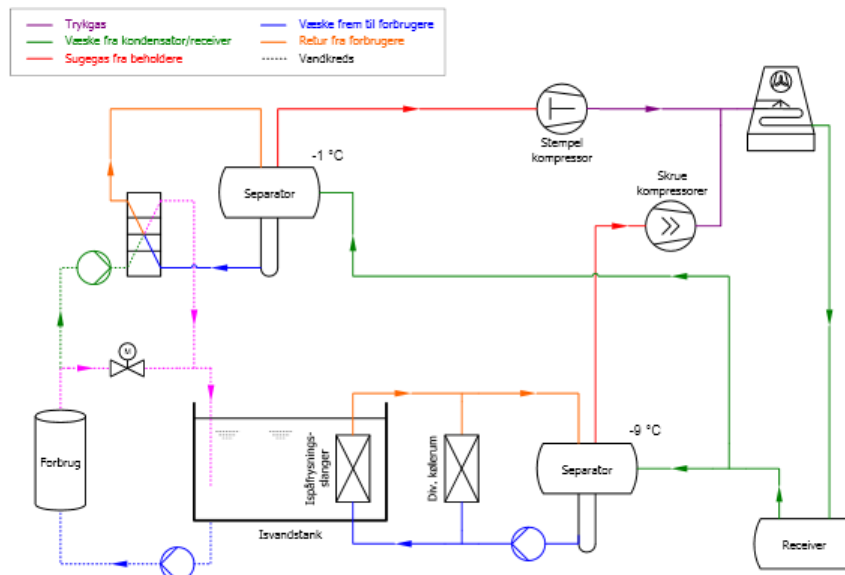
Det betragtede anlæg er beskrevet i detaljer i [1].

Anlægget består i hovedtræk af 2 temperatursystemer:

Et system med pumpecirkulation af R717 med et konstant sætpunkt på $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dette system betjener et antal kølerum samt en isvandstank med ispåfrysningsslanger.

Et system med naturlig cirkulation af R717 som hjælper isvandsanlægget, hvis kapaciteten af isvandet genereret med anlæg 1. ikke er tilstrækkelig. Dette anlæg kører med en fordampringstemperatur på $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$

Af praktiske årsager, er diagrammet for det virkelige anlæg (kan ses i [1]) reduceret til følgende diagram, som benyttes under modelleringen:



Forbrug – eller belastninger – på køleanlægget er reduceret til:

”Forbrug” som er dækket af isvandsanlægget (mælkekøl) samt af $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ kredsen hvis nødvendigt.

Isvandsanlæg og diverse kølerum, som er dækket af $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$ kredsen.

Eneste tilnærmelse i forhold til det virkelige anlæg, er at stempel kompressoren alene kører $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ kredsen. I det virkelige anlæg har skruekompressorerne mulighed for at hjælpe til. Denne forsimpning anses for at være ubetydelig i forhold til formålet med modellen.



Model

Modellen af anlægget er bygget op i WinDali [2]. Nedenstående beskrives modellen af de enkelte delelementer.

Belastninger

Belastningen fra mælkekølingen er modelleret som to sinuskurver der toppe kl 9:00 og 17:00. Denne del af belastningen er i modellen en del af modellen for isvandstanken.

Isvandstank

Isvandstanken modelleres med ét dynamisk element: tykkelsen af islaget på ispåfrysningsslangerne.

Input til modellen er et tidspunkt, fordampningstemperatur for skrue og stempelkompressor, samt om stempelkompressoren kører (se senere). Output fra modellen er istykkelsen samt den nødvendige massestrøm af kølemiddel fra -1 °C separatoren (stempelkompressor) og -9 °C (separatoren) skruekompressorerne. Koden for modellen kan ses i Appendiks A.

Kølerum

Hvert kølerum er modelleret med en termisk kapacitet, dvs. at modellen er noget i retning af:

$$M \cdot c_p \cdot \frac{dT}{dt} = \dot{Q}_{\text{belastning}} - \dot{Q}_e$$

Hvor T er temperaturen af rummet. Belastningen på rummet er en sum af varmetransmission og aktivitet i rummet. Output for modellen er nødvendig kølemiddelstrøm (kuledeydelsen \dot{Q}_e beregnes ud fra en givet UA værdi for fordamperen).

