

Rapportering ELFORSK projekt 348-006, EiSE Case

Indhold

1. Forord	2
2. Kort om EiSE's funktionalitet	2
3. EiSE udbredelse	3
4. EiSE opfølgning	3
5. EiSE kølestrategi – tydeliggørelse ud fra beregninger og indførelse af marginal COP	4
6. EiSE, fortsat udbredelse og udvikling	5
7. Bilag : Energieffektiv kølestrategier for EiSE med friskluft køl og mekanisk køl	6



ELFORSK

Undersøgelsen beskrevet i denne rapport blev udarbejdet som del af projektet **Energirigtigt drift af det rette indeklima i bygninger – ENDRIN** støttet af ELFORSK i periode 2016–2017, projektnummer 348-006 (www.elforsk.dk).

1. Forord

Opfølgningen på "EiSE" er en del af ELFORSK projekt 348-006, Energirigtig Drift af det rette Indeklima (EnDrIn). Det samlede projekt er forløbet i perioden primo 2016 til forår 2018.

Hovedaktører på denne Case er Peter Poulsen, Better Buildings og Arne Jakobsen, Maskinmesterskolen København.

2. Kort om EiSE's funktionalitet

EiSE er udviklet i tidligere ELFORSK projekter, 339-032, 339-053 og 340-004. I praksis er det primært Peter Poulsen (tidligere Teknologisk Institut og nu eget firma: Better Buildings) som har implementeret EiSE som en funktionalitetsoverbygning på CTS anlæg.

EiSE energioptimerer driften af opvarmning, ventilation og køling i bygninger ved at måle og analysere de faktiske rumtemperaturer i forhold til et sætpunktsforløb, som sikrer at komforten er bedst mulig ved arbejdsdagens begyndelse (for flest mulige) og evt lade temperaturen stige lidt i løbet af dagen om sommeren og falde lidt i løbet af dagen om vinteren. Et morgen-sætpunkt er typisk 22 °C, og vil i løbet af en sommerdag stige til ca. 25 °C.

Vinter-drift:

Ventilationsluftmængden opereres som udgangspunkt som minimums luftmængde i arbejdstiden (da minimumsluftmængden i de fleste tilfælde er tilstrækkelig til at sikre tilstrækkelig godt atmosfærisk indeklima). Ventilationen kan slukkes helt i en periode om natten.

Den primære opvarmning foregår ofte vha. vandbårne radiatorer. "Varme-kurven" (fremløbstemperaturen som funktion af udetemperatur) forskydes lidt ned hvis der generelt er varmt nok og lidt op hvis der generelt er for koldt.

Hvis temperaturerne er høje nok alle steder i en sektion evt. kombineret med krav til at udetemperaturen er over et vist niveau, så kan der helt lukkes for en sektion (pågåeldende blandesløjfe). Hermed spares pumpearbejde og unyttig varmeafgivelse fra rør henholdsvis radiatorer.

Sommer-drift:

Hvis kølingen foregår ved hjælp af friskluft, så sættes kanaltrykket (trykket som indirekte styrer ventilatorkapaciteten) lidt op, hvis der generelt er for varmt og lidt ned, hvis der generelt er koldt nok.

Den akkumulerede varme skal fjernes så morgen komforten er ens hver dag, fx 23 grader. Den akkumulerede varme er proportional med bygnings temperaturen, jo højere temperaturen er des tidligere starter natkølen.

Da udeluftens temperatur er koldere om natten kan det oftest betale sig at starte natventilationen nogle timer før begyndelse af arbejdstid og køle bygningen ned til eksempelvis ca 20 °C.

Hvis der er installeret "koldtvands-køleflader", så vil det oftest bedst betale sig at opererer med så tilpas lave luftmængder at det atmosfæriske indeklima netop er tilgodeset. Hvis udeluften er tilpas kold, så tilvejebringes det kolde vand via frikøling og hvis dette ikke er muligt overtager "kompressor-køling".

Sætpunktet til koldt vandstemperaturen sættes lidt op, hvis alle har det "koldt nok" og lidt ned, hvis der er tilstrækkelig mange, der har det for varmt. Dermed optimeres COP (EER) for kompressor-køleanlægget.

