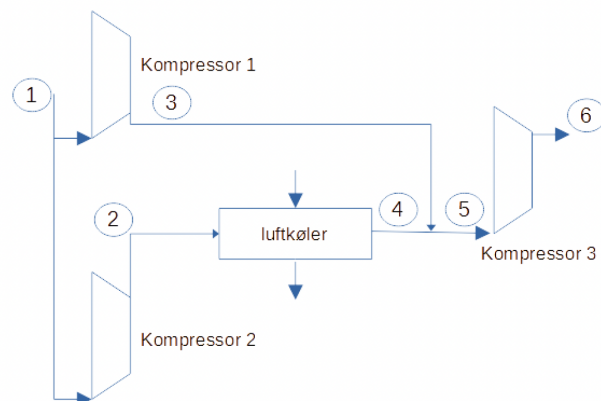


# Eksamen – Termodynamik

Noah Rahbek Bigum Hansen – 202405538

3. juni 2025

## 1 Et kompressorsystem



Figur 1:

**Opgave 1.** Forklar hvilke termodynamiske principper du lægger til grund for at regne på hvert komponent.

For hele systemet bruges bl.a. kontinuitetsligningen, altså at masseflowet er konstant igennem ethvert komponent idet det antages at der ikke er nogen lægaker. Derudover benyttes også at energi er bevaret hvorved en energibalance kan opstilles på samme måde som med massen. Derudover antages at der ikke sker tryktab, varmeoverførsel m.v. igennem rørene mellem komponenterne.

Dermed kan der for hvert komponent benyttes energibalancen:

$$\dot{W} + \dot{Q} = \dot{m}(h_{\text{out}} - h_{\text{in}}) + \Delta E_{\text{kin}} + \Delta E_{\text{pot}}.$$

Hvori  $\Delta E_{\text{kin}}$  og  $\Delta E_{\text{pot}}$  udgår idet disse antages at være negligerbare. Kompressoren antages adiabatisk hvorfor det ovenstående for denne reduceres til:

$$\dot{W} = \dot{m}(h_{\text{out}} - h_{\text{in}})$$

og luftkøleren antages ikke at udføre et arbejde hvorfor ligningen for luftkøleren reduceres til:

$$\dot{Q} = \dot{m}(h_{\text{out}} - h_{\text{in}}).$$

**Opgave 2.** Forklar metode for hvordan du kan opstille en model af hele systemet.

Samme punkter benyttes i EES som er angivet på tegningen. Temperatur og tryk er allerede kendt for tilstand 1, hvorfor de resterende parametre kan findes vha. stofdatakald i EES.

Massestrømmen igennem punkt 2 og 3 er desuden begge kendte, hvorfor massestrømmen i starten også kan findes som summen af disse.

Metoden er da egentligt blot at benytte isentrop-sammenhængene såsom:

$$T[2] = T[1] \left( \frac{P[2]}{P[1]} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}.$$

Hvor  $\kappa = 1,4$  er isentropeksponenten for luft.

**Opgave 3.** Lav rimelige antagelser for de detaljer der mangler

Det antages at kompressor 1 og 2 har samme trykforhold og derfor at  $P[2] = P[3]$ . Derudover antages at der med omgivelsestemperaturen menes  $T[1]$ . Ellers er koden egentligt blot stofdatakald og førømtalte isentrop-sammenhæng samt førømtalte energibalance.

