

## **TENTAMEN I ENERGITEKNIK OCH MILJÖ (KVM033) 2011-05-23 8.30-12.30 i M-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 och miljö, Termodynamik och  
Transportprocesser (ej exempelsamlingar), handböcker.

**OBS!** Till tentamen får ej medföras lösta exempel eller lösningsgång (sekvens av information i syfte att kunna klara ett räknetal), 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. För betyg 4 krävs minst 20 poäng och för betyg 5 minst 25 poäng.

Lennart Vamling (ankn. 3021) kommer ca kl. 9.00 att vara tillgänglig för frågor i skrivsalen. Ytterligare en gång ca kl 11.00

Lösningar anslås 2011-05-24 på VoM:s anslagstavla. Tentamensresultatet meddelas senast 2011-06-10. Granskning av rättning får ske 2011-06-13 kl 12.30-13.00 samt 2011-08-16 kl 12.30-13.00 i VoM:s bibliotek

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

**AVDELNING A**

A1.

Bränslebaserad energiproduktion leder ofta till oönskade emissioner av  $\text{SO}_x$ ,  $\text{NO}_x$  och  $\text{CO}_2$ . Beskriv för var och en av dessa emissionstyper en teknik/metod som är lämplig att addera till en redan befintlig energiproduktionsanläggning för att reducera emissionerna. Beskrivningarna skall innehålla

- i. Principiellt funktionssätt
- ii. Ungefärlig reningsgrad
- iii. Huvudsakliga restprodukter (om sådana finns) och deras hantering
- iv. En fördel jämfört med alternativ teknik (om sådan finns)

6 p

A2.

- a) Beskriv fördelar (ekologiska och ekonomiska) med att återföra bio-aska till skogen. Ange också minst två faktorer som är viktiga att ta hänsyn till i valet av sätt att behandla askan innan den återförs. (3 p)
- b) Idag läggs oftast aska på deponi. Nämn minst 3 alternativ till att göra det, förutom det ovan nämnda. (1 p)

4 p

A3.

Turbokompressorer indelas i två grupper, displacement- och turbokompressorer.

- a) Nämn minst 3 fördelar hos vardera gruppen i förhållande till den andra gruppen.
- b) Reaktionsgrad är ett viktigt begrepp hos turbokompressorer. Definiera begreppet i ord! Begreppet kan också definieras matematiskt med hjälp av rörelseenergiändringar över skovelhjulet. Visa hur!
- c) Radiella kompressorer har i princip alltid reaktion över skovelhjulet. Varför?

5p

## AVDELNING B

B1.

En industriell mottrycksanläggning producerar 3,5 MW el och levererar samtidigt 15,0 MW värme till fabriken. Anläggningens kombinerade mekaniska och generatorverkningsgrad är 0,95. Anläggningen eldas med ved av fukthalten 40%. CO<sub>2</sub>-halten ställs in på 14%. Avgastemperaturen är 160°C och förbränningsluftens temperatur 25°C. Pumparbetet kan försummas.

Beräkna följande:

- Pannans avgasmängd (i Nm<sup>3</sup>/s)
- Specifika utsläpp ("globalt") av koldioxid (per kWh ånga levererad till fabriken) i samband med drift av anläggningen. Antag att anläggningens elproduktion ersätter inköpt el som skulle producerats i ett kolkondenskraftverk med elverkningsgraden 42 % och att distributionsförlusterna är 7 %.

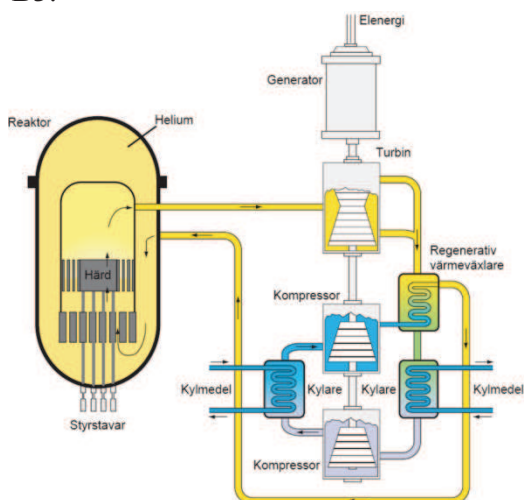
5p

B2.