3. EiSE udbredelse

Fra 2010 til primo 2018 er der installeret ca. 30 EiSE overbygninger til CTS anlæg. Nogle EiSE funktionaliteter er også implementeret af nogle af de større CTS/BMS udbydere uden at de nødvendigvis refererer til disse funktionaliteter som "EiSE".

4. EiSE opfølgning

I dette projekt var det oprindeligt tanken at følge op på EiSE installationerne forholdsvis detaljeret og omfattende og samtidig evaluere om der ville være belæg for en videreudvikling. I en beskæring af projektansøgningen blev ambitionsniveauet reduceret til at foretage "stikprøver" og samtidig nøjes med umiddelbare tilgængelige data og besøge villige anlægsejere/driftsorganisationer.

I praksis har det været 3 case-studier, hvor den driftsansvarlige er besøgt. Her er EiSE historikken gennemgået, EiSE kendskabet, CTS implementering og umiddelbare relevante energidata indhentet. Derudover er der spurgt ind til indeklimaoplevelsen før/efter EiSE, herunder evt. klager.

Der er gennemført besøg/inspektion på Roskilde Rådhus (10/5-2016, Hanne Martinsen), Greve Rådhus (24/5-2016, Jan Larsen) og Brøndby Kulturhus (20/6-2016, Sune Lyng Rasmussen).

I Roskilde blev EiSE implementeret efterår 2013. Ved inspektion af CTS brugerflade og interviewets indhold fremgik at EiSE blev brugt uden nogle problemer. Der var implementeret lidt ekstra funktionalitet, hvor "varmemesteren" ved tryk på en "knap" kunne skrue op for varmen, hvis der var en "her og nu" kuldeklage, der skulle adresseres.

Energimålinger fra 2011 versus 2014 indikerede en varmebesparelse på ca. 40% og en el-besparelse på ca. 25%. Der er i den periode ikke sket større ændringer af klimaskærm eller andre større forandrings-elementer, som umiddelbart kan forklare disse reduktioner. Men der er i perioden sket en generel opprioritering af reduktion af energiforbrug båret af at Roskilde via sin status som "klimakommune" har en ambitiøs klimapolitik.

I Greve kommune blev EiSE implementeret efterår 2015.

Kendskabsgraden til EiSE var på et moderat niveau. Dette havde i nogen grad nogle organisatoriske og prioritetsmæssige baggrunde. Kommunens energitiltag var typisk ESCO projekter (Siemens) og fokus var primært på tilbagebetalingstider fremfor på at der også var nogle selvstændige/aggressive "iklima-mål".

Da EiSE i sig selv ikke indgik i et ESCO projekt var det ikke muligt at få en selvstændig energiopfølgning på dette.

En vigtig pointe ved en implementering af EISE er at der i projektperioden foretages inspektion af de lokale særegne forhold, som kan påvirke indeklimaet og driften af CTS-anlægget. Bygningen vender Nord/Syd, hvorfor solens indstråling kunne bevirke at kontorernes mod Syd var meget varme medens kontorernes mod Nord var forholdsvis kolde. Man kunne således have et samtidigt varme- og kølebehov. Derfor var det vigtigt at skabe mest mulig naturlig luft cirkulation mellem rum på Nord og Sydside. Brugeradfærden var, at dørene ofte stod åbne ud til midtergangen. Bygningen er en tung bygning og den primære bortskaffelse af akkumuleret varme, fra de enkelte cellekontorer, skete gennem åben kontordør. De åbne døre udlignede temperaturforskellen mellem kontorernes i løbet af natten og den balancerede ventilation fjernede den akkumulerede varme.

I Brøndby kulturhus blev EISE implementeret ultimo 2015.

Problematikken omkring Nord/Syd (Vest) facader var også meget tydelig her. Da samtidig mange af de små kontorers døre skulle holdes lukket af "sikkerhedshensyn", så var det svært at skabe den hensigtsmæssige luftcirkulation på tværs af bygningen.

Et andet særegen problematik var at man havde en stor sal til koncerter og arrangementer, hvor der kunne komme mange mennesker. Dette skaber en stor "varmebelastning" og da der samtidig ikke var kompressorkøling til rådighed, så var det vigtigt at benytte "natkøling" natten før et større arrangement, sådan at salen var forholdsvis kold ved "event-start". Dette var en ekstra funktionalitet som der var blevet implementeret i CTS/EISE.

