

**TENTAMEN I ENERGITEKNIK OCH MILJÖ (KVM033) 2009-06-02
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).
Föreläsningssanteckningar (ä. "Handouts") i Energiteknik,
kursmaterial i Energiteknik och miljö, 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 2009-06-03 kl 8.30 på VoM:s anslagstavla och senare på dagen på portalen. Betygslistan anslås senast 2009-06-16 på KB-institutionens anslagstavla. Granskning av rättning får ske 2009-06-18 kl 10.00-11.00 och 2009-08-17 kl 9.30-10.00 i VoM:s bibliotek

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

AVDELNING A

- A1. I Energimyndighetens statistik (Energiläget) för elproduktion i Sverige under senare år visas, förutom vattenkraft och kärnkraft, ett antal kraftslag.
- Nämn minst 4 av dessa kraftslag!
 - Nämn och beskriv kortfattat minst 3 framtida tekniker, som ej nämnts ovan, för elproduktion i Sverige!

5p

- A2. En vattenrörspanna karakteriseras av att vatten, som värms i tuber i eldstadens väggar, ingår i en cirkulationskrets.
- Vad består cirkulationskretsen av och hur fungerar den. Förklara med hjälp av en skiss.
 - Överhettare och ekonomiser kopplas in på cirkulationskretsen. Var sker detta? Motivera!
 - Vad heter alternativet till vattenrörspanna och var finns vattnet i denna konstruktion?

5 p

- A3. Turbokompressorerna finns både i radiellt och axiellt utförande.
- Jämför egenskaper hos dessa båda utföranden!
 - Visa hur hastighetstrianglarna i princip ser ut, både i in- och utlopp för ett radial- och ett axialhjul. Motivera!
 - Visa med en skiss hur en turbokompressorkarakteristika ser ut och diskutera den!

5p

AVDELNING B

B1. För att tillfredsställa ångbehovet och delar av totala elbehovet, i en industriell process har en naturgaseldad gasturbinkombi byggt. Totala elbehovet är 30 MW. Till gasturbinen tas 50 kg/s luft från atmosfären med en temperatur av 15°C. Gasturbinen arbetar med tryckförhållandet 15. Högsta temperaturen i gasturbinen är 1200°C. Isentropverkningsgraden för kompressorn är 0,85 och för turbinen 0,9. Antag att avgaserna och luften kan hanteras som en ideal gas med $\kappa = 1,40$ och $c_p = 1005 \text{ J/kg}\cdot\text{°C}$. Antag vidare att flödet är konstant genom gasturbinen. Försumma tryckfall genom avgaspannan. Förbränningsverkningsgraden är 0,98 och det kan antas att all frigjord bränsleenergi tillförs som värme till cykeln. I avgaspannan produceras ånga av 50 bar och 400°C. Minsta temperaturdifferensen i avgaspannan är 20°C. Mottrycksången till processerna har trycket 5 bar och temperaturen 160°C. Kondensatet återgår vid 3 bar och mättat tillstånd. Entalpiändringen över matarvattenpumpen kan försummas. Mekanisk friktions- och generatorverkningsgrad är 0,96 för båda turbinerna.

- Hur mycket el behöver köpas in till industriprocessen?
- Beräkna cykelns totalverkningsgrad.

(5p)