I centrum av ett rör befinner sig en cylinder som värms med el. Cylindern är lika lång som röret och den avger 100W/m. Mellan cylindern och röret råder i det närmaste vacuum. Röret har innerradien 25 mm och cylindern har radien 10 mm. Rörväggen håller temperaturen 300 K och har emissiviteten 0,8. Cylinderns yta har emissiviteten 0,6. Beräkna cylinderväggens temperatur. Röret och cylindern är så långa att ändeffekter kan försummas.

5p

B3.



I fjärde generationens kärnreaktorer så är ett alternativ att använda helium som värmeöverförande medium från reaktorhärden och tillverka el mha. gasturbin, se figur. För att få hög verkningsgrad är det bland annat viktigt att den regenerativa värmeväxlaren är effektiv. Den här uppgiften går ut på att undersöka hur stor värmeväxlare som behövs för en pilotanläggning, om man använder en tubvärmväxlare för uppgiften. Eftersom trycket på flödet från kompressorn är högst, så låter vi det flödet gå på tubsidan.

Givna data:

Tubradie	Inner 13 mm, ytter 14 mm
Antal tuber	1200
Max antal tuber i bredd	40
Antal tubrader	40
Tubkonfiguration	Sick-sack
Tubcenteravstånd	1,33·tubdiameter
Baffelavstånd	4,5 m
Massflöde	55 kg/s
Överförd effekt	125 MW
Inloppstemperatur	386 K (tubsidan); 846 K (skalsidan)
Tryck	7,0 MPa (tubsidan); 2,71 MPa (skalsidan)

För helium i aktuellt temperaturområde (medelvärden – får antas konstanta):

C <sub>p</sub>	5,19 kJ/(kg K)
Term. konduktivitet	0,26 W/(m K)
Dyn. viskositet	33·10 <sup>-6</sup> Pa·s
Densitet	5,5 kg/m <sup>3</sup> (tubsidan); 2,1 kg/m <sup>3</sup> (skalsidan)

Beräkna med hjälp av dessa uppgifter

a) erforderlig tublängd om tubpannan konstrueras som enpass.

Värmeöverföringsmotståndet i tubväggen kan försummas.

b) tryckfall (kontrollera att det ligger inom det max tillåtna som är 80 kPa för vardera sidan). Rörets relativa skrovlighet ( $e/D$ ) uppskattas till 0,002.

5p

**Lycka till!**

## Lösningförslag till uppgift B1

Givet:

$$\begin{aligned} P_{el} &= 3.5 \text{ MW} & Q_{process} &= 15.0 \text{ MW} \\ \eta_{m+g} &= 0.95 & \text{Bränsle: ved} & \text{ fukthalt } 40\% \\ [CO_2]_t &= 0.14 & T_{avgas} &= 160 \text{ }^\circ\text{C} \\ T_{luft} &= 25 \text{ }^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Referensproduktion:

$$\text{Kolkondenskraft} \quad \eta_{el} = 0.42 \quad \eta_{distr} = 0.93 \text{ (7\% förluster)}$$

Sökt:

- Pannans avgasmängd  $\dot{V}_{avgas}$  (i Nm<sup>3</sup>/s)
- $c_{CO_2}$  per kWh värme levererad

Deluppgift a)

För att kunna beräkna avgasmängden måste man veta mängden bränsle som tillförs och hur mycket avgaser som bildas per mängd bränsle.