Kendskabsgraden og tilfredsheden med EISE var god. Her blev lovet energibesparelser som led i aftalen, og disse aftaler er blevet indfriet i løbet af 4 måneder fra aflevering. Men det har ikke været praktisk muligt for vores projekt at få adgang til konkrete før/efter målinger.

5. EISE kølestrategi – tydeliggørelse ud fra beregninger og indførelse af marginal COP

Der er forskellige "håndregler" om at øge ventilationsluftmængden når kølebehovet stiger, det kan være relativt dyrt at gøre det på en uhensigtsmæssig måde. Men der mangler (manglede) nogle lidt mere stringente begreber og beregninger, som tydeliggør disse forhold.

Som led i dette ELFORSK projekt er der indført begreberne marginal COP og marginal SEL-værdi. Disse begreber er introduceret i bilag til denne case. Her er det tydeligt vist, at hvis et ventilationsanlæg opererer på mere end ca. 50% af dimensionerende, hvilket næsten altid forekommer, så skal kølevandstemperaturen sænkes før luftmængden øges. Det har mange steder været god latin at gøre det omvendt, først luftmængden efterfulgt af temperaturen, men det fører oftest til unødvendigt højt energiforbrug. I bilaget er EISE energioptimal kølestrategi tydeliggjort.

6. EiSE, fortsat udbredelse og udvikling

EiSE skal samtænkes med indeklima. Hvis EiSE bliver indført samtidig med at komfort udfordringer mindskes, så vil driftsorganisationen og brugerne tage rigtig godt imod "projektet". EiSE er en indeklimatestrategi, hvor driftspersonalet vælger en temperaturmålsætning, fx at temperaturen hver morgen er 22 grader og at den ønskede maksimale temperatur er 25 grader. I kontorbygningerne er disse tal ikke tilfældige, mænd i jakkesæt elsker 22 grader og hader når temperaturen er over 25 grader. Kvinder i sommerkjoler har det lige omvendt, de elsker 25 grader og hader når temperaturen er under 22 grader. De fleste brugere har mulighed for at opleve neutral komfort når temperaturen er 22-25 grader. EiSE databehandler behandler aktuelle rumtemperaturer og beregner de optimale sætpunkter, som altid er dynamiske. Funktionaliteten med at have glidende sætpunkter over et døgn er implementeret hos flere CTS-leverandører. Selve den statistiske behandling af aktuelle rumtemperaturer, synes at være særegent for EiSE.

BETTER Buildings forventer at sælge/implementere EiSE 3-5 steder pr år.

Afrundingsvis, så udtaler Peter Poulsen:

"Vi skal opfylde proces- og indeklimakrav i bygninger, her ligger en stor udfordring i Danmark. Vi har desværre en tradition, hvor vi ikke opfylder indeklimakrav, vi tager ikke hensyn til alle brugere og vi taler hele tiden om overskridelser. Erfaringen med EiSE strategien er entydig: Der er ikke råderum omkring energibesparelser og indeklima, når man er uinteressert i at opfylde brugernes behov. Der realiseres derfor næsten ingen energibesparelser i Danmark, når indeklima påvirker projektet.

EiSE strategien tager hensyn til alle brugeres behov og har gjort op med "ideen om, at brugerne skal acceptere overskridelser". Med en simpel akkumuleringsstrategi er det lykkedes at reducere hovedmålerens energiforbrug med 10-30% i kontorbygninger og skabe bedre komfort. EiSE er forædlet med årene og forædlingen sker indenfor sikring af behovet. Jo færre overskridelser des større energibesparelser. EiSE er fx lykkedes med at realisere kondenseringsenergien for store gasfyr. Energitilførsel-, proces- og indeklimakrav kan optimeres i en samlet strategi, den eneste forudsætning er, at alle krav tilgodeses i strategien. EiSE kontrollerer indeklima behovet og giver tilbagemeldinger, som kan samkøres med andre krav. Udfordringen er, at strategien er tværfaglig og at det er de færreste fagpersoner, som har en bred specialistviden og specifik viden om, hvordan man løser komfort overskridelser.

