

**TENTAMEN I ENERGITEKNIK OCH MILJÖ (KVM033) 2009-01-17  
08.30-12.30 för K2 och Kf2 i V-huset.**

Tentamen omfattar:

**Avdelning A:** Teori och beskrivande moment  
Inga hjälpmedel

**Avdelning B:** Problem  
Tillåtna hjälpmedel:  
Valfri kalkylator med tömt minne (kontrolleras med stickprov).  
Föreläsningsanteckningar (ä. "Handouts") i Energiteknik,  
kursmaterial i Energiteknik, Termodynamik och Transportprocesser  
(ej exempelsamlingar), handböcker.

**OBS!** Till tentamen får ej medföras lösta exempel, som inte ingår i tillåtet kursmaterial. Sådana skall, om de medförs, överlämnas till tjänstgörande tentamensvakter omedelbart efter det att du tagit del av detta papper.

När ekvationer används utan härledningar bör källa anges.

Använda symboler skall definieras om dessa inte är de samma som i kursmaterialet.

För godkänt krävs minst 15 poäng.

När ekvationer används utan härledningar bör källa anges.

Lennart Persson Elmeroth tel.Chalmers 3015, mobil 0735-720933 kommer från ca kl. 09.00 att vara tillgänglig för frågor i skrivsalen.

Lösningar finns anslagna 2009-01-19 kl 8.30 på VoM:s anslagstavla och senare på dagen på portalen. Betygslistan anslås senast 2009-02-02 på KB-institutionens anslagstavla. Granskning av rättning får ske 2009-02-05 kl 12.00-13.00 i VoM:s bibliotek

**Avdelning A måste lämnas in innan avdelning B (med hjälpmedel) får påbörjas!**

## AVDELNING A

A1. Fluidiserad bädd-pannor har fått en stor betydelse på senare år.

- Förklara principen för de två grundtyperna! (1p)
- Vilka speciella egenskaper har pannan? (2p)
- Är följande bränslen lämpliga för eldning i denna pannan? Motivera!  
*hushållsavfall, naturgas, bark, svartlut*

Om inte, ange lämplig pannan, inklusive förbränningsanordning! Motivera!  
(2p)

5p

A2 Vid förbränning av de flesta bränslen bildas ofta svaveloxider ( $\text{SO}_x$ ) och kväveoxider ( $\text{NO}_x$ ). För båda typer av utsläpp diskutera följande:

- Miljöpåverkan
- Bildningsmekanismer
- Åtgärder för att minska utsläpp (en översikt).

5 p

A3. Deplacementskompressorerna är en viktig grupp av kompressorerna

- Vad definierar deplacementskompressorn?
- Skruvkompressorn är en sådan. Visa med hjälp av enkla skisser hur den är byggd och fungerar!
- Vilka egenskaper och vilken användning har skruvkompressorn!

5p

**AVDELNING B**

B1. En ny mottrycksanläggning skall byggas för att försörja en fabrik med el och lågtrycksånga (25 ton/h ånga vid 0,4 MPa). Ångdata vid turbinens inlopp är 6,0 MPa, 440°C. Turbinens isentropiska verkningsgrad är 0,82, pannverkningsgraden är 0,88, och  $\eta_{m+g}$  är 0,96. Efter användning i fabriken, samlas kondensatet ihop vid 120°C. Pannan eldas med lågsvavlig eldningsolja 5. Referensproduktionen av el antas ske i en naturgaseldad kombicycle med följande parametrar:  $\eta_{el,PP}=0,55$ ;  $\eta_{distr}=0,92$ .

Beräkna följande:

- Bränsleflödet som tillförs pannan
- Eleffekten hos generatorm
- Anläggningens el- och totalverkningsgrader
- Specifika utsläpp av koldioxid (per kWh ånga levererad till fabriken) i samband med drift av anläggningen

(5p)

B2. Man önskar minska strålningsutbytet mellan två stora, parallella plattor genom att mitt emellan plattorna sätta in en tunn plåt av reflekterande metall som skärm. Temperaturen på den varmare plattan, som är av gjutjärn ( $\epsilon=0,21$ ), hålls konstant vid 800°C och skärmplåtens temperatur får inte överstiga 700°C. Hur hög temperatur får den kallare plattan, som är av järnplåt ( $\epsilon=0,18$ )? Skärmplåten är av aluminium ( $\epsilon=0,06$ ). Hur mycket minskar strålningsutbytet med skärmplåten insatt, jämfört med utesluten skärmplåt och oförändrad temperatur på den kallare plattan? Ändeffekter kan försummas.