Temperaturen i rummet er termostatstyret. Modellen kan ses i Appendiks A.

Stempelkompressor

Stempelkompressoren i anlægget er en Sabroe SMC 112S kompressor. Modellen er baseret på polynomietilnærmelser for kompressorens effektoptag og kuldeydelse for forskellige kapaciteter (kompressoren kan kapacitetsreguleres fra 700 til 1500 o/min ved hjælp af en frekvensomformer). Polynomierne er baseret på data fra Sabroe.

Kompressoren reguleres på følgende måde:

- Hvis tykkelsen af isen på ispåfrysningsslangerne er mindre end en minimum værdi starter kompressoren.
- Hvis tykkelsen af isen på ispåfrysningsslangerne er større end en maksimum værdi og kompressoren har kørt i et vist tidsrum stopper kompressoren.
- Hvis kompressoren kører, reguleres kapaciteten af kompressoren således at temperaturen i separatoren holdes på -1 °C. Kapaciteten reguleres med en standard PI-regulator.



Skruekompressorer

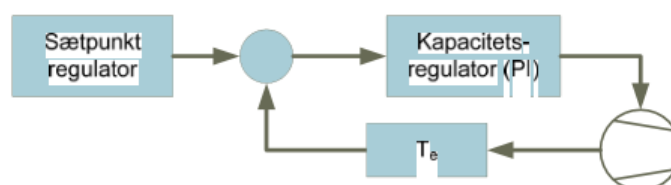
De i alt 3 skruekompressorer er af typen Sabroe SAB 163 H i to forskellige udformninger (to af kompressorerne er med frekvensomformer).

Som for stempelkompressoren er modellen er baseret på polynomietilnærmelser for kompressorernes effektoptag og kuldeydelse for forskellige kapaciteter. Polynomierne er baseret på data fra Sabroe.

Undersøgelsen af kapacitetsreguleringen af skruekompressorerne er hovedformålet med modellen. Reguleringen af sætpunktet for kapacitetsreguleringen kan i modellen sættes til:

- Konstant temperatur på $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$ i separator (eksisterende regulering).
- Varierende temperatur efter behov (denne regulering beskrives i næste kapitel)

I begge tilfælde reguleres kapaciteten af en PI-regulator:



Separatorer

Hver af de to separatorer er dynamiske elementer i modellen. Det vil sige at massen af kølemiddel – og dermed trykket – i separatoren er dynamisk i modellen:

$$\frac{dM_{separator}}{d\tau} = \sum \dot{m}_{in} - \dot{m}_{kompressor}$$

Modellen er vist i Appendiks A.

Kondensator side

Kondensatorsiden modelleres meget simpelt i modellen, hvor det antages at kondenseringstemperaturen styres efter omgivelserne plus en fast temperaturforskell (som anbefalet i [3]).

Regulering

Modellen indeholder følgende regulatorer:

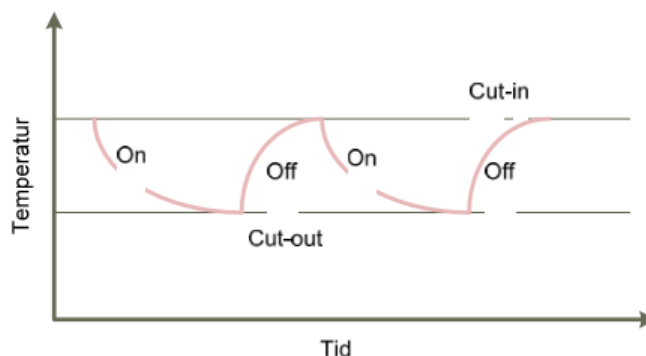
1. Termostatregulering af temperaturen i kølerum
2. PI-regulatorer til regulering af kompressorkapacitet
3. Regulator til regulering af sætpunktet for sugetrykket til skruekompressorerne

Den sidste regulering er den som modellen har til formål at undersøge.



Sætpunkt regulatoren er enten blot en regulator med konstant output (eksisterende regulering) eller også er det en regulering som forsøger at udtrykke, hvor belastet de enkelte kølesteder er. Hvis de er lidt belastede hæves sugetrykket, hvis de er meget belastede sænkes sugetrykket.