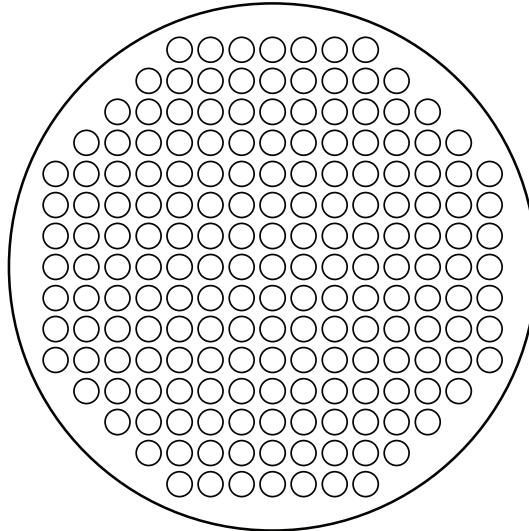
B2. En tillgänglig värmeväxlare skall om möjligt användas för en uppgift där en lätt kolvätefraktion med flödet 5,518 kg/s skall kylas med hjälp av en tung kolvätefraktion. Den lätta fraktionen bör lämpligen vara på mantelsidan, där temperaturen sänks från 198,9°C till 93,3°C. För den lätta kolvätefraktionen gäller följande ämnesdata i temperaturintervallet:

Densitet (kg/m ³)	730
Värmekonduktivitet (W/mK)	0,1324
Specifikt värme (kJ/kgK)	2,470
Viskositet (Ns/m ²)	401 10 ⁻⁶
Pr-tal	7,48

För geometrin gäller följande data:

Manteldiameter (m)	0,5398
Antal tuber	185
Tubdiameter, utvändig (m)	0,0254
Tubarrangemang	Parallell
Tubdelning (m)	0,03175
Tvärsnitt	Se nedan!
Baffelavstånd (m)	0,127

Beräkna värmeöverföringstalet på mantelsidan,



Figur: Tvärsnitt över värmeväxlaren

(5 p)

- B3. På grund av dåligt monteringsarbete och slarvig besiktning kvarstår ett mindre hål i en svetsskarv i en naturgasledning, när trycket släpps på. Vid en ny besiktning 30 dygn efter det att ledningen tagits i bruk upptäcks felet.
- Hur mycket (kg) naturgas har då läckt ut?
 - Hur mycket koldioxid hade emitterats om den utläcka naturgasen i stället hade eldats i en ångpanna?
 - Hur mycket större klimatpåverkan har den utläckta naturgasmängden jämfört med om den hade eldats?

Data:

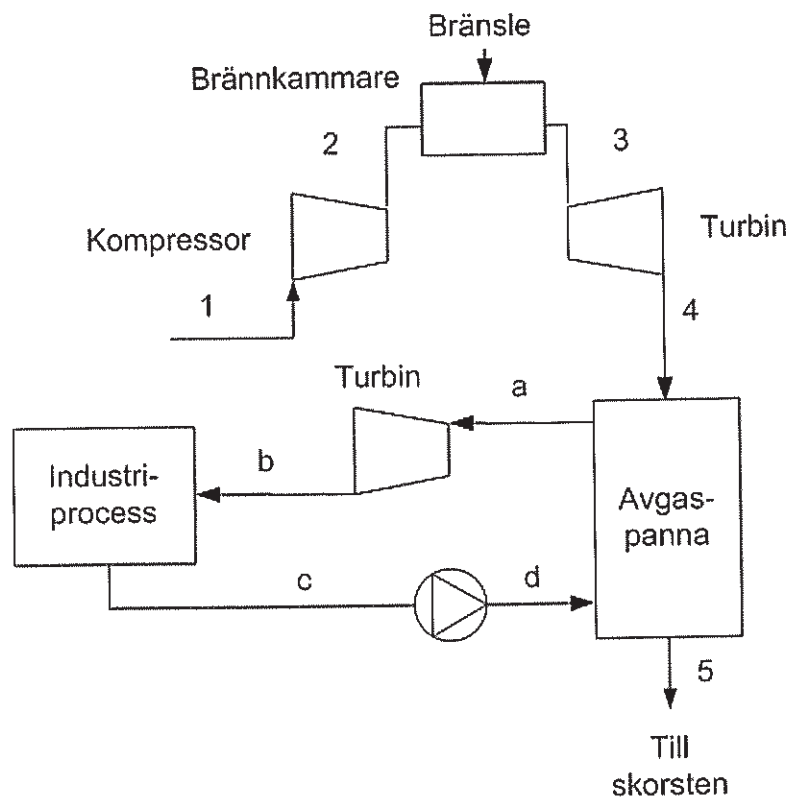
Naturgas	100% metan
k	1,30
Tryck i ledning	0,71 MPa
Temp i ledning	25°C
Hålstorlek	3,0 mm ²
Molmassa metan	16 kg/kmol
GWP metan	21 kg CO ₂ /kg

(5p)

Lycka till!