(5 p)

B3. Från en naturgaseldad ugn kommer avgaser med temperaturen 350°C. Bränslebehovet är 1500 Nm<sup>3</sup>/h. Avgaserna skall kylas i en avgaspanna av eldrörstyp. Ångans tryck är 500 kPa och inkommande matarvattens temperatur 100°C. Matarvattnet blandas direkt med det kokande vattnet i ångpannan. Hur stor ångproduktion (kg/s) har avgaspannan och till vilken temperatur kyls avgaserna om den installerade värmeytan är 200m<sup>2</sup>?

Data:

- Luftfaktor 1,05
- Tubantal 1273
- Tubdiameter (invändig) 20 mm

Värmeöverföringsmotstånden i tubväggen och för kokning kan anses försumbara. Transportdata för avgaser kan approximeras med motsvarande för luft.

(5p)

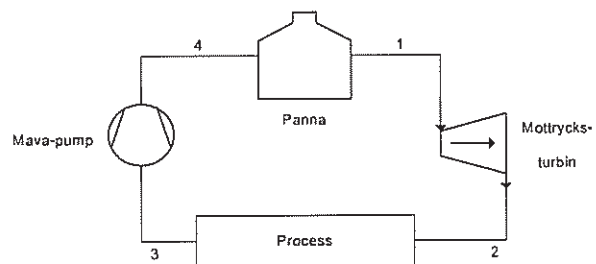
Lycka till!

- B1. En ny mottrycksanläggning skall byggas för att försörja en fabrik med el och lågtrycksånga (25 ton/h ånga vid 0,4 MPa). Ångdata vid turbinens inlopp är 6,0 MPa, 440°C. Turbinens isentropiska verkningsgrad är 0,82, pannverkningsgraden är 0,88, och  $\eta_{m+g}$  är 0,96. Efter användning i fabriken, samlas kondensatet ihop vid 120°C. Pannan eldas med lågsvavlig eldningsolja 5. Referensproduktionen av el antas ske i en naturgaseldad kombicykel med följande parametrar:  $\eta_{el,PP}=0,55$ ;  $\eta_{distr}=0,92$ . Beräkna följande:
- Bränsleflödet som tillförs pannan
  - Eleffekten hos generatoren
  - Anläggningens el- och totalverkningsgrader
  - Specifika utsläpp av koldioxid (per kWh ånga levererad till fabriken) i samband med drift av anläggningen

(5p)

**Givet:**

- $P_1 = 6.0 \text{ MPa} = 60 \text{ bar}$   
 $T_1 = 440^\circ\text{C}$   
 $P_2 = 0.4 \text{ MPa} = 4 \text{ bar}$   
 $\eta_p = 0.88$   
 $\eta_{is,turbin} = 0.82$   
 $\eta_{m+g} = 0.96$   
 $m_{\text{ånga}} = 25 \text{ ton/h}$



kondensatretur vid  $T_3 = 120^\circ\text{C}$

Beräkning av bränsleflödet till pannan

I pannan värms och förångas vattnet efter att ha passerat en matarvattenpump där trycket byggts upp till 60 bar. Pannverkningsgraden är given 88 %.

$$\dot{q}_{\text{ånga}} = \dot{m}_{\text{ånga}} \cdot (h_1 - h_4)$$

$$\dot{q}_{\text{ånga}} = \dot{q}_{\text{bränsle}} \cdot \eta_p$$

$$\dot{q}_{\text{bränsle}} = H_i \cdot \dot{m}_{\text{bränsle}}$$

$$h_1 = \{60 \text{ bar}, 440^\circ\text{C}\} = 3277 \text{ kJ/kg} \quad (\text{D\&D s. 52})$$

$$h_4 \approx h_3 \quad (\text{försummar pumparbetet i mava-pumpen})$$

$$h_3 \approx h_{\text{mättad vätska } 120^\circ\text{C}} = 503.8 \text{ kJ/kg} \quad (\text{D\&D s. 40})$$