Konkret går reguleringen ind og ser på de enkelte kølerum, og hvor temperaturen ligger i forhold til termostatreguleringens cut-in og cut-out værdier:

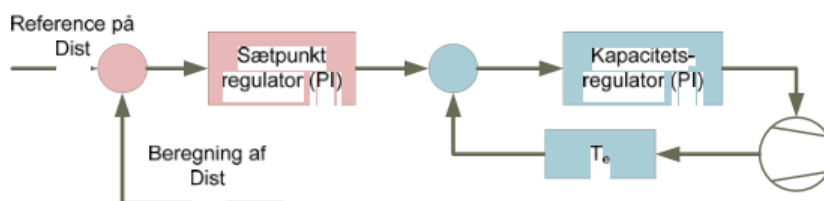


Reguleringen, der er implementeret, gør følgende:

1. Beregner middelværdien af lufttemperaturen over en periode. Beregningen medtager kun temperaturer, hvor køling har været On.
2. Middellufttemperaturen benyttes til at udtrykke en "afstand" fra Cut-in værdien i procent:

$$Dist = \frac{T_{cut-in} - T_{mean}}{T_{cut-in} - T_{cut-out}}$$

- 3.
4. Afstanden Dist beregnes for alle kølerum (som i parentes bemærket kan have forskellige værdier for T_{cut-in} og $T_{cut-out}$)
5. Den minimale værdi af Dist registreres og benyttes som tilbagekobling til en PI regulator som illustreret nedenfor:





Resultater

Nedenstående er vist resultater for et døgn simulering med konstant og variabelt sætpunkt på skruekompressorernes sugetryk.

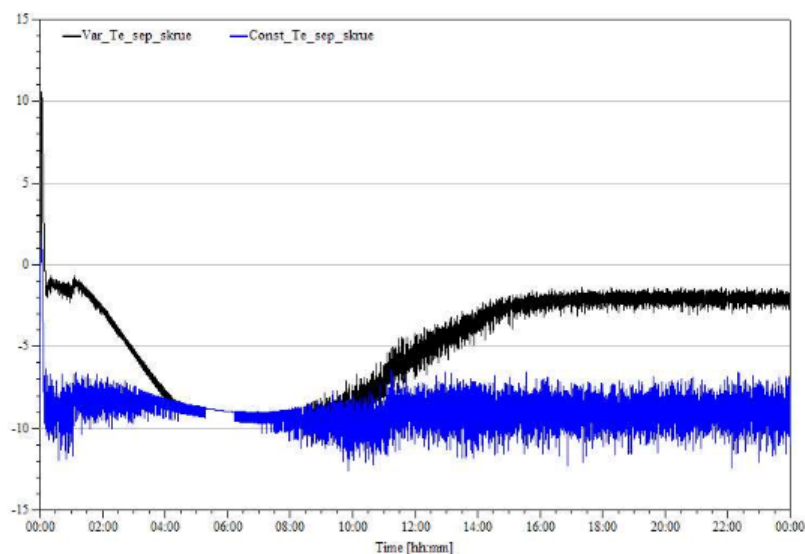
Simuleringen er kørt med 10 kølerum.

Overordnet kan følgende noteres:

	Konstant sætpunkt	Variabelt sætpunkt
Energiforbrug [kWh]	4798	4431

Altså en besparelse på omtrent 8% ved at køre med variabelt sætpunkt på kapacitetsregulatoren til skruekompressorerne.