B1. För att tillfredsställa ångbehovet och delar av totala elbehovet, i en industriell process har en naturgaseldad gasturbinkombi-cykel byggts. Totala elbehovet är 30 MW. Till gasturbinen tas 50 kg/s luft från atmosfären med en temperatur av 15°C. Gasturbinen arbetar med tryckförhållandet 15. Högsta temperaturen i gasturbinen är 1200°C. Isentropverkningsgraden för kompressorn är 0,85 och för turbinen 0,9. Antag att avgaserna och luften kan hanteras som en ideal gas med $\kappa = 1,40$ och $c_p = 1005$ J/kg·°C. Antag vidare att flödet är konstant genom gasturbinen. Försumma tryckfall genom avgaspannan. Förbränningsverkningsgraden är 0,98 och det kan antas att all frigjord bränsleenergi tillförs som värme till cykeln. I avgaspannan produceras ånga av 50 bar och 400°C. Minsta temperaturdifferensen i avgaspannan är 20°C. Mottrycksångan till processerna har trycket 5 bar och temperaturen 160°C. Kondensatet återgår vid 3 bar och mättat tillstånd. Entalpiändringen över matarvattenpumpen kan försummas. Mekanisk friktions- och generatorverkningsgrad är 0,96 för båda turbinerna.

- Hur mycket el behöver köpas in till industriprocessen?
- Beräkna cykelns totalverkningsgrad.



Givet:

$$P_{el,behov} = 30 \text{ MW}$$

$$\dot{m}_{luft} = \dot{m}_{avgas} = 50 \text{ kg/s}$$

$$T_1 = 15 + 273,15 = 288,15 \text{ K}$$

$$P_1 = 1 \text{ bar}$$

$$P_2 = 15 \text{ bar}$$

$$T_3 = 1200 + 273,15 \text{ K} = 1473,15 \text{ K}$$

$$P_3 = 15 \text{ bar}$$

$$P_4 = 1 \text{ bar}$$

$$\eta_{is,komp} = 0,85$$

$$\eta_{is,turb} = 0,9$$

$$c_{p,luft/avgas} = 1005 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$$

$$\kappa = 1,4$$

$$\eta_{m+g} = 0,96$$

$$\Delta t_{min,avgaspanna} = 20^\circ\text{C}$$

$$P_a = 50 \text{ bar}$$

$$t_a = 400^\circ\text{C}$$

$$P_b = 5 \text{ bar}$$

$$t_b = 160^\circ\text{C}$$

$$P_c = 3 \text{ bar}$$

$$\eta_f = 0,98$$

antar konstant flöde

atmosfärstryck

högsta temperaturen i cykeln

försummar tryckfallet i avgaspannan

mättat tillstånd

all frigjord bränsleenergi tillförs som värme till cykeln

Sökt:

Inköpsbehovet av el, $P_{el,inköp}$ och totalverkningsgraden, η_{tot} .