Der er tre struktur udfordringer i Danmark når energiforbruget skyldes komfort og indeklima. 1) Vi taler hele tiden om overskridelser og ser bort fra brugerne, kvalitetsniveauet er lavt i Danmark set fra brugernes synspunkt. 2) Den lave indeklimakvalitet i Danmark har påvirket branchen og brugernes opfattelse, der er en grundlæggende opfattelse af, at det ikke kan blive bedre. 3) Der mangler fagfolk og virksomheder, som kan løfte en tværfaglig opgave når indeklima har betydning i et energiprojekt".

7. Bilag : Energieffektiv kølestrategier for EiSE med friskluft køl og mekanisk køl

Generelt

EiSE holder øje med de enkelte zone-temperaturer og sikrer at kun nogle få er lidt rigeligt væk fra sætpunktet. Der spares energi på to måder. Dels ved at der ikke helt skal ydes varme/køling i den udstrækning at alle er 100% indenfor komfortzonen. Det andet – og måske vigtigere er at der løbende justeres i sætpunktet til kanaltryk eller fremløbstemperatur, sådan at ventilation/opvarmning/køleanlæg opererer med så høj effektivitet som mulig.

EiSE med Køl

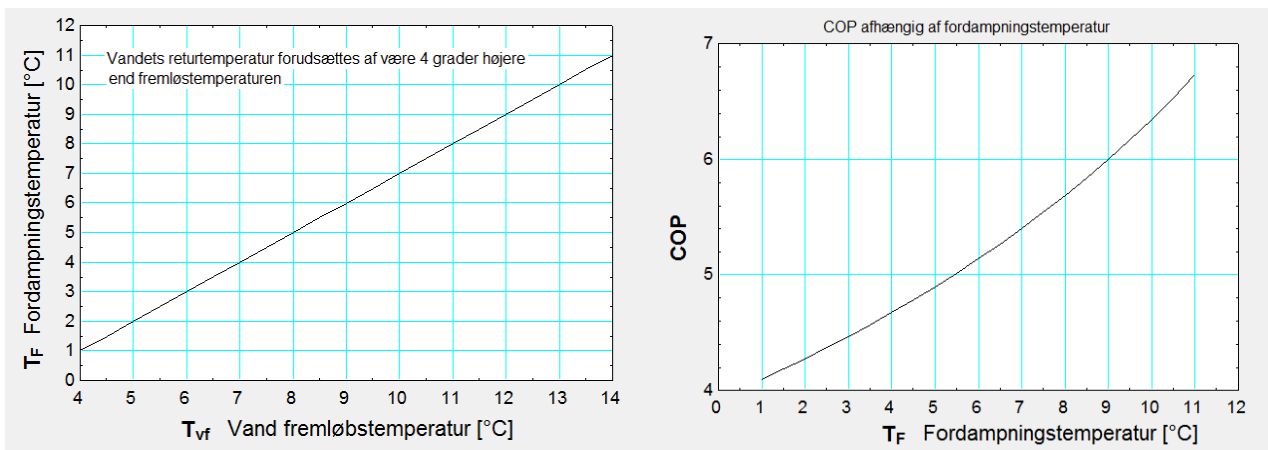
Lad os antage at der er mekanisk køling – en Chiller, der leverer passende koldt vand til det centrale ventilationsanlæg og/eller lokale kølebafler.

Køleanlæggets COP er bedst hvis fordampningstemperaturen er så høj som mulig.

Kondenseringstemperaturen skal være ca. 8 grader højere end omgivelsernes temperatur. Så vil summen af effektforbruget til kompressorerne og blæserne på tørkølerne (placeret udenfor bygning eller på tag) være minimal.

For at fordampningstemperaturen bliver så høj som mulig, så skal temperaturen på det kolde vand være så høj som mulig. Det er eksempelvis bedre for køleanlægget at operere med 12/16 vand (temperatur-frem / temperatur retur fra luftkølerne) end 10/14.

En lille simulering viser, at hvis vand-temperaturen stiger 1 °C, så stiger fordampningstemperaturen ligeledes ca. 1°C. COP vil stige ca. 5 %. En forholdsvis enkel simuleringmodel, hvor fordampersens UA-værdi er holdt fast og vandets fremløbstemperatur er ændret (med en temperaturforskel mellem frem og retur på 4 grader) giver forløbet vist nedenfor.