En energibalans över hela anläggningen ger energin som måste tillföras i pannan:

$$Q_{panna} = Q_{process} + \frac{P_{el}}{\eta_{m+g}} = 15 + \frac{3.5}{0.95} = 18.68 \text{ MW}$$

Den energin man får per mängd bränsle ( $q$ ) kan man beräkna genom en värmebalans för förbränning ("Teknisk förbränningslära" ekv. (7))

$$H_i + l_v (h_{l,T_{luft}} - h_{l,25^\circ\text{C}}) = q + g_v (h_{g,T_{avgas}} - h_{g,25^\circ\text{C}})$$

Det effektiva värmevärdet för bränslet kan beräknas enligt formeln i D&D s.20

$$H_i = (1 - A - F)H_{ib} - 2,5F$$

$A$ : askhalt (försumbart för ved =>  $A=0$ )

$F$ : fukthalt 40% =>  $F=0.4$

$H_{ib}$ : värmevärdet för torr ved =>  $H_{ib} = 18.73 \text{ MJ/kg}$  (D&D s.25 tabell)

$$H_i = (1 - 0 - 0.4)18.73 - 2,5 \cdot 0.4 = 10.24 \text{ MJ/kg}$$

Den verkliga mängden luft och avgaser ( $l_v$  och  $g_v$ ) beräknas enligt (D&D s.21)

$$\begin{aligned} l_v &= m \cdot l_0 \\ g_v &= g_0 + (m - 1) \cdot l_0 \end{aligned}$$

Luftfaktorn  $m$  är en funktion av CO<sub>2</sub>-halten i avgaserna (D&D s.21)

$$m = 1.0 + \frac{g_{ot}}{l_{ot}} \left[ \frac{(CO_2)_{ot}}{(CO_2)_t} - 1 \right] \approx \frac{(CO_2)_{ot}}{(CO_2)_t}$$

För ved är den teoretiska CO<sub>2</sub>-halten i de torra avgaserna  $(CO_2)_{ot} = 20.4\%$  (D&D s.25 tabell) och luftfaktor blir då

$$m = \frac{0.204}{0.14} = 1.46$$

$l_o (= l_{ot})$  och  $g_o$  fås ur figuren i D&D s.26.

$$l_o = 2,9 \text{ Nm}^3/\text{kg bränsle} \qquad g_o = 3.85 \text{ Nm}^3/\text{kg bränsle}$$

$$\Rightarrow \quad l_v = 4.23 \text{ Nm}^3/\text{kg bränsle} \qquad g_v = 5.18 \text{ Nm}^3/\text{kg bränsle}$$

Avgasernas entalpi läses av ur figur 4 i "Teknisk förbränningslära" (s.19)

$$h_g(160^\circ\text{C}) = 220 \text{ kJ/Nm}^3$$

$$h_g(25^\circ\text{C}) = 35 \text{ kJ/Nm}^3$$

Luftens entalpi i värmebalansen är lika med noll eftersom luften tillförs vid referens-temperaturen (25°C) och termen försvinner. Nyttig energi per kg bränsle  $q$  blir då

$$q = H_i - g_v(h_g - h_{g,25^\circ\text{C}}) = 10.24 \cdot 10^3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg bränsle}} - 5.18 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg bränsle}} (220 - 35) \frac{\text{kJ}}{\text{Nm}^3}$$

$$= 9280.5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg bränsle}} = 9.28 \frac{\text{MJ}}{\text{kg bränsle}}$$

Det ger den tillsätta mängden bränsle:

$$\dot{m}_{\text{bränsle}} = \frac{Q_{\text{panna}}}{q} = \frac{18.68 \text{ MW}}{9.28 \text{ MJ/kg}} = 2.01 \text{ kg/s}$$

Avgasmängden från pannan blir därmed

$$\dot{V}_{\text{avgas}} = g_v \cdot \dot{m}_{\text{bränsle}} = 5.18 \cdot 2.01 \frac{\text{Nm}^3}{\text{s}} = 10.4 \frac{\text{Nm}^3}{\text{s}}$$

### Deluppgift b)

De specifika utsläppen för anläggningen (en kraftvärmeanläggning eftersom den producerar både el och värme) kan uttryckas enligt kompendiet

$$c_{\text{CHP}} = c_{\text{fuel,CHP}} \cdot \frac{1 + \alpha_{\text{CHP}}}{\eta_{\text{tot}}} - \alpha_{\text{CHP}} \cdot \frac{c_{\text{fuel,PP}}}{\eta_{\text{el,PP}} \cdot \eta_{\text{distr}}}$$