Lösning:

a)

Elproduktionen i gasturbinen, $P_{el,GT}$

Elproduktionen i gasturbinen beräknas som skillnaden mellan arbetet som alstras i turbindelen minus arbetet som krävs för att komprimera luften (gångar mekaniska friktions- och generatorverkningsgraden):

$$P_{el,GT} = \eta_{m+g} * \dot{m}_{avgas} * c_{p,avgas} * ((T_3 - T_4) - (T_2 - T_1))$$

T_2 och T_4 behöver beräknas:

$$\frac{T_1}{T_{2,is}} = \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}$$

DoD s.5

$$\Rightarrow T_{2,is} = 625 \text{ K}$$

$$\eta_{is,komp} = \frac{\Delta T_{is}}{\Delta T} = \frac{T_{2,is} - T_1}{T_2 - T_1}$$

$$\Rightarrow T_2 = 684 \text{ K}$$

$$\frac{T_3}{T_{4, is}} = \left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad \text{DoD s.5}$$

$$\Rightarrow T_{4, is} = 680 \text{ K}$$

$$\eta_{is, turb} = \frac{\Delta T}{\Delta T_{is}} = \frac{T_3 - T_4}{T_3 - T_{4, is}}$$

$$\Rightarrow T_4 = 759 \text{ K} \quad \Rightarrow$$

$$P_{el, GT} = \eta_{m+g} * \dot{m}_{avgas} * c_{pavgas} * ((T_3 - T_4) - (T_2 - T_1)) = 15,4 \text{ MW}$$

Elproduktionen i ångturbinen, $P_{el, ST}$

$$P_{el, ST} = \eta_{m+g} * \dot{m}_{\text{\u00e5nga}} * (h_a - h_b)$$

$$h_a = 3197 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$$

$$h_b = 2767 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$$

$\dot{m}_{\text{\\u00e5nga}}$ beh\u00f6ver ber\u00e4knas. Detta g\u00f6rs genom anta att minst temperaturdifferensen i avgaspannan intr\u00e4ffar d\u00e5 f\u00f6r\u00e5ngningen startar och st\u00e4lla upp en v\u00e4rmebalans \u00f6ver \u00f6verhettnings- och f\u00f6r\u00e5ngningsdelen i avgaspannan:

$$\dot{m}_{\text{\\u00e5nga}} * (h_a - h'_{50bar}) = \dot{m}_{avgas} * c_{pavgas} * (t_4 - (t'_{50bar} + \Delta t_{\text{min, avgaspanna}}))$$

$$t_4 = 758,9 - 273,15 = 485,8^\circ\text{C}$$

$$h'_{50bar} = 1155 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$$

$$t'_{50bar} = 263,9^\circ\text{C}$$

$$\Rightarrow \dot{m}_{\text{\\u00e5nga}} = 5,0 \text{ kg/s}$$

Kontrollera antagandet om att minsta temperaturdifferensen intr\u00e4ffar vid f\u00f6r\u00e5ngningens b\u00f6rjan. I b\u00f6rjan av avgaspannan (sett fr\u00e5n avgassidan) \u00e4r temperaturdifferensen $85,8^\circ\text{C}$ (avgaserna \u00e4r $485,8^\circ\text{C}$ jfr med \u00e5ngan som \u00e4r 400°C). Det som allts\u00e5 ska kontrolleras \u00e4r om temperaturdifferensen i slutet av avgaspannan \u00e4r st\u00f6rre \u00e4n 20°C . I slutet av avgaspannan \u00e4r temperaturen p\u00e5 vattnet, om man f\u00f6rsummar entalpi\u00e4ndringen \u00f6ver matarvattenpumpen, $t_d = t_c = t'_{3bar} = 133,5^\circ\text{C}$. Genom en balans \u00f6ver hela avgaspannan f\u00e5s temperatur p\u00e5 avgaserna ut fr\u00e5n avgaspannan, t_5 .

$$\dot{m}_{\text{\\u00e5nga}} * (h_a - h_d) = \dot{m}_{avgas} * c_{pavgas} * (t_4 - t_5)$$

$$h_d = h_c = h'_{3bar} = 561 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$$

$\Rightarrow t_5 = 225,3^\circ\text{C}$, alltså temperatordifferensen är större än 20°C .

