



ESO Resultater - kort og godt -

Arne Jakobsen, m. fl.
aj@mek.dtu.dk

November 2002

Indholdsfortegnelse

1 Forord	2
2 Projekttema	3
3 ESO spørgsmål	4
4 ESO strategier - overordnet set	5
4.1 Regulering	5
4.2 Overvågning	6
4.3 Energioptimering i praksis	8
4.3.1 Eksempel på arbejdsplan for en energiopsummeringsopgave.	9
4.3.2 Generelt om energiopsummering i praksis	11
5 ESO strategier	12

1 Forord

Denne rapport er en del af EFP projektet med titlen ”Energioptimal styring og overvågning af køleanlæg” - i daglig tale omtalt som "ESO". Projektet med EFP journalnummer 1273/00-0023 startede primo 2000 og var oprindeligt planlagt til at slutte ultimo 2002. For at kunne få målinger efter nogle planlagte energiopsummerende tiltag på et industrielt anlæg er projektets endelige aflevering udskudt til forår 2003. Derfor er der mulighed for at denne rapport - ligesom resten af projektdokumentationen - opdateres i løbet af foråret 2003. Opdateringer vil fremgå af hjemmesiden www.et.dtu.dk/ESO.

Aktiviteterne i ESO projektet er struktureret i en række "cases". Denne rapport er et resultat af case 18: "Projektdokumentation".

Hensigten med denne rapport er at give et teknisk indblik i og overblik over emner og metoder udviklet så vidt i projektet. Rapporten kan opfattes som en kortfattet faglig opsummering over de tre hovedemner;

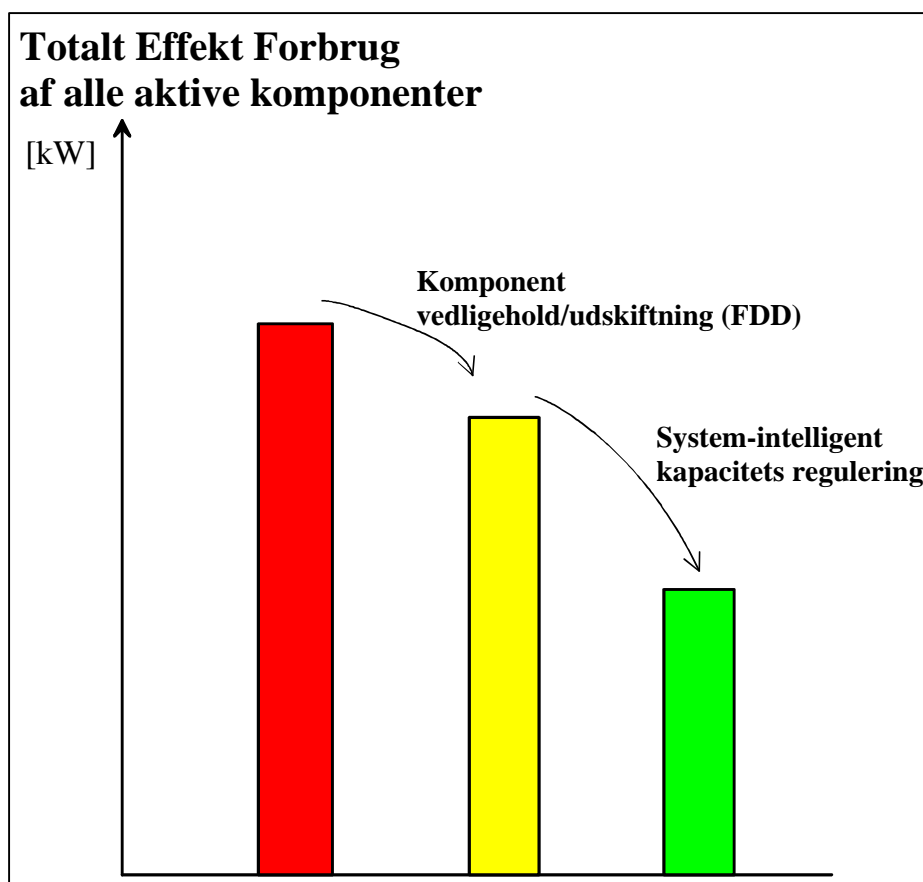
- Energioptimal regulering
- Overvågning
- Energiopsummering i praksis

Kommentarer er i almindelighed meget velkomne, og i særdeleshed fordi disse kan benyttes i projektets endelige færdiggørelse.

Sluttelig rettes en tak til Energistyrelsen for at have støttet dette arbejde under EFP2000. Rapporten er, som de øvrige resultater i ESO projektet blevet til som et resultat af team arbejde, hvorfor de øvrige projektdeltagere skal kvitteres for input og feedback (se bagside).