Anläggningens verkningsgrader kan räknas ut utifrån beräkningarna i deluppgift a) och givna data

$$\eta_q = \frac{Q_{process}}{Q_{tillförd}} = \frac{15}{20.61} = 0.728 \quad \eta_{el} = \frac{P_{el}}{Q_{tillförd}} = \frac{3.5}{20.61} = 0.170$$

$$\eta_{tot} = \eta_q + \eta_{el} = 0.898 \quad \alpha = \frac{\eta_{el}}{\eta_q} = 0.233$$

$$Q_{tillförd} = \dot{m}_{bränsle} \cdot H_i = 20.61 \text{ MW}$$

Med hjälp av de specifika utsläpp för respektive bränsle (tabell 1 i kompendiet "CO<sub>2</sub> Emissions from Industrial Energy Systems") kan man då beräkna  $c_{CHP}$ .

$$c_{kol} = 327 \text{ kg/MWh}_{bränsle}$$

$$c_{ved} = 0 \text{ kg/MWh}_{bränsle}$$

$$c_{CHP} = 0 \cdot \frac{1 + 0.233}{0.990} - 0.233 \cdot \frac{327}{0.42 \cdot 0.93} \frac{\text{kg } CO_2}{\text{MWh}_{värme}} = -195.3 \frac{\text{kg } CO_2}{\text{MWh}_{värme}} =$$

$$= -195.3 \frac{\text{g } CO_2}{\text{kWh}_{värme}}$$

Räknar man med CO<sub>2</sub>-utsläpp från veden ( $c_{ved} = 346 \text{ kg/MWh}_{bränsle}$ ) så blir de specifika utsläppen  $c_{CHP} = 280.1 \text{ g/kWh}_{värme}$ .

## Lösningförslag till Energiteknik och miljö 2011-05-23

### Uppgift B2

Låt cylindern vara yta 1 och rörväggen yta 2

Givet:

$$\varepsilon_1 := 0.4 \quad \text{vilket ger} \quad \rho_1 := 1 - \varepsilon_1 = 0.4$$

$$\varepsilon_2 := 0.8 \quad \rho_2 := 1 - \varepsilon_2 = 0.2$$

$$T_2 := 300 \text{ K}$$

$$R_1 := 10 \text{ mm} \quad R_2 := 25 \text{ mm}$$

Längden på röret är inte känd, så vi räknar per m rör (genom att låta längden vara 1 m)

$$L := 1 \text{ m}$$

$$\text{Det ger} \quad q_1 := 100 \frac{\text{W}}{\text{m}} \cdot L \quad A_1 := 2 \cdot \pi \cdot R_1 \cdot L = 0.063 \text{ m}^2$$

$$A_2 := 2 \cdot \pi \cdot R_2 \cdot L = 0.157 \text{ m}^2$$

Siktfaktorer:

Yta 1 ser inte sig själv, medan yta 2 ser både 1 och sig själv.

$$F_{11} := 0 \quad F_{12} := 1 \quad \text{Reciprocitet ger} \quad F_{21} := \frac{A_1}{A_2} \cdot F_{12} = 0.4$$

$$F_{22} := 1 - F_{21} = 0.6 \quad \text{eftersom andra ytor är försumbara ("Inga ändeffekter")}$$

$$\text{Bolzmans konstant är} \quad \sigma := 5.67610^{-8} \cdot \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}$$

$$E_{b2} := \sigma \cdot T_2^4 = 459.756 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Vi har nu situationen att vi känner ett värmeflödet för yta 1 och temperaturen för yta 2. För att bestämma J väljer vi därför ekv 23-37 för  $i=1$  och 23-38 för  $i=2$ . Det resulterar i