(försummar underkyllningen, eftersom entalpin är bara svagt tryckberoende)

$$H_i = 41.0 \text{ MJ/kg} \quad (\text{D\&D s. 23})$$

$$\dot{q}_{\text{ånga}} = \frac{25 \cdot 10^3 (3277 - 503.8)}{3600} = 19.26 \text{ MW}$$

$$\dot{q}_{\text{bränsle}} = \frac{\dot{q}_{\text{ånga}}}{\eta_p} = \frac{19.26}{0.88} = 21.88 \text{ MW}$$

$$\dot{m}_{bränsle} = \frac{\dot{q}_{bränsle}}{H_f} = \frac{21.88}{41} = 0.53 \text{ kg/s}$$

Beräknar hur mycket el vi får ut i expansionen genom turbinen.

$$|P_{el}| = \eta_{m+g} \cdot \dot{m}_{anga} \cdot (h_1 - h_2) \quad (1)$$

Beräkning av entalpin  $h_2$

$$\eta_{is} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2,is}} \quad (2)$$

behöver entalpin efter isentrop expansion.

$$h_1 = \{60 \text{ bar}, 440^\circ\text{C}\} = 3277 \text{ kJ/kg} \quad (\text{D\&D s. 52})$$

$$s_1 = \{60 \text{ bar}, 440^\circ\text{C}\} = 6.685 \text{ kJ/kg} \quad (\text{D\&D s. 52})$$

$$h_{2,is} = \{s = 6.685, P = 4 \text{ bar ur Mollierdiagram alternativt med följande metod}\}$$

Ser att denna punkt kommer att befinna sig i det fuktiga området eftersom  $s' < s < s''$

Ånghalten  $x$  är då ur

$$s = x \cdot s'' + (1 - x) \cdot s' \quad (3)$$

$$h = x \cdot h'' + (1 - x) \cdot h'$$

ur (3) fås då

$$x = \frac{s - s'}{s'' - s'}$$

$$s' = (\text{D\&D s. 43}) = 1.7765$$

$$s'' = (\text{D\&D s. 43}) = 6.8965$$

vilket ger  $x = 0.959$

$$\text{och med } h' = 604.72 \text{ kJ/kg och } h'' = 2738.66 \text{ kJ/kg} \quad (\text{D\&D s. 43})$$

$$h_{2,is} = 2650.51 \text{ kJ/kg}$$

med givet  $\eta_{is} = 0.82$  och  $h_{2,is}$  insatt i (2) ger:

$$h_2 = 2763.28 \text{ kJ/kg}$$

insatt i (1) ger

$$|P_{el}| = \frac{0.96 \cdot 25 \cdot 10^3 \cdot (3277 - 2763.28)}{3600} = 3.42 \text{ MW}$$

### Beräkning av tillvaratagen värme

Kondensatet återkommer med 4 bar, 120°C.

Men enligt tidigare försummas underkyllningen.

$$h_3 = 503.8 \text{ kJ/kg}$$

$$h_2 = 2763.28 \text{ kJ/kg}$$

vilket ger tillvaratagen värme:

$$|\dot{q}_{process}| = \dot{m}_{anga} \cdot (h_2 - h_3) = \frac{25 \cdot 10^3}{3600} \cdot (2763.28 - 503.8) = 15.69 \text{ MW}$$

### Beräkning av elverkningsgrad och totalverkningsgrad

$$\eta_{el} = \frac{|P_{el}|}{\dot{q}_{bränsle}} = \frac{3.42}{21.88} = 0.16$$

$$\eta_{tot} = \frac{|P_{el}| + |\dot{q}_{process}|}{\dot{q}_{bränsle}} = \frac{3.42 + 15.69}{21.88} = 0.87$$