Når fremløbstemperaturen stiger, så vil de enkelte kølesteder (luftkølere) åbne op (en 3-vejsventil), sådan at køleren lokalt bruger mere – men varmere - kølevand. Når et kølested har fuldt åben ventil, så vil det kølested være "flaskehalsen" og der vil den ønskede lufttemperatur kunne blive for høj.

Men det er også det der er meningen, at skabe en situation hvor få steder er på maks og lufttemperaturen der, er lidt for høj.

Det svarer fuldstændig til at kanaltrykket i ventilation reduceres indtil nogle få steder har lidt for lidt luft (lokal reguleringspjæld fuldt åbent).

Summa summarum, EiSE med mekanisk køl justererer på sætpunktet på fremløbstemperaturen af det kolde vand og søger at maksimere dette.

Derudover kan EiSE medtage:

- "Holde øje med" at kondenseringstemperaturen er ca 8 grader højere end omgivelsernes temperatur
- At der, når det er muligt, benyttes frikøling – evt. i kombination med mekanisk køling. Dvs typisk være at benytte den kolde udeluft til at køle vandet med. I overgangssæsonerne kan det være at frikølingen køler det første stykke – eksempelvis fra 14 °C til 12 °C – og den mekaniske køling det sidste stykke – eksempelvis fra 12 °C til 10 °C.
- Benytte natkøling – Her vil COP på køleanlægget kunne være lidt højere idet kondenseringstemperaturen vil kunne være mindre om natten i forhold til om dagen.
- Overveje om en højere luftmængde i nogle tilfælde vil være at foretrække rent energimæssigt. Se nedenfor.

Højere luftmængde til som ekstra køling.

Her kigger vi på hvad de to alternative metoder – ekstra kold luft eller mere køling via lokale kølere. Vi antager at den øgede luftmængde rent temperaturmæssigt er gratis og det kun er det øgede effektoptag til ventilator, som er "straffen".

Lad os sige at der er brug for $\Delta\dot{Q}$ mere køling (eksempelvis 1 kW).

Mer-energiforbruget til mekanisk køling er ganske enkelt:

$$\Delta\dot{W}_{Chiller} = \frac{\Delta\dot{Q}}{COP}; \text{ eksemplevis } \Delta\dot{W}_{Chiller} = \frac{1 \text{ kW}}{5} = 200W$$

Alternativt sættes luftmængden op med $\Delta\dot{V}$ og blæser mere luft ind med temperatur T_{li} og suger tilsvarende luftmængde ud med T_{zone} .

Den nødvendige ekstra luftmængde kan udregnes som følger:

$$\Delta\dot{Q} = \Delta\dot{V}_{luft} \cdot \rho_{luft} \cdot C_{p_{luft}} \cdot (T_{zone} - T_{li}); \text{ med } C_{p_{luft}} \text{ ca lig } 1.006 \text{ kJ}/(\text{kg } ^\circ\text{C}) \text{ og } \rho_{luft}=1,19 \text{ kg}/\text{m}^3; \text{ fås}$$

$$\Delta\dot{Q} = \Delta\dot{V}_{luft} \cdot 1,2 \cdot (T_{zone} - T_{li}) \Leftrightarrow \Delta\dot{V}_{luft} = \frac{\Delta\dot{Q}}{1,2 \cdot (T_{zone} - T_{li})}$$

her er enheden for kuldeeffekten "kW" og enheden for luftmængden "m³/s".

Mer-effektforbruget til ventilation er, hvis vi som udgangspunkt holder SEL-værdien konstant:

$$\Delta \dot{W}_{vent} = SEL \cdot \Delta \dot{V}_{luft} = SEL \cdot \frac{\Delta \dot{Q}}{1,2 \cdot (T_{zone} - T_{li})}$$