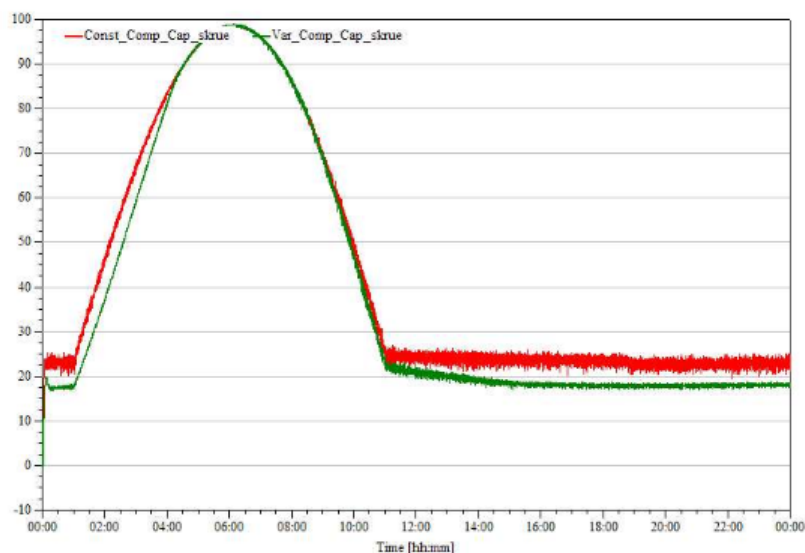
Resultatet kan også illustreres ved at se på sugetrykket i separatoren for skruekompressorerne:



Af plottet ses at regulatorerne (sætpunkt + kapacitet) holder sugetrykket på en værdi væsentligt over de -9°C i store perioder når sætpunktet for sugetrykket er variabelt (den sorte kurve). Sætpunktregulatoren har en nedre begrænsning sat til -9°C .

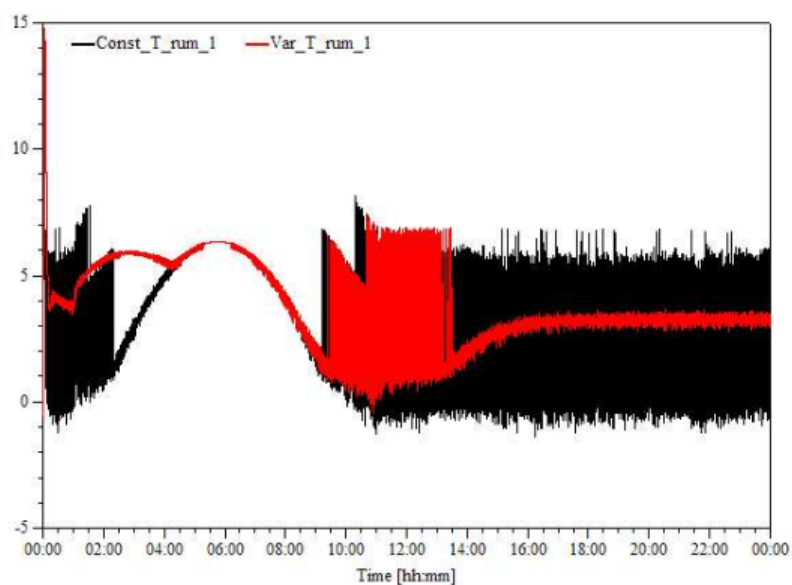
Grunden til at sugetrykket dykker under -9°C er dynamikken (trægheden) i systemet.

For den tilsvarende periode viser næste plot kapaciteten af skruekompressorerne (100% svarer til at alle tre skruer kører fuld kapacitet):



Det ses at den variable sætpunktstyring betyder at kapaciteten på skruekompressorerne i perioder kan sænkes (variabelt sætpunkt svarer til den grønne kurve) – og dermed kan der spares energi. Samtidig ses det at lavlast situationen for det simulerede døgn svarer til en relativt lille belastning (kompressorerne kører med kun ca. 20% af den maksimale kapacitet).

Den følgende figur viser temperaturen i de et af kølerummene ved henholdsvis konstant og variabelt sætpunkt:



Det ses tydeligt at den variable sætpunktregulering har medført at termostatreguleringen i rummet i perioder er sat ud af kraft (sugetrykket er hævet så meget at lufttemperaturen i rummet ikke kommer under cut-out).

Konklusion og anbefalinger

Modellen er indtil videre ikke valideret mod målinger på anlægget i Christiansfeld. På trods af dette vurderes det, at der ligger et besparelsepotentiale i størrelsesordenen 10% på anlægget i Christiansfeld ved at styre sætpunktet for kapaciteten af skruekompressorerne efter belastningen på kølerummene.

Næste skridt i udviklingen af en reguleringsalgoritme bør være at teste algoritmen på et virkeligt anlæg, og registrere om energiforbruget falder i den samme størrelsesorden som forudsagt.