### Beräkning av specifika utsläpp av koldioxid

Bränsle: Lågsvavlig eldningsolja 5, EO5  $\Rightarrow$

$$c_{EO5} = 274 \text{ kg/MWh}_{bränsle}$$

$$\left. \begin{aligned} \eta_{tot} &= 0,87 \\ \alpha &= \frac{\eta_{el}}{\eta_{tot} - \eta_{el}} = \frac{0,16}{0,87 - 0,16} = 0,22 \end{aligned} \right\}$$

*Referensproduktion:*

$$\text{Bränsle: Naturgas} \quad \Rightarrow \quad c_{naturgas,pp} = 203 \text{ kg/MWh}_{bränsle}$$

$$\eta_{el,pp} = 0,55 \quad \eta_{distr} = 0,92$$

$$c_{CHP} = c_{EO5} \frac{1 + \alpha}{\eta_{tot}} - \alpha \frac{c_{naturgas,pp}}{\eta_{distr} \cdot \eta_{el,pp}} = 274 \frac{1 + 0,22}{0,87} - 0,22 \frac{203}{0,92 \cdot 0,55} = 294.59 \text{ kg/MWh}_{anga} = 0.29 \text{ kg/kWh}_{anga}$$

Svar:

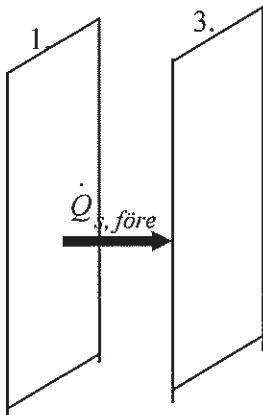
- Bränsleflödet till pannan är 0.53 kg/s
- Eleffekten hos generatoren är 3.42 MW
- Anläggningens el- och totalverkningsgrader är 0.16 resp. 0.87
- De specifika utsläppen av koldioxid är 0.29 kg/kWh<sub>anga</sub>

B2. Man önskar minska strålningsutbytet mellan två stora, parallella plattor genom att mitt emellan plattorna sätta in en tunn plåt av reflekterande metall som skärm. Temperaturen på den varmare plattan, som är av gjutjärn ( $\epsilon=0,21$ ), hålls konstant vid  $800^\circ\text{C}$  och skärmplåtens temperatur får inte överstiga  $700^\circ\text{C}$ . Hur hög temperatur får den kallare plattan, som är av järnplåt ( $\epsilon=0,18$ )? Skärmplåten är av aluminium ( $\epsilon=0,06$ ). Hur mycket minskar strålningsutbytet med skärmplåten insatt jämfört med utesluten skärmplåt och oförändrad temperatur på den kallare plattan? Ändeffekter kan försummas.

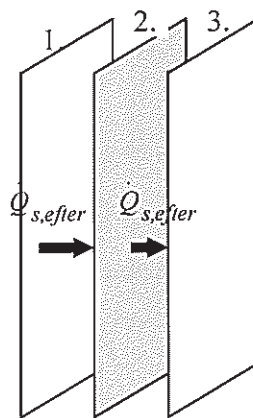
(5 p)

### Lösning:

Före



Efter



#### GIVET:

$$t_1 = 800^\circ\text{C}$$

$$t_{2,\text{max}} = 700^\circ\text{C}$$

$$\epsilon_1 = 0,21 \text{ gjutjärn}$$

$$\epsilon_2 = 0,06 \text{ skärmplåt}$$

$$\epsilon_3 = 0,18 \text{ järnplåt}$$

Försumma ändeffekter

Antag  $t_{\text{plattor}} = \text{konstant}$

$$\text{SÖKT: } t_3 \text{ och } \left[ \frac{q_{s,\text{före}} - q_{s,\text{efter}}}{q_{s,\text{före}}} \right] \cdot 100\%$$

#### Lösning med ekvationssystem:

Efter (med skärmplåt):

$$q_{s,\text{efter}} = q_{1-2} = A_1 \cdot F_{12}(J_1 - J_2)$$

Ställer upp ekvationssystemet:

Vet att de 2 ytorna har given temperatur och då gäller ekv. 23-38

$$J_i \left( 1 - F_{ii} + \frac{\varepsilon_i}{\rho_i} \right) - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n F_{ij} \cdot J_j = \frac{\varepsilon_i}{\rho_i} \cdot E_{bi}$$

På matrisform:

$$\begin{bmatrix} 1 - F_{11} + \frac{\varepsilon_1}{\rho_1} & -F_{12} \\ -F_{21} & 1 - F_{22} + \frac{\varepsilon_2}{\rho_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\varepsilon_1}{\rho_1} \cdot E_{b1} \\ \frac{\varepsilon_2}{\rho_2} \cdot E_{b2} \end{bmatrix}$$

$$\rho = 1 - \varepsilon$$

$$E_{bi} = \sigma \cdot T_i^4 \quad \text{WWW ekv 23-12 där } \sigma = 5.676 \cdot 10^{-8}$$

**Måste bestämma siktfaktorerna**

$$\text{Plattorna ser endast varandra} \Rightarrow F_{12} = F_{21} = 1$$

$$\text{Plattorna ser inte sig själv} \Rightarrow F_{11} = F_{22} = 0$$

Löser ut [J]:

$$[J] = [A]^{-1}[B]$$

$$\begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 70780 \\ 69587 \end{bmatrix}$$

$$Q_{s,\text{efter}} = q_{1-2} = A_1 \cdot F_{12} \cdot (J_1 - J_2) = A_1 \cdot 1 \cdot (70780 - 69587) = 1193 \cdot A_1$$

*Beräkning av  $t_3$*

$$Q_{s,\text{efter}} = q_{1-2} = A_1 \cdot F_{12} \cdot (J_1 - J_2) = q_{2-3} = A_2 \cdot F_{23} \cdot (J_2 - J_3)$$

Ställer upp ekvationssystemet:

Använd ekv. 23-38

$$J_i \left( 1 - F_{ii} + \frac{\varepsilon_i}{\rho_i} \right) - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n F_{ij} \cdot J_j = \frac{\varepsilon_i}{\rho_i} \cdot E_{bi}$$

På matrisform:

$$\begin{bmatrix} 1 - F_{22} + \frac{\varepsilon_2}{\rho_2} & -F_{23} \\ -F_{32} & 1 - F_{33} + \frac{\varepsilon_3}{\rho_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_2 \\ J_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\varepsilon_2}{\rho_2} \cdot E_{b2} \\ \frac{\varepsilon_3}{\rho_3} \cdot E_{b3} \end{bmatrix}$$



$$\rho = 1 - \varepsilon$$

$$E_{bi} = \sigma \cdot T_i^4 \quad \text{WWW ekv 23-12 där } \sigma = 5.676 \cdot 10^{-8}$$

### Måste bestämma siktfaktorerna

$$\text{Plattorna ser endast varandra} \Rightarrow F_{23} = F_{32} = 1$$

$$\text{Plattorna ser inte sig själv} \Rightarrow F_{22} = F_{33} = 0$$

$$\begin{bmatrix} 1 + \frac{0.06}{0.94} & -1 \\ -1 & 1 + \frac{0.18}{0.82} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_2 \\ J_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{0.06}{0.94} \cdot \sigma \cdot (700 + 273.15)^4 \\ \frac{0.18}{0.82} \cdot \sigma \cdot T_3^4 \end{bmatrix}$$

Pss som vid beräkningen av J-faktorerna före

$$\begin{bmatrix} J_2 \\ J_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4.1012 & 3.3630 \\ 3.3630 & 3.5777 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 3249 \\ 1.2457 \cdot 10^{-8} \cdot T_3^4 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} J_2 \\ J_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 13324 + 4.1894 \cdot 10^{-8} \cdot T_3^4 \\ 10925 + 4.4568 \cdot 10^{-8} \cdot T_3^4 \end{bmatrix}$$

$$(J_2 - J_3) = 2398 - 2.6741 \cdot 10^{-9} \cdot T_3^4$$

Eftersom  $A_1 = A_2$  och  $F_{12} = F_{23}$  så är

$$(J_2 - J_3) = (J_1 - J_2) = 70780 - 69587$$

$$\Rightarrow T_3 = 819.4 \text{ K} \Rightarrow t_3 = 546.2^\circ\text{C}$$

**SVAR:** Den kallare järnplåtspattan är  $546^\circ\text{C}$ .

*Före (utan skärmplåt)*

$$q_{s, \text{före}} = q_{1-3} = A_1 \cdot F_{13} (J_1 - J_3)$$

Ställer upp ekvationssystemet:

Vet de 2 ytornas temperatur så alltså ekv. 23-38

$$J_i \left( 1 - F_{ii} + \frac{\varepsilon_i}{\rho_i} \right) - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n F_{ij} \cdot J_j = \frac{\varepsilon_i}{\rho_i} \cdot E_{bi}$$

$$\begin{bmatrix} 1 - F_{11} + \frac{\varepsilon_1}{\rho_1} & -F_{13} \\ -F_{31} & 1 - F_{33} + \frac{\varepsilon_3}{\rho_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_1 \\ J_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\varepsilon_1}{\rho_1} \cdot E_{b1} \\ \frac{\varepsilon_3}{\rho_3} \cdot E_{b3} \end{bmatrix}$$

$$\rho = 1 - \varepsilon$$

$$E_{bi} = \sigma \cdot T_i^4 \quad \text{WWW ekv 23-12 där } \sigma = 5.676 \cdot 10^{-8}$$

### Måste bestämma siktfaktorerna

$$\text{Plattorna ser endast varandra} \Rightarrow F_{13} = F_{31} = 1$$

$$\text{Plattorna ser inte sig själv} \Rightarrow F_{11} = F_{33} = 0$$

Löser ut [J]:

$$[J] = [A]^{-1}[B]$$

$$\begin{bmatrix} J_1 \\ J_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 55205 \\ 49873 \end{bmatrix}$$

$$q_{s,\text{före}} = q_{1-3} = A_1 \cdot F_{13}(J_1 - J_3) = A_1 \cdot 1 \cdot (55205 - 49873) = 5332 \cdot A_1$$

$$\left[ \frac{q_{s,\text{före}} - q_{s,\text{efter}}}{q_{s,\text{före}}} \right] \cdot 100\% = \frac{5332 \cdot A_1 - 1193 \cdot A_1}{5332 \cdot A_1} \cdot 100 = 77,6\%$$

**SVAR:** Insättning av skärmplåten minskar strålningsutbytet med 78%.

B3. Från en naturgaseldad ugn kommer avgaser med temperaturen 350 °C. Bränslebehovet är 1500 Nm<sup>3</sup>/h. Avgaserna skall kylas i en avgaspanna av eldrörstyp. Ångans tryck är 500 kPa och inkommande mattarvattens temperatur 100 °C. Mattarvattnet blandas direkt med det kokande vattnet i ångpannan. Hur stor ångproduktion (kg/s) har avgaspannan och till vilken temperatur kyls avgaserna om den installerade värmeytan är 200 m<sup>2</sup>?

Data:

Luftfaktor:  $m = 1,05$

Tubantal:  $n = 1273$

Tubdiameter (invändig):  $d_i = 20 \text{ mm}$

Värmeöverföringsmotstånden i tubväggen och för kokning kan anses försumbara. Transportdata för avgaser kan approximeras med motsvarande data för luft.

(5p)

### Lösning:

För att kunna beräkna värmeöverföringen i avgaspannan måste man först känna till avgasflödet. Naturgasen kan approximeras som metan och avgasflödet kan beräknas enligt:

$$g_v = g_0 + (m - 1)l_0 \quad (\text{D\&D s.21})$$

$$g_0 = 10,54 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3} \text{ och } l_0 = 9,54 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3} \quad (\text{D \& D s.26})$$

(med antagandet att luften som tillförs innehåller en försumbar andel fukt =>  $l_0 = l_{0t}$ )

Det ger ett specifikt avgasflöde

$$g_v = 10,54 + (1,05 - 1)9,54 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3} = 11,017 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3}$$