**Opgave 4.** Opstil en EES-model for systemet med idealiserede komponenter.

Med afsæt i ovenstående antagelser og metode er følgende EES-kode blevet konstrueret:

```
m_dot[1] = m_dot[2] + m_dot[3]
m_dot[2] = 2
m_dot[3] = 3
m_dot[4] = m_dot[2]
m_dot[5] = m_dot[1]
m_dot[6] = m_dot[1]

T[1] = 293
P[1] = 101
s[1] = entropy(Air_ha; T=T[1]; P=P[1])
h[1] = enthalpy(Air_ha; T=T[1]; P=P[1])

k = 1,4

P[3] = 500
T[3] = T[1] * (P[3]/P[1])^((k-1)/k)
s[3] = entropy(Air_ha; T=T[3]; P=P[3])
h[3] = enthalpy(Air_ha; T=T[3]; P=P[3])

W_1 = m_dot[3] * (h[3] - h[1])
```

```
P[2] = P[3]
T[2] = T[1] * (P[2]/P[1])^((k-1)/k)
s[2] = entropy(Air_ha; T=T[2]; P=P[2])
h[2] = enthalpy(Air_ha; T=T[2]; P=P[2])

W_2 = m_dot[2] * (h[2] - h[1])

T[4] = T[1] + 5
P[4] = P[2]
s[4] = entropy(Air_ha; T=T[4]; P=P[4])
h[4] = enthalpy(Air_ha; T=T[4]; P=P[4])

Q_cool = m_dot[2] * (h[2] - h[4])

h[5] = (m_dot[2] * h[2] + m_dot[3] * h[3])/m_dot[1]
P[5] = P[4]
T[5] = temperature(Air_ha; h=h[5]; P=P[5])
s[5] = entropy(Air_ha; T=T[5]; P=P[5])

P[6] = 1000
T[6] = T[5] * (P[6]/P[5])^((k-1)/k)
s[6] = entropy(Air_ha; T=T[6]; P=P[6])
h[6] = enthalpy(Air_ha; T=T[6]; P=P[6])
```

**Opgave 5.** Beregn den tilførte effekt for kompressor 2.

Med afsæt i EES koden ovenfor er den tilførte effekt for kompressor 2 regnet til  $W_2 = 343,2 \text{ kW}$ .

**Opgave 6.** Beregn den afgivne effekt i luftkøleren.

Med afsæt i EES koden ovenfor er den afgivne effekt i luftkøleren regnet til  $Q_{\text{cool}} = 331,3 \text{ kW}$

**Opgave 7.** Opstil et skema med relevante tilstandsstørrelser.

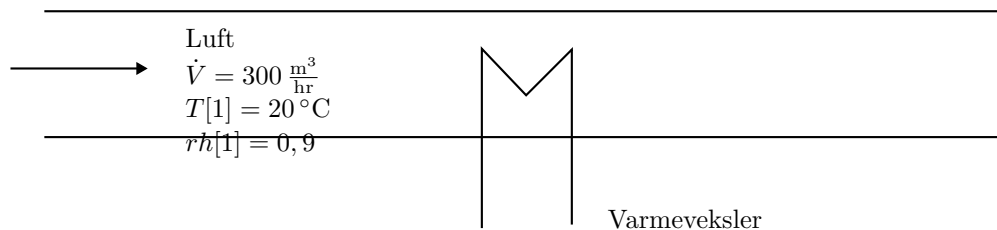
EES har på baggrund af koden fra opgave 4 produceret tabellen på **Figur 2**.

## 2 Opvarmning af luft

**Opgave 1.** Tegn en systemskitse.

	1	2	3	4	5
	$T_i$	$h_i$	$P_i$	$\dot{m}_i$	$s_i$
[1]	293	293,2	101	5	6,842
[2]	462,7	464,8	500	2	6,844
[3]	462,7	464,8	500	3	6,844
[4]	298	297,3	500	2	6,397
[5]	462,7	464,8	500	5	6,844
[6]	564,1	569,5	1000	5	6,85

Figur 2:



Figur 3:

**Opgave 2.** Hvilke relevante antagelser kan de gøre?

Det antages først og fremmest at der intet tryktab er over varmeveksleren. Derudover antages som sædvanligt at der ikke er varmetab eller massetab til omgivelserne.