2 Projekttema

Projektets tema har været at regulere og overvåge køleanlæg på en måde, hvor al tilgængelig "on-line" viden benyttes til at minimere energiforbruget af anlægget samt intelligent håndtering af fejltilstande og behov for service. I disse bestræbelser har det været nødvendigt at anskue køleanlæg på en ny måde. Hidtil har de enkelte komponenter primært været reguleret og overvåget individuel, hvilket ikke kan sikre at systemet som helhed bruger mindst mulig energi. Endvidere er det ikke udnyttet at informationer fra en komponents drift i flere tilfælde kan benyttes i en vurdering af driften af andre komponenter. Fokus har således ændret sig fra at være komponentorienteret til at være systemorienteret. Derudover anvendes modeller baseret på fysiske love og tekniske karakteristika både i regulering og fejldetektering.



Figur 1: Elementer ved minimering af driftsenergiforbruget af en givent anlæg.

I figuren ovenfor er ESO's hovedtema illustreret nemlig minimering af driftsomkostningerne for et givent anlæg. Det ene af hovedelementerne er sikring af at komponenterne individuelt set fungerer som de bør (dvs. ingen fejl eller degradering af kapacitet og effektivitet). Det andet hovedelement er såkaldt "system-intelligent kapacitetsregulering". Dvs. at kapaciteten af de indgående pumper, blæsere og kompressorer er sådan, at deres samlede effektforbrug minimeres samtidig med at de ønskede temperaturer på kølestederne opnås, og det tilladelige driftsområde i øvrigt overholdes.

Det fremgår således at design og dimensionering af anlæg ikke er noget hovedtema i ESO.

3 ESO spørgsmål

Det at formulere relevante, specifikke og operationelle spørgsmål/problemstillinger er i sig selv en del af projektresultatet. I projektforsøget er følgende spørgsmål udkrystalliseret:

Energooptimale sekundære¹ sætpunkter:

- Hvad skal sætpunkterne være til
 - Sugetrykket?
 - Kondenseringstrykket?
 - Temperaturerne af brine og vand (indirekte systemer)?
 - Overhedning?

Energooptimal problemstillinger ved parallelkobling:

- Hvilken kompressorkombination giver mindst effektforbrug (givne randbetingelser)?
- Hvilken kondensatorkombination giver mindst effektforbrug til hjælpeudstyr på højtrykssiden (givne randbetingelser)?
- Hvilket kølested bestemmer det maksimale sugetryk?
- Hvilken ekspansionsventil bestemmer det minimale kondenseringstryk?

Reguleringsdynamik:

- Hvilke procesvariable skal reguleres af hvilke aktive komponenter, sådan at der opnås mindst krydskobling mellem sløjferne samtidig med at systemets styrbarhed maksimeres?
- Hvordan tunes enkeltsløjferne og hvordan tages der højde for den uundgåelige proceskrydskobling, sådan at køleanlæggets dynamik bliver hurtig og stabil?

Tilrimning:

- Hvordan påvirkes tilrimningen af fordamper-kapacitetsreguleringsmetoden?

Afrimning:

- Hvornår skal der afrimes, sådan at det samlede energiforbrug minimeres?

Overvågning:

- Hvilke nøgletal er beskrivende og præcise ved evaluering af anlæggets drift?
- Hvordan kan redundant information opnås, og hvordan kan afvigelse benyttes til at foretage de rigtige indgreb på de rigtige tidspunkter (afvigelse mellem modelberegning og målinger)?

Praktisk energioptimering:

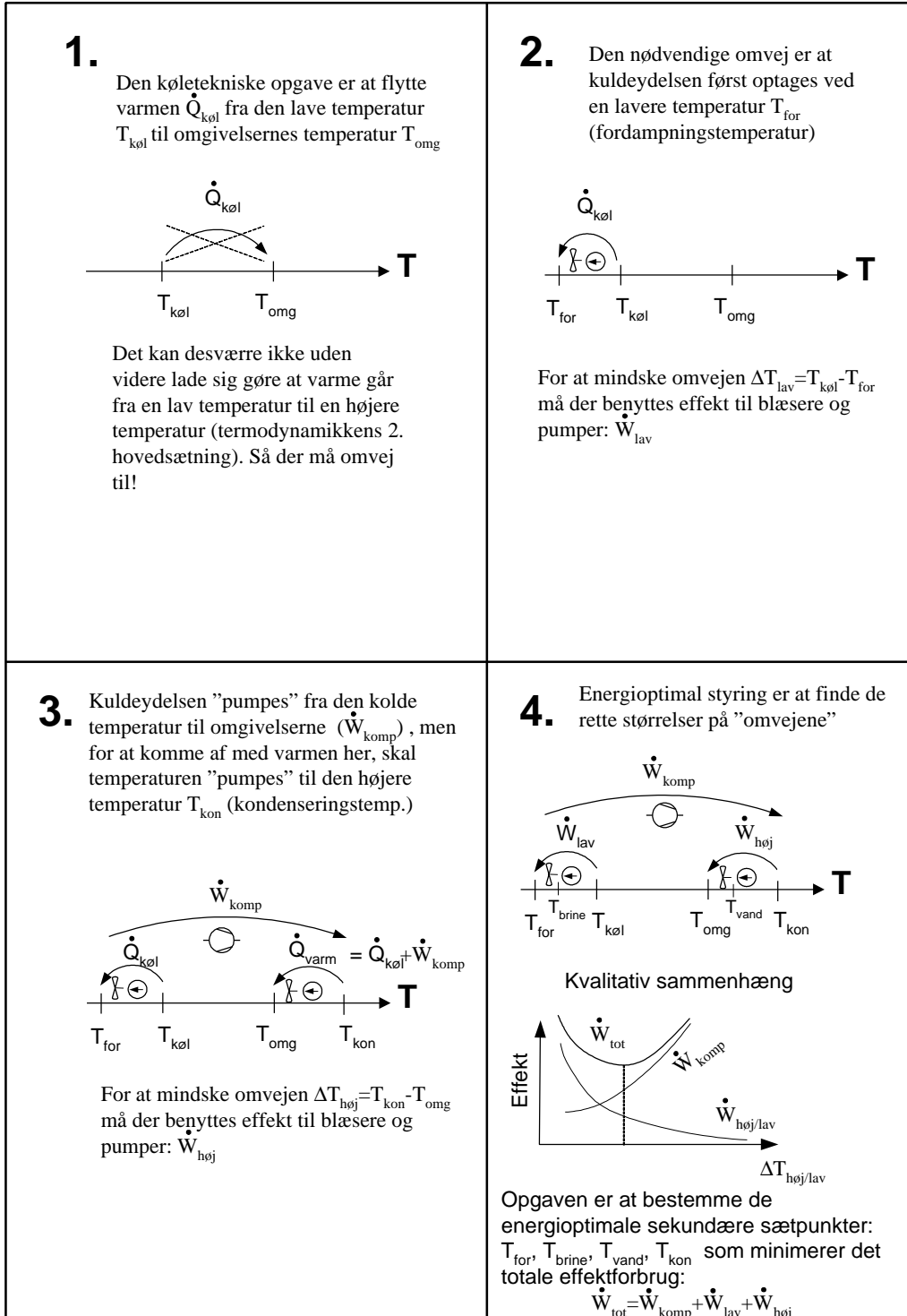
- Hvordan skal energianalyse og energioptimering på et eksisterende anlæg gribes an i praksis?

¹ Kølestedernes temperaturer er de primære procesvariable, alle andre procesvariable er i princippet frie/sekundære og skal vælges under hensyntagen til anlæggets tilladelige driftsområde (sikkerhed, holdbarhed) samt anlæggets samlede energiforbrug.

4 ESO strategier - overordnet set

4.1 Regulering

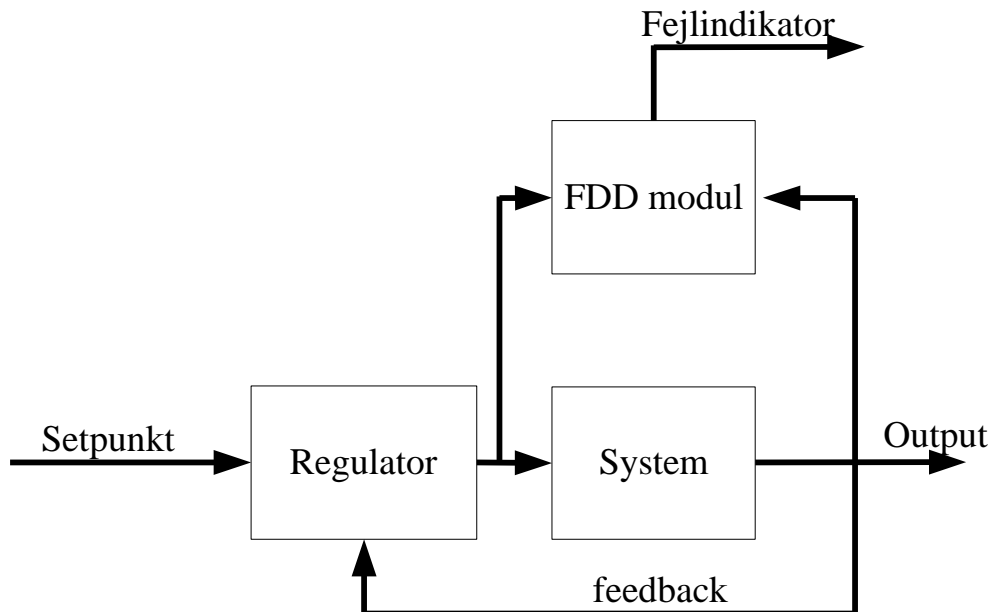
Nedenfor er ESO tankegangen ved energioptimal styring af traditionelle køleanlæg illustreret.



Figur 2: Energi optimal styring af køleanlæg kan ses som et optimalt valg af sekundære sætpunkter.

