

## Prosessteknikk eksamen 22/5-99. Løsningsforslag

Revidert: 7. juni 1999

Foreslått fordeling ved karaktersetting.

Oppg.1 : 15%

Oppg.2 : 40% (5 + 15 + 10 + 10)

Oppg.3 : 20% (5 + 5 + 5 + 5)

Oppg.4 : 10%

Oppg.5 : 15% (7+8)

### Oppgave 1

a)

$$\underline{\underline{p}} = p_{ytre} + \frac{mg}{A} = 10^5 \text{ Pa} + \frac{100 \text{ kg} \times 9.81 \text{ m s}^{-2}}{0.1 \text{ m}^2} = \underline{\underline{1.098 \times 10^5 \text{ Pa}}}$$

b)

$$F = k(l_0 - l) = 2 \times 10^4 \text{ N m}^{-1} \times 0.05 \text{ m} = 1000 \text{ N}$$

$$\underline{\underline{p}} = p_{ytre} + \frac{mg}{A} + \frac{F}{A} = 1.098 \times 10^5 \text{ Pa} + \frac{1000 \text{ N}}{0.1 \text{ m}^2} = \underline{\underline{1.198 \times 10^5 \text{ Pa}}}$$

c)

$$\begin{aligned} \underline{\underline{w}} &= - \int p_{ytre} dV = - \int_0^{A \times 0.05 \text{ m}} \left[ p_{ytre} + \frac{mg}{A} + \frac{k}{A}(l_0 - l) \right] dV \\ &= - \int_0^{A \times 0.05 \text{ m}} [p_{ytre} A + mg + k(l_0 - l)] dx = -(p_{ytre} A + mg) \int_0^{A \times 0.05 \text{ m}} dx - k \int_0^{A \times 0.05 \text{ m}} x dx \\ &= -(10^5 \text{ Pa} \times 0.1 \text{ m}^2 + 100 \text{ kg} \times 9.81 \text{ m s}^{-2}) \times 0.05 \text{ m} - 2 \times 10^4 \text{ N m}^{-1} \times \frac{1}{2} (0.05 \text{ m})^2 \\ &= -549 - 25 \text{ N m} = \underline{\underline{-574 \text{ J}}} \end{aligned}$$

### Oppgave 2

a) Antar stasjonær prosess.

Massebalanser for reaktoren (Ut = Inn + Dannet ved reaksjon) [mol/s]

N = reaktorprodukt

N<sup>0</sup> = reaktorføde

ξ = reaksjonsomfang for reaksjonen [mol/s].

$$N_{\text{NH}_3} = N_{\text{NH}_3}^0 - \xi$$

$$N_{\text{O}_2} = N_{\text{O}_2}^0 - 1.25\xi$$

$$N_{\text{NO}} = +\xi \quad (\text{antar ingen NO i føden})$$

$$N_{\text{H}_2\text{O}} = +1.5\xi \quad (\text{antaringen H}_2\text{O i føden})$$

$$N_{\text{N}_2} = N_{\text{N}_2}^0$$

$$\text{Totalt N} = N^0 + 0.25\xi$$

Merk: Siden all ammoniakk forbrennes er  $N_{\text{NH}_3} = 0$ , dvs.  $\xi = N_{\text{NH}_3}^0$

(dette betyr at ammoniakk er begrensende reaktant, dvs. det er luftoverskudd)

b) Antar ideell gass (dvs. entalpien er kun en funksjon av temperaturen).

Det er gitt at det er adiabatisk forhold i reaktoren.

Energibalansen over reaktoren blir da  $H_{\text{ut}} = H_{\text{inn}}$ , dvs.  $H_{\text{ut}} - H_{\text{inn}} = 0$

Basis: 1 mol føde/tid med  $x$  mol ammoniakk

Evaluerer  $H_{\text{ut}} - H_{\text{inn}}$  ved å betrakte:

1. Oppvarming av 1 mol føde fra 230 °C til 940 °C

$$1 \cdot C_p \cdot (940 - 230) \quad \text{der } C_p = 54x + 32(1 - x)$$

2. Reaksjon av  $x$  mol ammoniakk ved 940 °C

$$x \cdot (-223 \cdot 10^3)$$

Setter summen lik 0 og finner at  $x = 710 \cdot 32 / (223 \cdot 10^3 - 710 \cdot 22) = 0.110$

Dvs. at blandingen inneholder 11% ammoniakk og 89% luft.

Føden er da:

NH<sub>3</sub>: 0.11 mol

O<sub>2</sub>: 0.89\*0.21 = 0.187 mol

N<sub>2</sub>: 0.89\*0.79 = 0.703 mol

Tot.: 1 mol

Produktet er da (reaksjonsomfanget for reaksjonen er 0.11 mol):

NH<sub>3</sub>: 0 mol

O<sub>2</sub>: 0.187 - 0.11\*1.25 = 0.050 mol (4.9%)

N<sub>2</sub>: 0.703 mol (68.4%)

NO: 0.11 mol (10.7%)

H<sub>2</sub>O: 0.11\*1.5 = 0.165 mol (16.1%)

Tot.: 1.028 mol

c) Bruker at føden er 11% ammoniakk og 89% luft.

Energibalanse ( $H_{\text{ut}} = H_{\text{inn}}$ ) for blandepunktet gir

$$0.11 \cdot 37 \cdot (230 - (-15)) = 0.89 \cdot 32 \cdot (T_6 - 230)$$

Vi finner at  $(T_6 - 230) = 35$  K, dvs.  $T_6 = 265$  °C (=538 K), der  $T_6$  er temperaturen etter kompresjonen.