**Opgave 3.** Opstil en beregningsmodel.

Følgende beregningsmodel er opstillet i EES:

```

T[1] = 20
rh[1] = 0,9
V_dot = 300
P = 101

X[1]=humrat(AirH2O;T=T[1];R=rh[1];P=P)

h[1]=enthalpy(AirH2O;T=T[1];w=X[1];P=P)

rho[1]=density(AirH2O;T=T[1];w=X[1];P=P)

T[2] = 40

X[2] = X[1]
h[2]=enthalpy(AirH2O;T=T[2];w=X[2];P=P)

Vdot_s = V_dot / 3600,0

```

```
m_dot_ha = rho[1] * Vdot_s           //massestrøm fugtig luft
m_dot_da = m_dot_ha / (1 + X[1])    //massestrøm tør luft

Q_dot = m_dot_da * (h[2] - h[1])
```

**Opgave 4.** Hvad er effektbehovet?

Af EES-koden ovenfor kan regnes at det kræver  $\dot{Q} = 2 \text{ kW}$  kontinuert tilført varmeeffekt at opvarme luften. Her er formelen for varmetilførslen i en varmeveksler brugt som i sidste opgave:

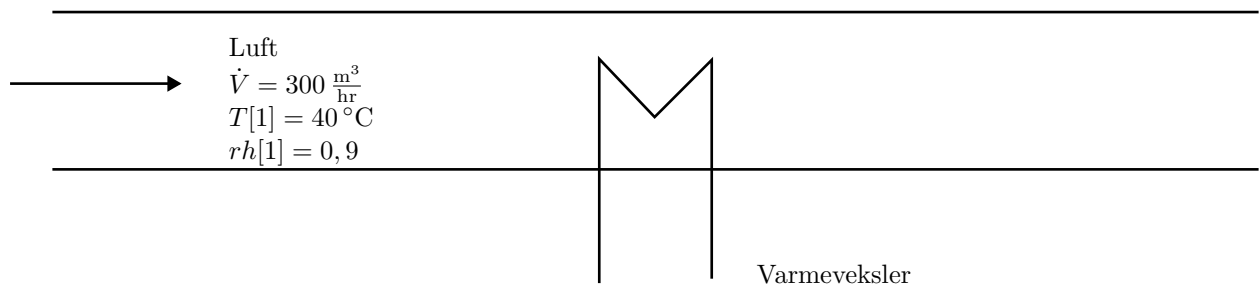
$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot (h[2] - h[1]).$$

**Opgave 5.** Hvilken type varmeveksler vil du vælge?

Jeg ville nok vælge at benytte en modstrøms pladevarmeveksler. Korrosionskravene virker ikke til at være enormt høje såfremt det blot er rent vand og luft der kommer forbi varmeveksleren, specielt idet temperaturen ikke er højere. Varmeveksleren anbefales at sættes i modstrøm for at maksimere den effektive temperaturforskelle mellem fjernvarmevandet og luften. Varmeveksleren skal i øvrigt være dimensioneret til at kunne yde mindst de påkrævede  $\dot{Q} = 2 \text{ kW}$ .

### 3 Afkøling af luft

**Opgave 1.** Tegn en systemskitse



Figur 4:

**Opgave 2.** Indtegn luftens afkølingsprocess i et  $hx$ -diagram.

Her er genbrugt store dele af EES-koden fra sidste hovedopgave

```
T[1] = 40
```

```

rh[1] = 0,9
V_dot = 300
P = 101

X[1]=humrat(AirH2O;T=T[1];R=rh[1];P=P)

h[1]=enthalpy(AirH2O;T=T[1];w=X[1];P=P)

rho[1]=density(AirH2O;T=T[1];w=X[1];P=P)

T[2] = 20

X[2]=humrat(AirH2O;T=T[2];R=1;P=P)      //Mætningsfugt R=1
h[2]=enthalpy(AirH2O;T=T[2];w=X[2];P=P)

Vdot_s = V_dot / 3600,0

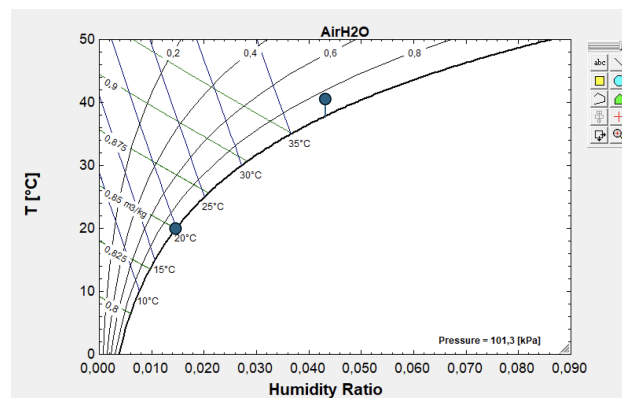
m_dot_ha = rho[1] * Vdot_s                //massestrøm fugtig luft
m_dot_da = m_dot_ha / (1 + X[1])         //massestrøm tør luft

Q_dot = m_dot_da * (h[2] - h[1])