4.2 Overvågning

Fejldetektering og diagnose tager udgangspunkt i det pågældende system, men fremgangsmåden er meget generel. Fælles for de fleste fejldetektmeter er, at de anvender systemets såkaldte analytiske redundans, dvs. man kan nå frem til den samme information på flere uafhængige måder. Hvis der er en passende stor uoverensstemmelse mellem resultaterne giver det anledning til "bekymring" for at der er en fejltilstand.

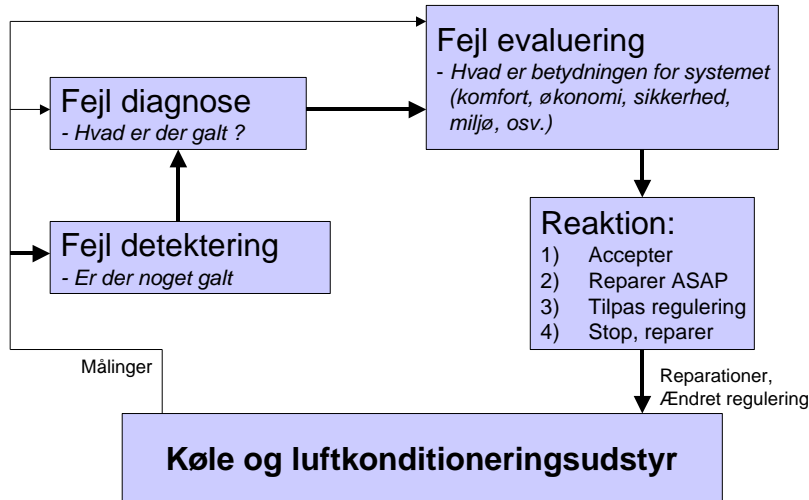


Figur 3: Struktur for et system med FDD.

Figur 3 viser hvordan et FDD modul modtager systemets input og output. Når FDD modulet indeholder den nødvendige analytiske redundans kan det afgive en fejlindikator, når den analytiske redundans ikke stemmer overens med systemets input og output. Et simpelt eksempel på analytisk redundans er at kondenseringstemperaturen både måles vha. en temperaturføler og beregnes på basis af en trykmåling. Uoverensstemmelse kan betyde at der er mangel på kølemiddel, eller der er kommet luft eller vand i systemet.

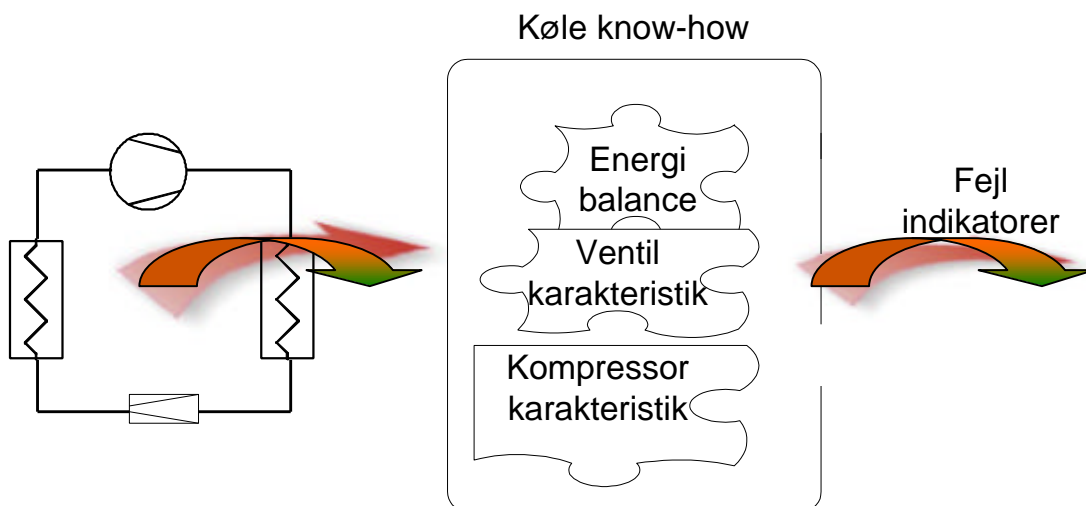
Det generelle ræsonnement ved FDD på et system er illustreret nedenfor i figur 4.

Systemovervågning (FDD)



Figur 4: FDD på systemer

Overvågning af køleanlæg er primært fokuseret på detektering af komponent fejl. Formålet har været at opstille algoritmer der ved hjælp af systemets indre sammenhænge kunne indikere de vigtigste fejltilstande.



Figur 5 : FDD i kølesystemer anvender viden om systemets indre sammenhænge for at detektere fejl.