Nu kan elproduktionen i ångturbinen beräknas:

$$P_{\text{el,ST}} = \eta_{\text{m+g}} * \dot{m}_{\text{ånga}} * (h_a - h_b) = 2,0 \text{ MW}$$

Den totala elproduktionen i cykeln:

$$\Rightarrow P_{\text{elprod,tot}} = P_{\text{el,ST}} + P_{\text{el,GT}} = 17,4 \text{ MW}$$

$$P_{\text{el,inköp}} = P_{\text{elbehov}} - P_{\text{elprod,tot}} = 12,4 \text{ MW}$$

Svar: 12,4 MW el behöver köpas in till industriprocessen.

b)

$$\eta_{\text{tot}} = \frac{P_{\text{elprod,tot}} + q_{\text{värme}}}{q_{\text{bränsle}}}$$

$q_{\text{värme}}$ och $q_{\text{bränsle}}$ behöver beräknas.

$$q_{\text{värme}} = \dot{m}_{\text{ånga}} * (h_b - h_c) = 11,0 \text{ MW}$$

$q_{\text{bränsle}}$ beräknas genom en värmebalans över brännkammaren:

$$q_{\text{bränsle}} * \eta_f = \dot{m}_{\text{avgas}} * c_{\text{p,luft}} * (T_3 - T_2)$$
$$\Rightarrow q_{\text{bränsle}} = 40,5 \text{ MW}$$

$$\Rightarrow \eta_{\text{tot}} = 0,70$$

Svar: Totalverkningsgraden är 70 %.

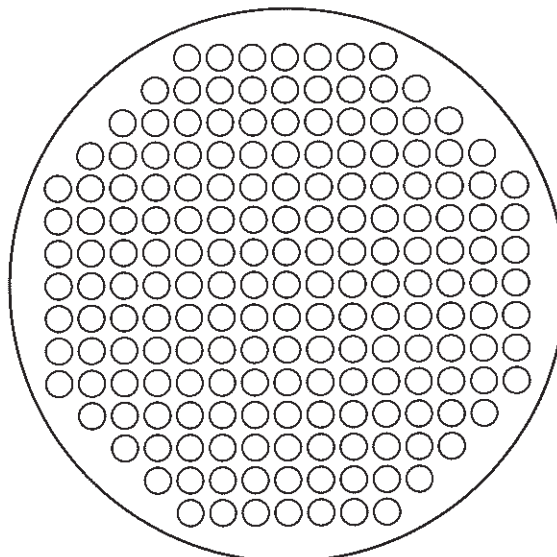
- B2. En tillgänglig värmeväxlare skall om möjligt användas för en uppgift där en lätt kolvätefraktion med flödet 5,518 kg/s skall kylas med hjälp av en tung kolvätefraktion. Den lätta fraktionen bör lämpligen vara på mantelsidan, där temperaturen sänks från 198,9°C till 93,3°C. För den lätta kolvätefraktionen gäller följande ämnesdata i temperaturintervallet:

Densitet (kg/m ³)	730
Värmekonduktivitet (W/mK)	0,1324
Specifikt värme (kJ/kgK)	2,470
Viskositet (Ns/m ²)	401 10 ⁻⁶
Pr-tal	7,48

För geometrin gäller följande data:

Manteldiameter (m)	0,5398
Antal tuber	185
Tubdiameter, utvändig (m)	0,0254
Tubarrangemang	Parallell
Tubdelning (m)	0,03175
Tvärsnitt	Se nedan!
Baffelavstånd (m)	0,127

Beräkna värmeöverföringstalet på mantelsidan,



Figur: Tvärsnitt över värmeväxlaren

Lösning B2

Sökt:

Värmeöverföringskoefficient h på mantelsidan

Givet:

Flödesdata

$$\dot{m} = 5,518 \text{ kg/s} \quad T_{in} = 198,9 \text{ °C} \quad T_{ut} = 93,3 \text{ °C}$$