$$A := \begin{pmatrix} 1 - F_{11} & -F_{12} \\ -F_{21} & 1 - F_{22} + \frac{\varepsilon_2}{\rho_2} \end{pmatrix} \quad B := \begin{pmatrix} \frac{q_1}{A_1} \\ \frac{\varepsilon_2}{\rho_2} \cdot E_{b2} \end{pmatrix}$$

$$A = \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ -0.4 & 4.4 \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} 1.592 \\ 1.839 \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \quad J := A^{-1} \cdot B = \begin{pmatrix} 2.21 \\ 0.619 \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

$$E_{b1} := \frac{\rho_1 \cdot q_1}{\varepsilon_1 \cdot A_1} + J_1 = 3.271 \times 10^3 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \quad J_1 = 2.21 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{s}^3}$$

$$T_1 := \sqrt[4]{\frac{E_{b1}}{\sigma}} \quad T_1 = 489.97 \text{ K}$$



Alternativ lösning:

Eftersom vi bara har två ytor, så måste  $q_2 := -q_1$

(detta kan också fås fram mha av t.ex. 23.35)

$$J_2 := \epsilon b_2 - \frac{\rho_2 \cdot q_2}{A_2 \cdot \epsilon_2} = 618.911 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \quad \text{Enligt ekv 23-36 för } i=2$$

$$J_1 := \frac{q_1}{A_1} + J_2 = 2.21 \times 10^3 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \quad \text{Enligt 23-35 för } i=1$$

Sedan fortsättes som ovan.

**Svar: Temperaturen på cylinderns yta blir ca 490 K**

### Uppgift B3

Från figuren framgår att vi har samma flöde av Helium på båda sidorna av värmexlaren.

Vi låter här i lösningen tubsidan betecknas med HP (för High Pressure) och skalsidan med LP

Givet:

$$T_{HPin} := 386\text{K}$$

$$T_{LPin} := 846\text{K} = 846\text{K}$$

$$P_{HPin} := 7\cdot\text{MPa}$$

$$P_{LPin} := 2.71\cdot\text{MPa}$$

$$T_{HPut} := (550 + 273)\cdot\text{K}$$

$$T_{LPut} := (136 + 273)\cdot\text{K}$$

$$\rho_{HPm} := 5.5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho_{LPm} := 2.1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\lambda_{He} := 0.26 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$$

$$\mu_{He} := 33 \cdot 10^{-6} \cdot \text{Pa}\cdot\text{s}$$

$$C_{pHe} := 5.19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$$

$$Pr_{He} := \frac{C_{pHe} \cdot \mu_{He}}{\lambda_{He}} = 0.659$$

$$q := 125\text{MW}$$

$$\dot{m}_{He} := 55 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$r_i := 13\text{mm}$$

$$r_y := 14\text{mm}$$

$$L_{bc} := 4.5\text{m}$$

$$M_{max} := 40 \quad n_{tub} := 120 \quad N := 40$$

Vi har att  $q = UA\Delta T_{log}$ . För att kunna få fram sökt tublängd, så behöver vi först få fram arean A. För det så behöver vi U och för att få fram U så behöver vi värmeöverföringstalen på båda sidorna.

Vi börjar med *skalsidan*. Vi har här strömning tvärs tubknippen - och det fallet behandlas i kompendiet kapitel 2, avsnittet "tryckfall och värmeöverföring i värmexlare". Reynolds tal  $Re$  definieras i ekv (3), och för att få fram  $Re$  så behövs tvärsnittsarean för strömningen  $A_q$  enligt ekvation 4.

$$D_t := 2 \cdot r_y$$

$$L_{tp} := 1.33 D_t = 37.24\text{mm}$$

Faktorn 1.33 är given i texten

$$A_{qLP} := (M_{max} + 1) \cdot L_{bc} \cdot (L_{tp} - 2 \cdot r_y) = 1.705\text{m}^2$$

$$Re_{LP} := \frac{\dot{m}_{He} \cdot D_t}{A_{qLP} \cdot \mu_{He}} = 2.737 \times 10^4$$

$$\frac{L_{tp}}{D_t} = 1.33$$

med dessa båda parametrar, så avläses j-faktor och friktionsfaktor f i figur 5

$$j_{LP} := 0.006 \quad f_{LP} := 0.09$$

$$h_{LP} := \frac{j_{LP} \cdot C_{pHe} \cdot \dot{m}_{He}}{A_{qLP} \cdot Pr_{He}^{\frac{2}{3}}} = 1.349 \times 10^3 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

$$\Delta PLP_{\text{pass}} := \frac{fLP \cdot 2 \cdot M_{\text{max}} \cdot \dot{m} \cdot He^2}{\rho LP m Aq LP^2} = 3.569 \text{ kPa}$$