Men lad os checke dette mod det faktiske forhold at SEL varierer med luftflowet:

$$\Delta \dot{W}_{vent} = \dot{W}_{efter} - \dot{W}_{før} = SEL_{efter} \cdot \dot{V}_{efter} - SEL_{før} \cdot \dot{V}_{før}$$

med $\dot{W} \approx \text{konstant} \cdot \dot{V}^3$ og $SEL \approx \text{konstant} \cdot \dot{V}^2$ fås

$$\begin{aligned} \Delta \dot{W}_{vent} &= SEL_{før} \cdot \dot{V}_{før} \left(\frac{SEL_{efter} \cdot \dot{V}_{efter}}{SEL_{før} \cdot \dot{V}_{før}} - 1 \right) = SEL_{før} \cdot \dot{V}_{før} \left(\left(\frac{\dot{V}_{efter}}{\dot{V}_{før}} \right)^3 - 1 \right) = \\ &SEL_{før} \cdot \dot{V}_{før} \left(\left(\frac{\dot{V}_{før} + \Delta \dot{V}_{luft}}{\dot{V}_{før}} \right)^3 - 1 \right) \end{aligned}$$

Eksempelvis $SEL=2000 \text{ W}/(\text{m}^3/\text{s})$; $T_{zone}=22 \text{ }^\circ\text{C}$ og $T_{li}=17^\circ\text{C}$ og stadig $\Delta \dot{Q}$ på 1 kW. Vi benytter først den simple beregning, hvor SEL antages konstant:

$$\Delta \dot{W}_{vent} = 2000 \cdot \frac{1 \text{ kW}}{1,2 \cdot (22 - 17)} = 333 \text{ W}$$

Men, som det ses i beregningen nedenfor er denne beregning "for optimistisk". Lad os antage at der er tale om SEL-før på 2000 og at luftmængden øges 0,1667 m³/s (svarende til 1 kW køling) fra 1,5 m³/s til 1,65 m³/s, så får vi alternativt (og mere korrekt):

$$\Delta \dot{W}_{vent} = 2000 \cdot 1,5 \left(\left(\frac{1,5 + 0,1667}{1,5} \right)^3 - 1 \right) = 1115 \text{ W}$$

Denne stigning er afstedkommet ved blot en øgning på 11% af luften og det viser at den simple formel (333W) klart undervurderer effektforbruget.

I dette tilfælde vil det altså være energimæssigt dyrere at forhøje luftmængden fremfor at sende mere kølevand frem til den pågældende Zone, jf. en beregnet stigning i effektforbrug på 200W (Chiller) og 1115W ved at forøge luftmængden

Vi kan opstille en generel (for) enkel sammenhæng for hvornår den ene køleform er at foretrække fremfor den anden lad os se på hvornår køling med ekstra luft er at foretrække:

$$\Delta \dot{W}_{vent} < \Delta \dot{W}_{chiller} \Leftrightarrow SEL \cdot \frac{\Delta \dot{Q}}{1,2 \cdot (T_{zone} - T_{li})} < \frac{\Delta \dot{Q}}{COP} \Leftrightarrow \frac{SEL}{1,2 \cdot (T_{zone} - T_{li})} < \frac{1}{COP}$$

$$\frac{SEL \cdot COP}{1,2 \cdot (T_{zone} - T_{li})} < 1,$$

Hvis dette er opfyldt kan det umiddelbart betale sig at øge luftmængden (lidt) fremfor at sænke temperaturen

Her skal man være opmærksom på at det er SEL-værdien ved den aktuelle drifts-situation der skal anvendes. Men lad os i det følgende tage højde for variationen i SEL værdien.

Marginal COP for køling med friskluft

Da SEL værdien stiger med luftmængden i anden potens vil den marginale SEL-værdi være højere end "gennemsnits-værdien". I det følgende indføres og udledes udtryk for den såkaldte marginale COP for køling med friskluft.

$COP'_{vent} = \frac{d\dot{Q}}{d\dot{W}_{vent}}$; altså den (diffentielt) øgede kølelydelse i forhold til det øgede effektforbrug. Det er denne COP der marginalt er gældende i driftspunktet.