Ämnesdata

Densitet	$\rho = 730 \text{ kg/m}^3$
Värmeledning	$k = 0,1324 \text{ W/(mK)}$
Specifikt värme	$c_p = 2,47 \text{ kJ/(kg K)}$
Viskositet (dynamiskt)	$\mu = 401 \cdot 10^{-6} \text{ Pa s}$

Geometri

Manteldiameter	$D_s = 0,5398 \text{ m}$
Antal tuber	$N_t = 185$
Tubytterdiameter	$D_t = 0,0254 \text{ m}$
Tubarrangemang	parallell
Tubdelning	$L_{tp} = 0,03275 \text{ m}$
Baffelavstånd	$L_{bc} = 0,127 \text{ m}$

Ur figuren kan man se det maximala antalet tubkolonner: $M = 15$

Lösning:

Med hjälp av geometriparametrarna kan man beräkna hastigheten på mantelsidan. Det ger Reynoldstalet och därmed j -faktorn som är korrelerad till värmeöverföringstalet. Alla beräkningar är baserade på kapitlet "Tryckfall och värmeöverföring i värmeväxlare" i kompendiet.

Hastigheten är:

$$v = \frac{\dot{m}}{A_q \cdot \rho} \quad (\text{ekv 3})$$

Med

$$A_q = (M + 1)L_{bc}(L_{tp} - D_t) = (15 + 1)0,127(0,03175 - 0,0254)\text{m}^2 = 0,0129\text{m}^2 \quad (\text{ekv 4})$$

Hastigheten blir alltså:

$$v = \frac{5,518}{0,0129 \cdot 730} = 0,586 \text{ m/s}$$

Reynoldstalet beräknas då till:

$$Re = \frac{v \cdot D_t \cdot \rho}{\mu} = \frac{0,586 \cdot 0,0254 \cdot 730}{401 \cdot 10^{-6}} = 27090 = 2,71 \cdot 10^4 \quad (\text{ekv 3})$$

Ur figur 4 kan då j-faktorn avläsas.

$$j = j\left(Re = 2,71 \cdot 10^4, \frac{L_{tp}}{D_t} = 1,25\right) = 0,0062$$

Överföringskoefficienten h på mantelsidan kan då beräknas med hjälp av ekvation (2) där man försumma viskositetskorrektionsfaktorn $\left[\left(\frac{\mu_w}{\mu_b}\right)^{-0,14} \approx 1\right]$

$$h = j \cdot c_p \cdot \frac{\dot{m}}{A_q} \cdot Pr^{-2/3}$$

Överföringskoefficienten på mantelsidan blir då:

$$h = 0,0062 \cdot 2470 \cdot \frac{5,518}{0,0129} \cdot 7,48^{-2/3} \frac{W}{m^2K} = 1712,13 \frac{W}{m^2K}$$

- B3. På grund av dåligt monteringsarbete och slarvig besiktning kvarstår ett mindre hål i en svets skarv i en naturgasledning, när trycket släpps på. Vid en ny besiktning 30 dygn efter det att ledningen tagits i bruk upptäcks felet.
- Hur mycket (kg) naturgas har då läckt ut?
 - Hur mycket koldioxid hade emitterats om den utläcka naturgasen i stället hade eldats i en ångpanna?
 - Hur mycket större klimatpåverkan har den utläckta naturgasmängden jämfört med om den hade eldats?

Data:

Naturgas	100% metan
k	1,30
Tryck i ledning	0,71 MPa
Temp i ledning	25°C
Hålstorlek	3,0 mm ²
Molmassa	16 kg/kmol
GWP för metan	21 kg CO ₂ /kg

(5 p)

a)

Sökt:

Mängd (kg) naturgas som har läckt ut

Givet:

$$P_0 = 0,71 \text{ MPa}$$

$$T_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$A = 3,0 \text{ mm}^2 = 3,0 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$k = 1,30$$

$$t = 30 \text{ dygn} = 2592000 \text{ s}$$

$$M = 16 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$$

$$P_2 = 1 \text{ atm (normallufttryck)}$$

Lösning:

Hålet på röret kan betraktas som ett enkelt munstycke. Den maximala hastigheten blir då ljudhastigheten under förutsättning att kritiska förhållanden råder ($P^* > P_2$).