```

Bemærk dog at  $X[2] \neq X[1]$  i dette tilfælde da nedkølingen vil resultere i at vand udfældes, dermed er fugtforholdet i sluttillstanden blot tilsvarende mætning.

Med afsæt i denne EES-kode er dette diagram produceret:



Figur 5:

Bemærk her at vandets procesvej er lodret ned indtil mætningskurven rammes, hvorefter vandet følger denne.

### Opgave 3. Hvad er effektbehovet?

Med afsæt i ovenstående EES-kode er effektbehovet regnet til  $\dot{Q} = 8,356 \text{ kW}$ .

## 4 Tryk i en vandflaske der fryses

**Opgave 1.** Hvad bliver trykket i flaske 1?

Vi antager at den givne volumen af vand er fyldt i flasken ved stuetemperatur ( $T[1] = 20^\circ\text{C}$ ) og at vi måler trykket netop idet det sidste vand fryser ved  $T[2] = 0^\circ\text{C}$ . Først findes densiteten af vandet og luften i starttilstanden for at finde deres respektive masser. Massen ændres nemlig ikke af en frysning hvorfor denne er konstant. Efter massen er fundet kan det resulterende tryk i sluttilstanden findes idet der her blot kan regnes den anden vej tilbage til et tryk.

På baggrund heraf er følgende EES-kode konstrueret:

```
V_flaske_L = 0,32
V_flaske_m3 = V_flaske_L/1000

P[1] = 101
T[1] = 20 //starttemperatur
T[2] = 0 // frysetemperatur

V_vand_L = 0,25
V_vand_m3 = V_vand_L/1000

V_luft[1] = V_flaske_m3 - V_vand_m3

rho_air[1] = density(Air_ha; T=T[1]; P=P[1]) // luftens densitet ved starten

m_air = rho_air[1] * V_luft[1] //luftens masse i starten

rho_vand[1] = density(Water; T=T[1]; P=P[1]) // vandets densitet i starten
m_water = rho_vand[1] * V_vand_m3 // massen af vandet

P[2] * V_air[2] = m_air * 0,287 * T[2] // Idealgasligningen

V_air[2] = V_flaske_m3 - m_water / density(Ice; T = T[2]; P = P[2]) // volumen tilbage til luft e
```

Dermed fås at trykket i flasken efter frysningen er 138 kPa.

**Opgave 2.** Hvad bliver trykket i flaske 2?

Her kan samme EES-kode langt hen ad vejen benyttes dog skal linje 8 ændres fra:

```
V_vand_L = 0,25
```

til

```
V_vand_L = 0,2
```

Dermed fås trykket efter frysningen til 111 kPa.

**Opgave 3.** Forklar forskellen.

Forskellen mellem de to trykmålinger opstår idet der er forskellige mængder vand i flaskerne fra starten af. Vand ændrer (som de fleste andre stoffer) densitet idet det gennemgår en fasetransition. Idet vandets densitet ændres mens dets masse fastholdes må dets volumen ligeledes ændres.

Når vandets volumen ændres ændres også volumenet som luften har mulighed for at udfylde. Denne ændring af luftens tilgængelige volumen er årsag til trykændringen. Idet der er mere vand i flasken i det første tilfælde vil det også udvide sig tilsvarende mere som resultat af frysningen.

For vand gælder i øvrigt at det er et af de få stoffer der udvider sig idet det fryser, hvorfor trykket i flasken stiger under frysningen. Dette er årsagen til at dåser sprænger i luften, hvis man glemmer dem i en fryser.