Referencer

- [1] Petersen, Jesper W. – "Beskrivelse af køleanlægget ved Christiansfeld Mejercenter".
Notat, Enervision A/S, 18-06-2007.
- [2] Skovrup, Morten Juel – *WinDali. A Modeling and Simulation System for Microsoft Windows, Version 2.10*. Version 1.39 del af Ph.D. rapport.
- [3] Skovrup, Morten Juel; Jakobsen, Arne – *Forslag til energioptimal styring af kondenseringstryk, Carlsberg Case*. Projekt rapport ESO. 28-02-2001.



Appendiks A. Kodelistumper

Dele af appendiks indeholder de vigtigste kodelistumper for de enkelte komponentmodeller.

Isvandstank

```

procedure TIceWaterTank.ModelEquations(Klokken,T_jord,T_e_screw,T_e_recip: TFloat; RecipOn : TBoolean; var YDot:
array of TFloat);
var
    M_dot_is : TFloat; // andring i ismasse pr. sekund [kg/s]
    x_0 : TFloat; // øjeblikkelige radius af isrør inkl. islag [m]
    R_isroer : TFloat; // isrørets varmeresistivitet: UA = Pi*L/m
    dx_isdt : TFloat; // beregnet ændring i istykkelsen [m]
    m_w_load,m_w_HX : TFloat;
begin
    // Beregning af belastning fra Mælkekøling - 2 (positive) sinuskurver:
    // amplitude=FQ_load_max, periode=2 (hrs), topper = kl. t_forb1 og kl. t_forb2
    if (Klokken >= (t_forb1-1)) and (Klokken <= (t_forb1+1)) then // 1. mælkekøl
        FQ_load := FQ_load_max * sin((Klokken-(t_forb1-1))*PI/2)
    else if (Klokken >= (t_forb2-1)) and (Klokken <= (t_forb2+1)) then // 2. mælkekøl
        FQ_load := FQ_load_max * sin((Klokken-(t_forb2-1))*PI/2)
    else
        FQ_load := 0;
    FT_w := 0;
    m_w_load := FV_w_load/3600*Rho_w;
    FT_HX_in := FQ_load/(m_w_load*Cpw)+FT_w;
    if RecipOn then
        begin
            m_w_HX := FV_w_HX/3600*Rho_w;
            FT_HX_out := (FT_HX_in-T_e_recip)/exp((FUA_HX/(m_w_HX*Cpw))+T_e_recip);
            FQ_HX_recip := m_w_HX*Cpw*(FT_HX_in-FT_HX_out);
            Fm_recip := FQ_HX_recip/FRefrig.RT(T_e_recip);
        end
    else
        begin
            FT_HX_out := FT_HX_in;
    
```



```
FQ_HX_recip := 0;
m_w_HX      := 0;
Fm_recip    := 0;
end;
FQ_w_load := FQ_load-FQ_HX_recip;
// Beregn UA-værdi af isrørene m. islag på
R_isroer := 1/(Falpha_1+Fd_isroer_i) + ln(Fd_isroer_y/Fd_isroer_i)/Flamb_roer +
ln((Fd_isroer_y + 2*Fx_is)/Fd_isroer_y)/Flamb_is + 1/(Falpha_y*(Fd_isroer_y + 2*Fx_is));
FUA_is := PI*FL_isroer/R_isroer; // UA-værdi af ét isrør
if RecipOn then
  FQ_tubes := Fm_isroer*FUA_is*(FT_isvand-T_e_screw)
else
  FQ_tubes := 0;
// ISVANDS-beregninger
FQ_is_tr := Fk_isvand_jord * FA_isvand_jord * (T_jord - FT_isvand); // kuldetab ved trans. [kW]
M_dot_is := (FQ_tubes - FQ_w_load - FQ_is_tr)/dh_is; // masse'flux' af is [kg/s]
r_0 := Fd_isroer_y/2 + Fx_is; // isradius [m]
Fm_screw := FQ_tubes/FRefrig.RT(T_e_screw);
dx_isdt := sqrt(Power(r_0,2) + M_dot_is*vs_is/(Fm_isroer*FL_isroer*PI)) - r_0; //dx_is/dt ligning
if (dx_isdt < 0) then
  YDot[IdxFx_is-1] := Max(dx_isdt,-Fx_is) // Fx_is må IKKE komme under 0 [m].
else
  YDot[IdxFx_is-1] := dx_isdt;
end; // END procedure TiceWaterTank.ModelEquations
```



```
Kølerum  
function TColdRoom.Controller: TBoolean;  
var  
  OldOn : TBoolean;  
begin  
  OldOn := FOn;  
  if FOn then  
    begin  
      if FT < FTMin then  
        FOn := False  
      end  
    else  
      begin  
        if FT > FTMax then  
          FOn := True  
        end;  
        Result := (OldOn <> FOn);  
        if FOn then  
          FOnVal := 1  
        else  
          FOnVal := 0;  
        end;  
      end;  
end;  
  
procedure TColdRoom.ModelEquations(Hour,TAmb,TGround,Te: TFloat; var Ydot: array of TFloat);  
var  
  Q_kr_A,Q_kr_TR,RT : TFloat;  
begin  
  // beregn kuldekalid fra AKTIVITET inde i kølerummet  
  if (Hour >= 8) and (Hour <= 18) then  
    Q_kr_A := FQMax * sin((Hour-8)*PI/10)  
  else  
    Q_kr_A := 0;  
  // Beregn kuldekalid fra VARMELEDNING ind i kølerummet  
  Q_kr_TR := DefKAir*FAAir*(TAmb-FT) + DefKGround*FAGround*(TGround-FT);  
  
  if FOn then  
    FQ_e := FUA_e*(FT-Te)  
  else
```



```
FQ_e := 0;
RT_ := FRefrig.RT(Te);
FmGas := FQ_e/RT;
// beregn TOTALT kuldekalid fra kølerummet
FQ_kr_tot := Q_kr_TR + Q_kr_A + FQInternal;
YDot[IIdxFT-1] := (FQ_KR_tot - FQ_e)/(FMAir*CP_luft);
end;
```