Detta är tryckfall per pass, antalet pass vet vi först efter att längden är bestämd.

Vi går nu över till beräkningar på *tubsidan*.

$$Aq_{HP\_tub} := \pi \cdot r_i^2 = 5.309 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \quad Aq_{HP} := n_{tub} \cdot Aq_{HP\_tub} = 0.637 \text{ m}^2$$

$$Re_{HP} := \frac{\dot{m} \cdot He \cdot 2 \cdot r_i}{Aq_{HP} \cdot \mu_{He}} = 6.801 \times 10^4$$

Detta är klart turbulent, så vi kan t.ex. använda Dittus-Bolters korrelation (WWWR ekv 20-28). Pr ligger visserligen strax utanför giltighetsintervallet, men det bortser vi ifrån.

$$Nu := 0.023 Re_{HP}^{0.8} \cdot Pr_{He}^{0.4} = 142.986 \quad h_{HP} := \frac{Nu \cdot \lambda_{He}}{2 \cdot r_i} = 1.43 \times 10^3 \cdot \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Vi har nu värmeöverföringstalen för båda sidor, så vi kan beräkna U. Vi väljer att göra det med referens till tubernas utsida.

$$U := \frac{1}{\frac{r_y}{h_{HP} \cdot r_i} + \frac{1}{h_{LP}}} = 669.172 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

För att beräkna A ur  $q = UA \Delta T_{\text{log}}$  så behöver vi få fram utloppstemperaturer

$$\Delta T_{HP} := \frac{q}{\dot{m} \cdot He \cdot C_p He} = 437.905 \text{ K} \quad T_{HP_{\text{ut}}} := T_{HP_{\text{in}}} + \Delta T_{HP} = 823.905 \text{ K}$$

Eftersom flöde och  $C_p$  är lika på de båda sidorna, så har vi samma temp-ändring

$$T_{LP_{\text{ut}}} := T_{LP_{\text{in}}} - \Delta T_{HP} = 408.095 \text{ K} \quad \Delta T_1 := T_{LP_{\text{in}}} - T_{HP_{\text{ut}}} = 22.095 \text{ K}$$

$$\Delta T_2 := T_{LP_{\text{ut}}} - T_{HP_{\text{in}}} = 22.095 \text{ K}$$

Vi har alltså samma temperturdifferens genom hela värmeväxlaren

$$A := \frac{q}{U \cdot \Delta T_1} = 8.454 \times 10^3 \text{ m}^2 \quad L := \frac{A}{n_{tub} \cdot \pi \cdot D_t} = 80.092 \text{ m}$$

Vi kan då även beräkna *tryckfallen*

För tubsidan

$$n_{\text{pass}} := \frac{L}{L_{bc}} = 17.798 \quad \Delta PLP := \Delta PLP_{\text{pass}} \cdot n_{\text{pass}} = 63.516 \text{ kPa}$$

För tubsidan så fås ur WWWR figur 13.1 (för  $e/D = 0.002$ )  $f := 0.006$ .

$$v_{HP} := \frac{\dot{m} \cdot He}{\rho_{HP} m Aq_{HP}} = 15.696 \frac{m}{s} \quad \Delta p_{HP} := \frac{2 \cdot f \cdot L \cdot \rho_{HP} m v_{HP}^2}{2 \cdot r_i} = 54.261 \text{ kPa}$$

**Svar: Tublängden blir ca 80 m och tryckfallen blir 63 resp 54 kPa, båda inom vad som var tillåtet.**