De behandlede fejltypen har været

- tilrimning
- fordamperblæser stoppet
- tildækning af luftcirkulationskanal
- kondensatortilsmudsning
- tab af kølemiddel
- overstabling

For alle fejltypen er der opstillet detekteringsmetoder. Detektering af tilrimning og fordamperblæserfejl vha. energibalancen er afprøvet på udvalgte supermarkeder med positive resultater. Der er udviklet en metode til detektering af kondensatortilsmudsning baseret på luft/kølemiddel energi balancen i kondensatoren. Metoden er afprøvet på flere supermarkeder med positivt resultat. Arbejdet med overvågning har resulteret i flere patentansøgninger, der dækker metoder til detektere ovenstående fejltypen.

4.3 Energooptimering i praksis

Energooptimering af eksisterende og nye køleinstallationer er altid kædet sammen med økonomiske krav om rentabilitet, tilbagebetalingstid, hvilket i praksis sætter grænsen for, hvad der reelt bliver gennemført. Det er vigtigt at anskue opgaven ud fra en levetidssynsvinkel, hvor både investering- og driftsomkostninger indgår. En overordnet metode til energioptimeringsopgaver generelt og specielt på større industrianlæg, kan tage udgangspunkt i følgende liste af mulige elementer:

Planlægning og organisering

- Definere mål og fastlægge ressourcer.

Undersøgelse/kortlægning

- Energiforbrugende komponenter.
- Energiforbruget - over tiden.
- Styring/regulering af energiforbrug.
- Driften – ønsket/realiseret – problemer.
- Kuldebehov – variationer over døgnet, ugen og året.
- Målinger – logning.
- Driftsjournal.
- Vedligehold – politik/budget.

Analyse/beregning

- Evaluering af om målinger og afledte størrelser er indenfor rimelige områder (temperaturdifferencer over varmevekslere, tryktab, trykgastemperatur, størrelsesorden på effektforbrug, specifikt energiforbrug etc.)
- Hvad kan gøres bedre og hvordan, mht.:
Indregulering/justering/trimning.
Mindre forbedringstiltag – rentabilitet.
Fremtidssikring v. nyinstallation/udvidelse.
- Kapacitetsproblemer, driftssikkerhed, reserve.
- Simuleringsarbejde.

Implementering/test/forsøg/forslag

- Indregulere/trimme.
- Udskifte/ændre på styring, regulering, overvågning.
- Registrere/måle – før/efter-situationen.
- Udarbejde forslag til forbedringer og specifikationer.
- Benytte egne erfaringer fra andre tilfælde og situationer – specielt fra ESO-cases.

4.3.1 Eksempel på arbejdsplan for en energioptimeringsopgave.

Følgende eksempel er hentet fra ESO-casen om energioptimering ved Skare Meat Packers, hvor den overordnede arbejdsplan var:

1. Kortlægning af energiforbruget. Hvilke komponenter bruger hvor meget. Kortlægning/måling af nuværende driftsmønster, årsagerne til evt. ustabilitet, mm.
2. Simulering og forsøg til opstilling af forslag til ændret og energioptimal drift.
3. Analyse og udarbejdelse af forslag til forbedringer og specifikationer.
4. Implementering af ny styrings-, regulerings- og overvågningsstrategi.
5. Gennemførelse af "efter-test" og målinger til eftervisning af udbyttet af ændringer.
6. Dokumentation

Efterfølgende er indholdet i punkterne uddybet:

ad 1 Kortlægning af energiforbruget

Energiforbruget er analyseret ved komplet gennemgang af anlægget maskiner, kølesteder, rum og driftmønster. Anlægget er analyseret ved gennemgang af alle komponenter, skønsmæssig vurdering af deres design og driftforhold og baseret på målinger/erfaringer fra Skare Meat Packers

ad 2 Simulering og forsøg

Der er opbygget et antal simple simuleringsmodeller af anlægget, til parameterstudier af optimale kombinationer af driftparametre (specielt fordampningstemperatur, brinetemperatur, brineflow, kondenseringstemperatur). Den eksisterende anlægsregulering er i modellen erstattet med en "systemoptimal", og der er monteret frekvensomformer på en brinepumpe, kondensatorventilatoren og på varmtbrine pumpen.