Med

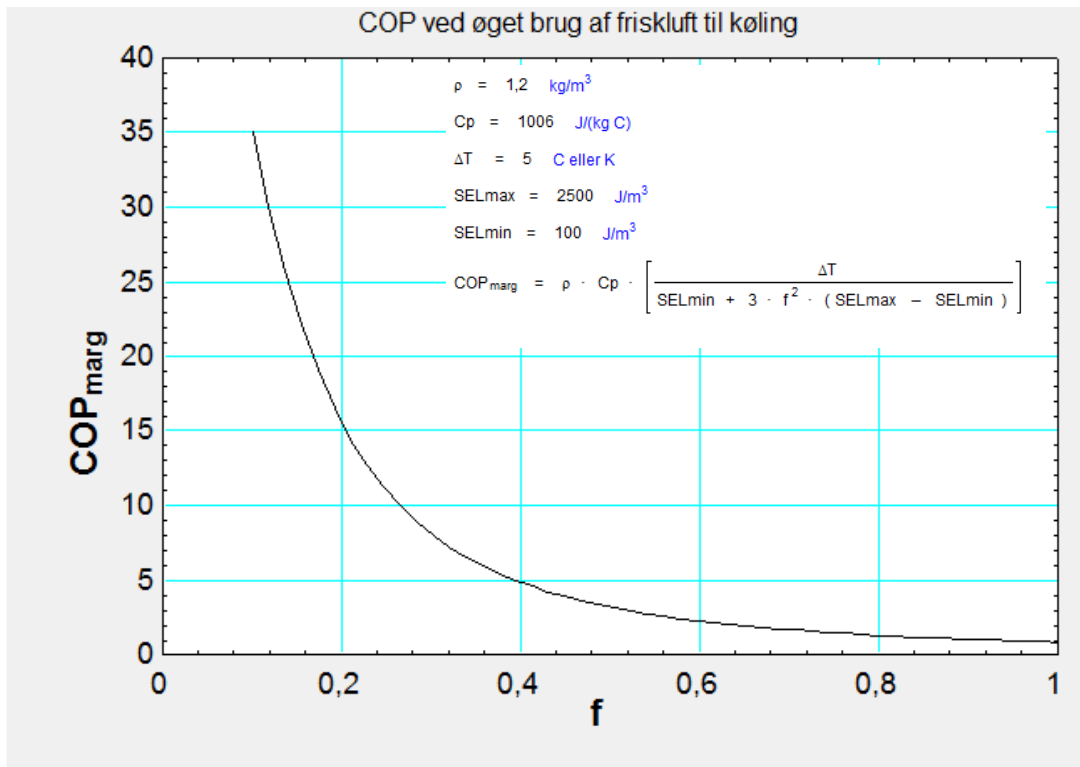
$$f = \frac{\dot{V}}{\dot{V}_{max}}; SEL = SEL_{min} + f^2 \cdot (SEL_{max} - SEL_{min})$$

$$\dot{W}_{vent} = SEL \cdot \dot{V} \text{ og } \dot{Q} = \dot{V} \cdot \rho \cdot C_p \cdot \Delta T$$

kan følgende sammenhæng udledes (resultat og brug vises nu, udledning vises bagefter)

$$COP'_{vent} = \frac{d\dot{Q}}{d\dot{W}_{vent}} = \frac{\rho \cdot C_p \cdot \Delta T}{SEL_{min} + 3 \cdot f^2 \cdot (SEL_{max} - SEL_{min})}$$

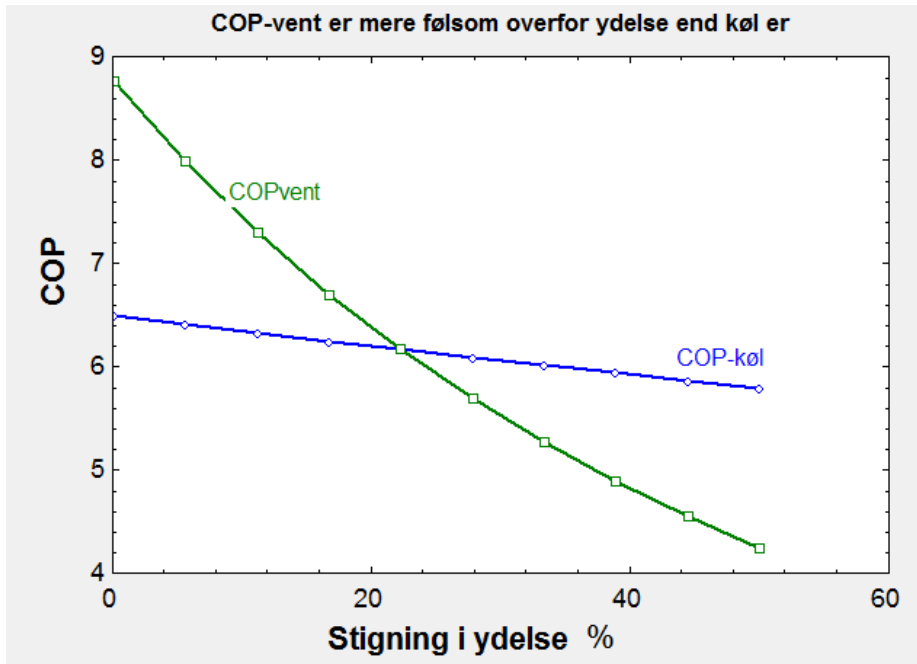
På følgende figur vises en kurve for denne marginale ventilations COP som funktion af relativ luftmængde.