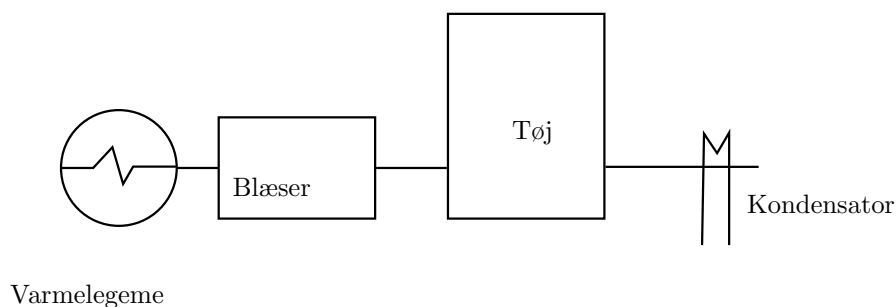
## 5 Sammenligne tørretumblere

**Opgave 1.** Hvilken model bruger mest strøm?

*Whirlpool*-modellen har energimærke A++ medens *Logik*-modellen kun har energimærke B. *Whirlpool*-modellen bruger kun omtrent halvt så meget strøm som *Logik*-modellen både målt på årsbasis og på en enkelt vask. Dette er en ret betydelig forskel.

**Opgave 2.** Forklar opbygningen af de to modeller og forskellene – tegn systemdiagram.

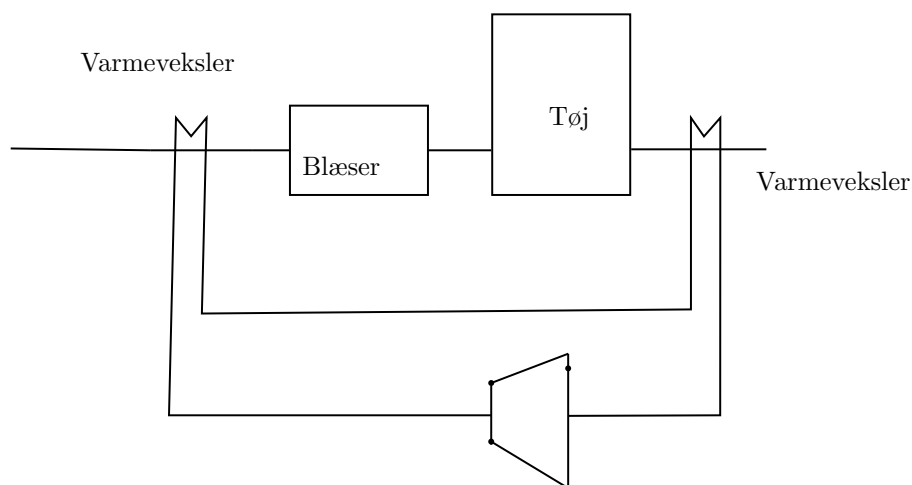
Nedenfor ses de to systemdiagrammer.



Figur 6: Logik-modellen

**Opgave 3.** Forklar hvorfor den ene bruger mindre energi end den anden.





Figur 7: Whirlpool-modellen

Logik-modellen varmer op udelukkende ved brug af resistiv opvarmning. Meget af denne varme går tabt til omgivelserne og der gøres ingen forsøg på at genindvinde varmen efter brug. Whirlpool-modellen derimod benytter en varmepumpe til at genindvinde varmen, hvorfor en stor del af varmeregningen kan spares.

Desuden er tørretiden næsten 7 gange så lang for Logik-modellen som for whirlpool. Dette kan skyldes at logik muligvis tørrer tøjet mere end whirlpool-modellen, men det kan også skyldes mere effektiv styring af tørringsprocessen i den mere moderne maskine.

**Opgave 4.** Er der potentiale for yderligere forbedringer og i givet fald hvordan?

Specielt for Logik-modellen er det nemt at hæve effektiviteten – her kunne man med fordel lade sig inspirere af Whirlpool-modellens varmepumpe.

Derudover kan man altid optimere på udformningen af eksempelvis tromlen for at sikre bedre luftgennemstrømning samt øget isolering.