Det totala avgasflödet är då:

$$\dot{V}_{\text{avgas}} = \dot{V}_{\text{bränsle}} \cdot g_v = 1500 \cdot 11,017 \frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} = 16525,5 \frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} = 4,59 \frac{\text{Nm}^3}{\text{s}}$$

Per tub blir då flödet:

$$\dot{V}_{\text{avgas,tub}} = 4,59 \frac{\text{Nm}^3}{\text{s}} \cdot \frac{1}{1273 \text{ tub}} = 0,0036 \frac{\text{Nm}^3}{\text{s tub}}$$

Massflödet per tub blir (med hjälp av normdensiteten för luft (0°C, 1 bar, D&D s.77)):

$$\dot{m}_{\text{avgas,tub}} = 0,0036 \frac{\text{Nm}^3}{\text{s tub}} \cdot 1,276 \frac{\text{kg}}{\text{Nm}^3} = 0,0046 \frac{\text{kg}}{\text{s tub}}$$

Det totala massflödet blir:

$$\dot{m}_{\text{avgas}} = 0,0046 \frac{\text{kg}}{\text{s tub}} \cdot 1273 = 5,857 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Nu kan man börja med beräkningar för värmeöverföring. Tankegången är följande:

1. Man gissar en uttemperatur för avgaserna.
2. Det ger en medeltemperatur för avgaserna som ger alla fysikaliska ämnesdata för att kunna beräkna överföringskoefficienten  $h_i$  på insidan.
3. Eftersom de andra överföringsmotstånden är försumbara är värmeöverföringskoefficienten  $U$  lika med  $h_i$ .
4. Man kan då beräkna överförd effekt med hjälp av  $Q_1 = U A \Delta T_m$ .
5. Den effekten nu kan jämföras med vad balansen på avgassidan ger
$$Q_2 = \dot{m} c_p (T_{in} - T_{ut})$$
6. Är både effekterna samma så är den gissade uttemperaturen rätt, annars måste man ta en ny gissning, som man kan uppskatta från den första gissningen och medelvärdet av de båda Q-värdena:

$$T_{ut,ny} = 0,5 \cdot \left( T_{ut,gissad} + \left( T_{in} - \frac{Q_{medel}}{\dot{m} c_p} \right) \right)$$

Det sättet att beräkna en ny temperaturgissning leder till konvergens, men det finns visst andra möjligheter att få fram en ny temperaturgissning.

För att få en rimligt gissning kan man först titta på temperaturnivåerna på båda sidorna. På avgassidan kyls gaserna från 350°C till just den temperaturen vi vill gissa. På vattensidan är temperaturen konstant och lika med mättnadstemperaturen vid det angivna trycket (5 bar). Enligt D&D (s.43) är då temperaturen på vattensidan lika med 151,85 °C. Gastemperaturen måste då i alla fall vara högre än den temperaturen. Vi börja då med en ganska konservativt gissning (som skulle innebära en minsta temperaturskillnad av cirka 50 °C):

$$T_{ut} = 200 \text{ °C}$$

Medeltemperaturen för avgaserna blir då

$$T_m = \frac{350 + 200}{2} \text{ °C} = 275 \text{ °C}$$

Ämnesdata för den temperaturen kan interpoleras från D&D s.77:

$$\rho = 0,64 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$v = 4,51 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$Pr = 0,69$$

$$\lambda = 0,0437 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

$$c_p = 1040,5 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$$

Hastigheten i tuberna beräknas genom

$$v = \frac{\dot{V}}{A_{tv}} = \frac{\dot{m}/\rho}{\frac{\pi}{4} d_i^2} = \frac{0,0046/0,64 \text{ m}}{\frac{\pi}{4} 0,02^2} = 22,88 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Reynoldstalet blir

$$Re = \frac{v d_i}{\nu} = \frac{22,88 \cdot 0,02}{4,51 \cdot 10^{-5}} = 10146$$

Det är alltså turbulent strömning och ekv. (20-26) ur WWW kan användas:

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,3} = 0,023 \cdot 10146^{0,8} \cdot 0,69^{0,3} = 32,99$$