ad 3 Analyse og udarbejdelse af forslag

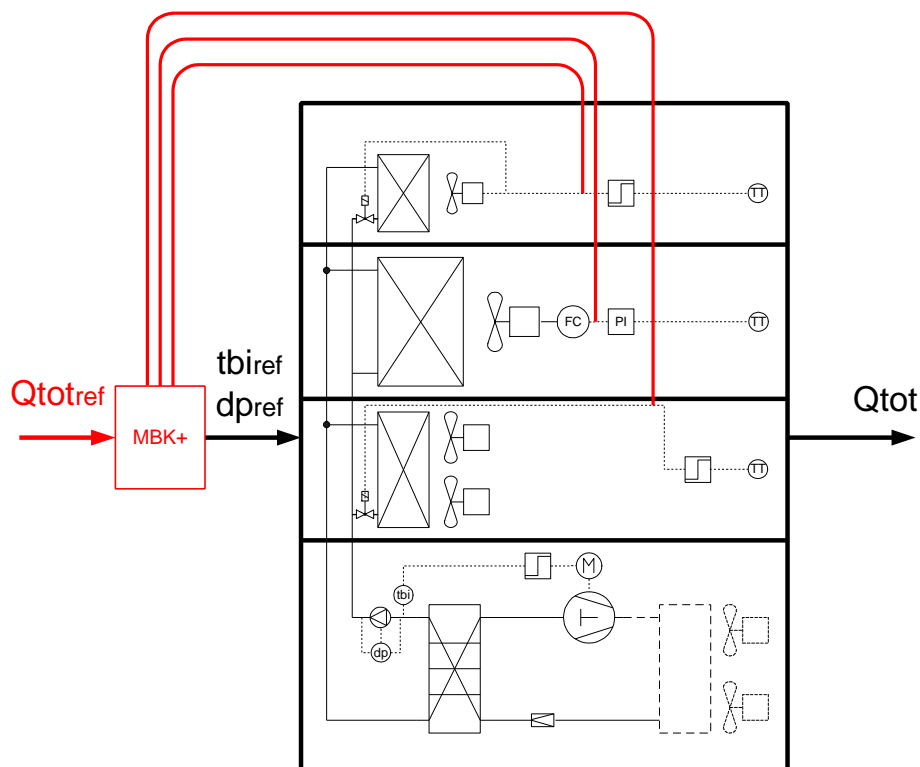
Simuleringsmodellerne er anvendt til at gennemregne forskellige reguleringskoncepter, med hovedvægt på valg af optimal brinetemperatur og *Driftfaktor* (= procentuel ON-tid) for

kølestederne. Simuleringsresultaterne er benyttet til at lave generelle modeller for optimal brinetemperatur og driftfaktor.

Desuden er der implementeret optimal kondensator regulering, efter samme princip som i "Carlsberg Casen".

ad 4 Implementering af ny styrings-, regulerings- og overvågningsstrategi

Brinetemperaturen og kølestederne driftfaktor styres af en "Mest Belastede Kølested"-strategi, hvor driften af ventilatorerne indrages som optimeringsvariabel (= MBK+). Forventet resultat: minimering af samlet energiforbrug henført til den kolde side, dvs. minimalt exergitab fra ventilatorer og kold brinetemperatur. Brinepumpen mellem buffer og kølesteder opererer fortsat med differenstryk-styring



Principskitse for MBK++ hvor den overordnede styring sætter bestemte setpunkter for brinetemperaturen og optimalt tryktab i brinekredsen. Ved Skare er det ikke hensigtsmæssigt at lade tryktabet variere, hvilket reducerer strategien til at hedde MBK+

Ammoniakpladeveksleren styres ved at lade den primære brinepumpe regulere trinløst, så den har samme gennemsnitlige flow som den sekundære. Herved fås optimal udnyttelse af bufferen, og belastning på kompressorerne afspejler det aktuelle kuldebehov. Kompressorerne styres af den ønskede brinetemperatur.

Kompressorenes regulator erstattes med York's UniSab systemer, som sørger for korrekt sammensætning af de installerede kompressortyper til givne ydelsesforhold.

Kondensator trykket reguleres vha. ventilatoren efter en funktion af målt vådtemperatur, hvorved der ifølge "Carlsberg Casen" opnås optimal drift.

ad 5 Gennemførelse af “efter-test” og målinger

Da der i forbindelse med implementering af reguleringen endvidere foretages store anlægsudvidelser, vil både før og efter-målinger blive foretaget på det nye anlæg. Målingen forventes at foregå ved periodevis sammenligning af energiforbrug ved drift med den nye reguleringsstrategi efterfulgt af en periode med en tilnærmelse af den gamle reguleringsstrategi. Det vil i praksis sige, at der ved "gammel" reguleringsstrategi køres med fast fordamper temperatur, og at bufferen bruges som lager, med et max/min niveau for brinetemperaturen. Primær brinepumpe vil her køre on/off.

ad 6 Dokumentation

Projektet dokumenteres slutteligt med en selvstændig projektrapport.

4.3.2 Generelt om energioptimering i praksis

Gennem "Skare Casen" er nogle af de mange teorier, der er udviklet gennem ESO-projektet, konkretiseret, og implementeret. Som forventet, er der tekniske grænser for hvor komplekse reguleringsstrategier, det er hensigtsmæssigt at indføre af hensyn til rentabilitet (tilbagebetalingstider under 2 år), størrelsen af investering i forhold til kundens fornemmelse af værdien af tiltaget, kundens usikkerhed i forbindelse med indførslen af ny teknologi, etc. Desuden kan følgevirkninger, f.eks. forbedret overvågning og kontrol, have stor betydning for beslutningen.

I skrivende stund er en generel vejledning i praktisk energioptimering under udarbejdelse, som vil blive tilgængelige i færdig form ved projektets afslutning.