Kontroll av att kritiska förhållanden råder.

Ur tabell 16.1 på sid 9 i "Kompressibel strömning":

$$P^*/P_0 = 0,5457$$

$$\rho^*/\rho_0 = 0,6276$$

$$T^*/T_0 = 0,8696$$

$$P_0 = 0,71 \text{ MPa} \Rightarrow P^* = 0,5457 \cdot 0,71 \text{ MPa} = 0,39 \text{ MPa} > P_2 \Rightarrow \text{Kritiska förhållanden!}$$

$$\Rightarrow v = c = \sqrt{k \cdot R \cdot T}$$

$$R = 8,31451 \text{ J/K} \cdot \text{mol} = 8,31451 / 16 \cdot 10^{-3} \text{ J/kg} \cdot \text{K} = 519,7 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$$

$$T = T^* = 0,8696 \cdot (25 + 273,15) \text{ K} = 259,3 \text{ K}$$

$$\Rightarrow v = \sqrt{1,30 \cdot 519,7 \cdot 259,3} = 418,55 \text{ m/s}$$

$$\dot{m} = v \cdot A \cdot \rho$$

$$\rho = \rho^*$$

$$\rho_0 = P_0 / R \cdot T [P \cdot V = m \cdot R \cdot T] = 0,71 \cdot 10^6 / 519,7 \cdot (25 + 273,15) = 4,58 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho = 0,6276 \cdot 4,58 = 2,87 \text{ kg/m}^3$$

$$\Rightarrow \dot{m} = 418,55 \cdot 3,0 \cdot 10^{-6} \cdot 2,87 \text{ kg/s} = 3,60 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s}$$

$$m_{\text{tot}} = \dot{m} \cdot t = 3,60 \cdot 10^{-3} \cdot 2592000 \text{ kg} = 9,3 \text{ ton}$$

b) och c)

Sökt:

Klimatpåverkan av den utsläppta naturgasen i förhållande till om den hade förbränts.

Givet:

$$m_{\text{naturgas}} = 9,3 \text{ ton (från a - uppgiften)}$$

$$GWP_{100, \text{naturgas}} = 21 \text{ kg CO}_2 \text{ ekv. / kg}$$

Lösning:

Naturgasutsläpp:

$$\text{CO}_2 - \text{ekvivalenter} = m_{\text{naturgas}} \cdot GWP_{100, \text{naturgas}} = 9,3 \cdot 21 \text{ ton} = 196,1 \text{ ton}$$

Förbränning:

$$CO_2 = m_{\text{natargas}} \cdot H_i \cdot c_{\text{natargas}}$$

$$H_i = 50,0 \text{ MJ/kg} \quad (D \ \& \ D \ \text{s. 26})$$

$$c_{\text{natargas}} = 57 \text{ kg/GJ} \quad (\"CO_2 \text{ emissions from industrial energy systems\" s. 3)}$$

$$\Rightarrow CO_2 = 9,3 \cdot 10^3 \cdot 50,0 \cdot 10^{-3} \cdot 57 \text{ kg} = 26,6 \text{ ton}$$

Jämförelse:

$$\frac{CO_2 - \text{ekvivalenter}}{CO_2} = \frac{196,1}{26,6} = 7,4$$

Svar: Under de 30 dyggen läcker 9,3 ton ut. Naturgasutsläppet motsvarar 196,6 ton CO₂ och vid förbränningen av samma mängd genereras 26,6 ton CO₂. Klimatpåverkan är således 7,4 ggr större vid läckaget av naturgas jämfört med om samma mängd hade förbränts.