Värmeöverföringskoefficient på insidan,  $h_i$  blir då

$$Nu = \frac{h_i d_i}{\lambda} \Rightarrow h_i = \frac{Nu \lambda}{d_i} = \frac{32,99 \cdot 0,0437}{0,02} = 72,09 \frac{W}{m^2 K} = U$$

Eftersom de andra värmeöverföringsmotstånden är försumbara är  $h_i$  lika med  $U$ . För att kunna räkna ut den överförda effekten måste man nu känna till den logaritmiska medeltemperaturskillnaden  $\Delta T_{ln}$ . På avgassidan är båda temperaturer kända, och på vattensidan (kokning) är temperaturen konstant och lika med mättnadstemperaturen för angivet ångtryck.

$$T_{sat}(5 \text{ bar}) = 151,85^\circ\text{C}$$

Den logaritmiska medeltemperaturskillnaden beräknas då till

$$\Delta T_{ln} = \frac{(T_{avgas,in} - T_{sat}) - (T_{avgas,ut} - T_{sat})}{\ln\left(\frac{T_{avgas,in} - T_{sat}}{T_{avgas,ut} - T_{sat}}\right)} = \frac{(350 - 151,85) - (200 - 151,85)}{\ln\left(\frac{350 - 151,85}{200 - 151,85}\right)} \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_{ln} = 106,05^\circ\text{C}$$

Då kan man beräkna effekten:

$$Q_1 = U \cdot A \cdot \Delta T_{ln} = 72,09 \cdot 200 \cdot 106,05 \text{ W} = 1529,03 \text{ kW}$$

Gör man balansen på avgassidan för att kolla effekten, så får man:

$$Q_2 = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{avgas,in} - T_{avgas,ut}) = 5,857 \cdot 1040,5 \cdot (350 - 200) \text{ W} = 914,13 \text{ kW}$$

Man ser då att värden skiljer sig förfarande rätt mycket. Gissningen var alltså fel (för högt i det fallet). Man kan beräkna en ny gissningstemperatur med hjälp av ett medelvärde av effekterna

$$T_{avgas,ut,ny} = 0,5 \cdot \left( 200^\circ\text{C} + \left( 350^\circ\text{C} - \frac{1221,58 \cdot 1000}{5,857 \cdot 1040,5} \text{ } ^\circ\text{C} \right) \right) = 174,78^\circ\text{C}$$

Gör man om beräkningar med den temperaturen så får man följande värden som visas i tabellen (som fysikaliska ämnesdata kan man använda samma som förut, eftersom den ändras inte så mycket). Vid fjärde iterationen syns ingen stor skillnad längre (se tabell).

	Iteration 2	Iteration 3	Iteration 4
$T_{ut,giss}$ [°C]	174,78	170,86	170,79
$v$ [m/s]	22,32	22,24	22,24
$Re$	10281	10305	10305
$Nu$	33,34	33,41	33,41
$h_i$ [W/m <sup>2</sup> K]	71,43	71,34	71,33
$\Delta T_m$ [°C]	81,27	76,44	76,36
$Q_1$ [kW]	1160,96	1090,64	1089,40
$Q_2$ [kW]	1065,57	1089,03	1089,42

Uttemperaturen av avgaserna är då 170,8 °C och överförd effekt är 1089,4 kW. Den effekten används för att värma matarvattnet från 100 °C till mättad ånga vid 5 bar. Mängden ånga som produceras kan då beräknas enligt (data från ångtabeller i D&D):

$$\dot{m}_{\text{ånga}} = \frac{Q}{h''(5 \text{ bar}) - h(100^\circ\text{C}, 5 \text{ bar})}$$

$$h(100^\circ\text{C}, 5 \text{ bar}) = h'(100^\circ\text{C}) + v(5 \text{ bar} - P_{\text{sat}}(100^\circ\text{C}))$$

$$= 419,11 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 0,0010435 \cdot (5 - 1,01325) \cdot 100 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 419,526 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\dot{m}_{\text{ånga}} = \frac{1089,4}{2748,79 - 419,526} \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 0,4677 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 1683,7 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

**Svar:** Den producerade ångmängd är alltså 1683,7 kg/h (0,4677 kg/s) och avgasernas uttemperatur 170,8 °C.