5 ESO strategier

Køleanlæggets primære opgave er at fastholde temperaturerne på kølestederne på de ønskede værdier. Disse temperaturer benævnes fremover ”primære temperaturer”. Temperaturerne af kølemidlet (eksempelvis fordampnings- og kondenseringstemperatur) og temperaturerne af briner (sekundære kølemidler) - i tilfælde af indirekte køling/varmeafgivelse - benævnes sekundære temperaturer.

- De sekundære temperaturer er hjælpemidler til at opnå de primære temperaturer -

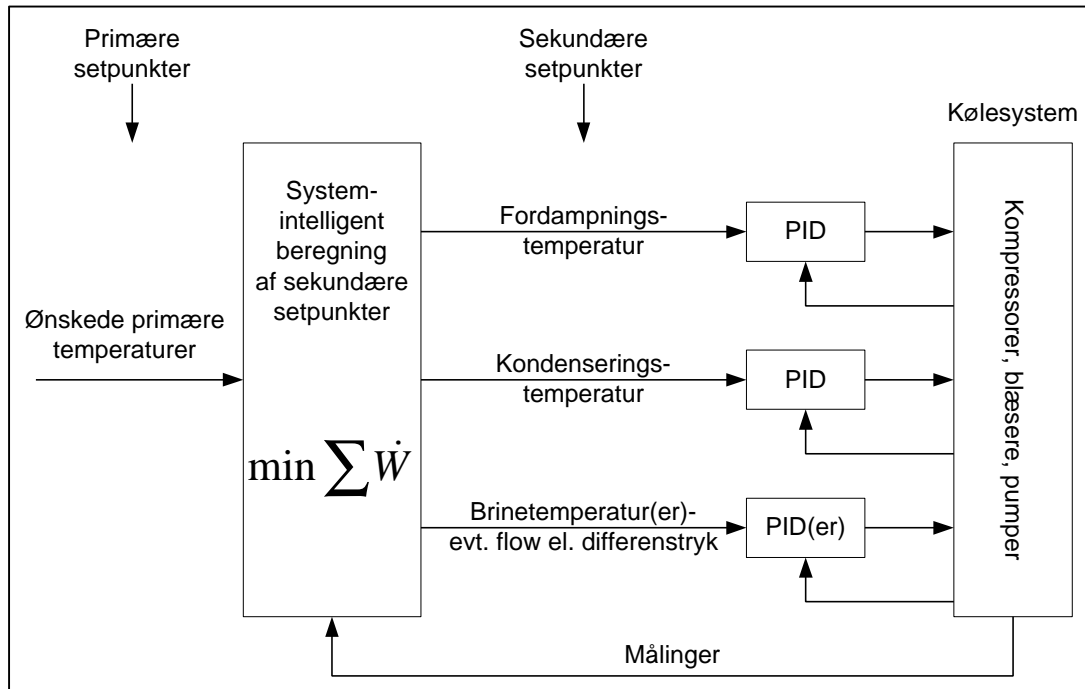
I princippet er det underordnet hvilke værdier de sekundære temperaturer har - blot de er indenfor anlæggets driftsområde. Set på denne måde kan optimeringsopgaven formuleres således:

Styr kapaciteterne af kompressorer, pumper og blæsere, sådan at de ønskede primær temperaturer opnås, og systemets samlede energiforbrug minimeres.

Sådan en formulering ligger op til en såkaldt optimal MIMO-regulering (multiple input, multiple output). Dvs en struktur, hvor alle indgreb fastlægges i en integreret styrestrategi under hensyn til optimering af en kriteriefunktion, i dette tilfælde systemets samlede energiforbrug. Samling af enkelt variabel styringer (primære og sekundære sætpunkter).

I praksis anvendes rendyrkede MIMO-styrestrategier sjældent i forbindelse med køleanlæg. Dels kan det være meget svært at overskue, hvordan reguleringen egentlig foregår, dels kan det også være vanskeligt at vurdere de reguleringsmæssige aspekter som stabilitet og robusthed. Derfor foregår regulering i praksis oftest som kombination af enkelt-sløjfer (SISO, single input, single output). Dvs. hver styrbar aktiv komponent ("aktuator") regulerer én procesvariabel. I systemet i figur 2 kunne kompressoren eksempelvis regulere sugetrykket, mens fordamperblæseren kunne regulere kølestedstemperaturen. Man kan også forestille sig ”omvendt kobling”, dvs. kompressoren regulerer kølestedstemperaturen, mens fordamperblæseren regulerer sugetrykket (fordampnings-temperaturen).

- Valg af hvilke aktive komponenter, der regulerer bestemte procesvariable er ikke entydigt -



Figur 6: Kaskaderegulering.

Optimeringsopgaven kan formuleres således:

Fastlæg de sekundære sætpunkter sådan at systemets totale energiforbrug minimeres.