Det er er meget tydeligt nu, at det ved lave luftmængder giver en god energieffektivitet at øge friskluften moderat, men hvis luftmængden i forvejen er høj, så vil det bedre kunne betale sig at benytte ”mekanisk køling”. Hvis vi siger at den tilsvarende COP for mekanisk køling er 5, så ses at luftmængden skal holde sig under 40% for at øget brug af denne er at foretrække som kølekilde.

Man kan naturligt indføre lignende marginal COP for det mekaniske køleanlæg. I mange tilfælde vil COP være nogenlunde konstant, men kan dog falde lidt, hvis øget køling kræver lavere fordampningstemperatur.

En simulering, hvor det antages at fordampningstemperaturen falder med øget ydelse giver som eksempel forløbene vist i følgende figur.



Det der er pointen er at COP for ventilationskøling er stærkt afhængig af ydelsen, medens COP for den mekaniske køling kun er svagt aftagende med øget ydelse.

Konklusionen er entydigt at brug af øget frisk-luft som kølekilde kun er energimæssigt fornuftigt – i forhold til brug af mekanisk køling – ved relativt lave luftmængder.

Udledning af sammenhæng (nørd afsnit):

Basis sammenhænge:

$$\dot{V} = f \cdot \dot{V}_{max}$$

$$SEL = SEL_{min} + f^2 \cdot (SEL_{max} - SEL_{min})$$

$$\dot{W}_{vent} = SEL \cdot \dot{V}$$

$$\dot{Q} = \dot{V} \cdot \rho \cdot C_p \cdot \Delta T$$

Når vi skal differentiere for at udlede udtrykket for den marginale COP benyttes "kædereglen":

$$COP_{mar} = \frac{d\dot{Q}}{d\dot{W}_{vent}} = \frac{d\dot{Q}}{d\dot{V}} \cdot \frac{d\dot{V}}{df} \cdot \frac{df}{d\dot{W}_{vent}} = \frac{d\dot{Q}}{d\dot{V}} \cdot \frac{d\dot{V}}{df} \cdot \frac{1}{\frac{d\dot{W}_{vent}}{df}}$$

Det sidste led findes ud fra:

$$\begin{aligned} \dot{W}_{vent} = \dot{V} \cdot SEL &= f \cdot \dot{V}_{max} \cdot (SEL_{min} + f^2 \cdot (SEL_{max} - SEL_{min})) = \\ &= f \cdot \dot{V}_{max} \cdot SEL_{min} + f^3 \cdot \dot{V}_{max} \cdot (SEL_{max} - SEL_{min}) \end{aligned}$$

Herefter er det "blot" at gange de tre differentierede led sammen:

$$COP_{mar} = (\rho \cdot C_p \cdot \Delta T) \cdot (\dot{V}_{max}) \left(\frac{1}{(\dot{V}_{max} \cdot SEL_{min} + 3 \cdot f^2 \cdot \dot{V}_{max} \cdot (SEL_{max} - SEL_{min}))} \right)$$

Altså:

$$COP_{mar} = \left(\frac{\rho \cdot C_p \cdot \Delta T}{(SEL_{min} + 3 \cdot f^2 \cdot (SEL_{max} - SEL_{min}))} \right)$$

Smukt ikke ☺