Separatorer

```
procedure TSeparator.CalcState;
begin
  {UD fra massen beregnes temperaturen (trykket) i separatoren}
  Fv_g := Fv_separator/FM_separator;
  FT_e := FRefrig.TDewY(Fv_g);
end;
```

```
procedure TSeparator.ModelEquations(m_in : array of TFloat; m_comp : TFloat;
var YDot : array of TFloat);
begin
  YDot[IIdxMSep-1] := Sum(m_in)-m_comp;
end;
```



Sætpunktregulator

```
procedure TSetpointController.Control(Rooms: TColdRooms);
var
  i : Integer;
begin
  if FCstSP then
    FOutput := FPID.MinOutput
  else
    begin
      FPV := 100;
      for i:=1 to NColdRooms do
        begin
          if Rooms[i].Dist < FPV then
            begin
              FPV := Rooms[i].Dist;
              FMLCP := i;
            end;
          end;
        FPID.Control(FPV,FOutput);
      end;
    end;
end;
```

Beregning af Dist for et kølerum:

```
procedure TColdRoom.OnSolution;
begin
  FNPoints := FNPoints+1;
  {FSamplesArray husker temperaturer NSamples tilbage, NSamples er parameter
  FNPoints benyttes til at flytte gennem FSamplesArray}
  if FNPoints > FNSamples then
    begin
      {Har nået enden og starter forfra}
      FNPoints := 1;
      if FO then {Hvis rum er on - dvs. køling - så gem temperatur}
        FSamplesArray[FNPoints-1] := FT
```



```
else {ellers gem forrige temperatur}
  FSamplesArray[FNPoints-1] := FSamplesArray[FSamples-1];
  FTMean := Mean(FSamplesArray);
  FInStart := False;
end
else
  begin
  if FInStart then
    begin
    (FSamplesArray er ikke fyldt op endnu)
    FTMean := (FNPoints-1)/FNPoints*FTMean+FT/FNPoints;
    FSamplesArray[FNPoints-1] := FTMean;
    end
  else
    begin
    if FOn then
      FSamplesArray[FNPoints-1] := FT
    else
      FSamplesArray[FNPoints-1] := FSamplesArray[FNPoints-2];
      FTMean := Mean(FSamplesArray);
    end;
  end;
  end;
  FDist := (FTMax-FTMean)/(FTMax-FTMin)*100;
end;
```