Som nævnt, er det ikke entydigt, hvordan processætpunkter og aktive komponenter kombineres. Det forekommer intuitivt korrekt at kombinere en given procesvariabel med den aktive komponent, som har mest direkte indflydelse på denne. I et køleanlæg hænger hele processen sammen, så ændring af kapaciteten på én aktiv komponent vil i princippet have indflydelse på alle procesvariable. Hvis eksempelvis kondensatorblæserens hastighed forøges, da falder (alt andet lige) kondenseringstemperaturen ret hurtigt. Som resultat af dette vil kuldeydelsen stige en smule, hvorfor den kolde side også påvirkes - lidt. Her er således tale om procesmæssige krydskoblinger.

I praksis vil den generelle energioptimeringsopgave eksempelvis kunne formuleres som: *find det energioptimale sugetryk til regulering af kompressorerne og den energioptimale kondenseringstemperatur til regulering af blæserne på højtrykssiden.* Ved introduktion af indirekte køling og varmeafgivelse skal der også formuleres energioptimale sætpunkter til pumpereguleringerne.

Tommelfingerregler for beregning af sætpunkter.

Som overskriften antyder, så præsenteres beregningsudtryk for de energioptimale sekundære sætpunkter. Disse sammenhænge kan være baseret på eksperimentelle erfaringer, simuleringer eller kombinationer af disse. Rent matematisk kan det udtrykkes som:

$$T_{\text{sæt_sekundær},i} = f(\text{målinger, parametre})$$

De generelle formler for begrundede forslag til energi(nær)optimale sætpunkter ser ud som følger.

Varme side

Kondenseringstemperatur:

$$T_{\text{kond}} [^{\circ}\text{C}] = A + B \cdot T_{\text{omg}};$$

$$8 \leq A \leq 11; \quad 0,8 \leq B \leq 0,95$$

Hvis der er tale om indirekte varmeafgivelse skal vand middeltemperaturen ca. være:

Vandmiddeltemperatur:

$$T_{\text{vand}} [^{\circ}\text{C}] = T_{\text{omg}} + A \cdot (T_{\text{kond}} - T_{\text{omg}});$$

$$0,55 \leq A \leq 0,65;$$

Afkøling af vand:

$$\Delta T_{\text{vand}} [K] = A \cdot (\sqrt{T_{\text{kond}} - T_{\text{omg}}});$$

$$1,9 \leq A \leq 2,1;$$

Kolde side

På den kolde side kan fordampertemperaturen opfattes som "master-temperaturen", der regulerer kølestedets temperatur. Jo større belastning jo lavere fordampningstemperatur. I mellem fordampningstemperaturen og kølestedstemperaturen fastlægges brinetemperaturerne som følger.

Brinemiddeltemperatur:

$$T_{\text{brine}} [^{\circ}\text{C}] = T_{\text{for}} + A \cdot (T_{\text{kølested}} - T_{\text{for}});$$

$$0,3 \leq A \leq 0,45;$$

Afkøling af brine:

$$\Delta T_{\text{brine}} [K] = A \cdot (\sqrt{T_{\text{kølested}} - T_{\text{for}}});$$

$$1,9 \leq A \leq 2,1;$$

På den kolde side skal temperaturerne altså følges i "takt" op og ned afhængig af belastningen (fordampningstemperaturen), mens temperaturerne på den varme side kun er afhængig af omgivelsernes temperatur.

Det skal påpeges at en egentlig optimering kræver nærmere kendskab til de konkrete forhold, men hvis anlægget er "almindeligt dimensioneret", så vil brug af ovenstående sætpunktsberegninger lede til næroptimal drift.

ESO Projektdeltagere

DTU:

- * *Arne Jakobsen* (projektleder)
- * *Jane G. Hansen* (nu NESAs)
- * *Morten J. Skovrup*

Teknologisk Institut:

- * *Kenneth Rasmussen*
- * *Kim G. Christensen*
- * *Lars Rasmussen*
- * *Svenn Hansen*

York Refrigeration:

- * *Amdi Sørensen*
- * *Jørn Visti Bach*
- * *Lennart Rolfsmann*
- * *Martin Maach*
- * *Per Bunde Pedersen*
- * *Yngve Johansson*

Danfoss:

- * *Bjarne D. Rasmussen*
- * *Christian Bendtsen*
- * *Claus Thybo*
- * *Jakob Fredsted*
- * *Lars Larsen*

Grundfos:

- * *Ivan Knudsen*
- * *Kristian G. Hansen*

Carlsberg:

- * *Ervin Knudsen* (nu pensioneret)
- * *Mogens Gross*
- * *Rudolf Schultz*

SuperKøl:

- * *Per Lundorff*
- * *Tom Gøtttsch*

Mere info incl. kontaktinformation kan fås på : www.et.dtu.dk/ESO

Energiteknik

**Institut for Mekanik,
Energi og Konstruktion**

**Danmarks Tekniske
Universitet**

Nils Koppels Allé, Bygning 402
DK-2800 Kongens Lyngby
Danmark
Tlf. (+45) 4525 4122
Fax (+45) 4593 5215
bh@mek.dtu.dk
www.mek.dtu.dk