Tilført arbeide i kompresjonen er lik entalpiforskjellen for luft fra  $T_5 = 100$  °C til

$$T_6 = 265$$
 °C, dvs.  $W_S = C_p(T_6 - T_5) = 29 \cdot 165 = 4785$  J/mol

Av figuren ser vi at kompresjonen er adiabatisk. For en adiabatisk, reversibel kompresjon ville vi hatt

$$\frac{T_{6,\text{rev}}}{T_5} = \frac{P_6 \left(\frac{R}{C_p}\right)}{P_5} = 2.5^{\frac{8.31}{29}} = 1.300$$

som med  $T_5 = 373\text{ K}$  gir  $T_{6,\text{rev}} = 485\text{ K}$ , dvs.  $W_{S,\text{rev}} = C_p \cdot (T_{6,\text{rev}} - T_5) = 29 \cdot 112 = 3248\text{ J/mol}$

dvs. den adibatiske virkningsgraden er

$$3248/4785 = 0.679$$

d) Ser på reaksjonen



Ved 298 K:  $\Delta_r H = 33 - 90 = -57\text{ kJ/mol}$

$$\Delta_r G = 51 - 87 = -36\text{ kJ/mol}$$

$$\Delta C_p = 37 - 30 - 0.5 \cdot 29 = -7.5\text{ J/mol, K}$$

Ved 940 °C = 1213 K:

$$\Delta_r H = \Delta_r H(298) + \Delta C_p \cdot \Delta T = -57 - 7.5 \cdot 10^{-3} \cdot 915 = -63.9\text{ kJ/mol}$$

$$\Delta_r S(298) = (\Delta_r H - \Delta_r G)/298 = (-57 + 36)/298 = -70.5\text{ J/mol, K}$$

$$\Delta_r S = -70.5 + (-7.5) \ln(1213/298) = -81\text{ J/mol, K}$$

$$\Delta_r G = \Delta_r H - 1213 \cdot \Delta_r S = -63.9 - 1213 \cdot (-81 \cdot 10^{-3}) = +34.4\text{ kJ/mol}$$

$$K(940\text{ °C}) = \exp(-\Delta_r G/RT) = 0.033$$

Vi har at  $K = \frac{P_{\text{NO}_2}}{P_{\text{NO}} \cdot P_{\text{O}_2}^{0.5}}$ , der  $P_i$  er partialtrykket i bar.

Partialtrykket av oksygen i produktet er  $(0.050/1.028) \cdot 2.5\text{ bar} = 0.122\text{ bar}$

Vi får da at forholdet mellom  $\text{NO}_2$  og  $\text{NO}$  er lik

$$\frac{P_{\text{NO}_2}}{P_{\text{NO}}} = K \cdot P_{\text{O}_2}^{0.5} = 0.033 \cdot 0.122^{0.5} = 0.012$$

dvs. vi kan neglisjere  $\text{NO}_2$ -innholdet. (Antar at vi ikke trenger å korrigere  $P_{\text{O}_2}$  for forbruk i rx. med  $\text{NO}$ , det er åpenbart riktig.)

*Kommentar:* Hvis vi istedet for G-data bruker S-data fra SI Chemical Data fås  $\Delta_r S = -84.0$ ,  $K=0.023$  og forholdet mellom  $\text{NO}_2$  og  $\text{NO}$  blir 0.008.

### Oppgave 3. Varmeveksler

a) For å forklare forskjellen bør man ha en figur av vv med temp-forløp:

- For medstrøm vil temperaturene nærme seg hverandre ved utløp
- For motstrøm vil utløpstemperaturen til den "minste" strømmen (minst  $m \cdot C_p$ ) nærme seg innløpstemperaturen til den "største" strømmen

b) Stasjonær energibalanse gir for varm og kald side:

$$(1) m_h \cdot C_{p,h} \cdot (T_{h,\text{ut}} - T_{h,\text{inn}}) = -Q$$

$$(2) m_c \cdot C_{p,c} \cdot (T_{c,\text{ut}} - T_{c,\text{inn}}) = Q \quad (Q > 0)$$

Antagelser: Stasjonært (ingen akkumulering i vegg), intet varmetap (adiabatisk), konstant  $C_p$ , neglisjerer kinetisk energi etc.

Varmeoverføringen antas beskrevet ved

$$(3) Q = UA \Delta T_{\text{lm}} \quad \text{der } \Delta T_{\text{lm}} \text{ er log midlere temp-differanse}$$

c) Varm side  $Q = m \cdot C_p \cdot (T_i - T_u) = 3 \cdot 1200 \cdot 70 - 24 = 165.6 \cdot 10^3$

Kald side  $T_u = T_i + Q/(m \cdot C_p) = 20 + 165 \cdot 10^3 / (5 \cdot 1500) = 42.08\text{ °C}$  (315.23 K)

$$\Delta T_1 = 70 - 42.08 = 27.92\text{ K}$$

$$\Delta T_2 = 24 - 20 = 4\text{ K}$$

$$\Delta T_{lm} = 12.31 \text{ K}$$

$$A = Q/UA\Delta T_{lm} = 165/6 \cdot e^3 / 150 \cdot 12.31 = 89.68 \text{ m}^2.$$

d) Medstrøm:

$$\Delta T_1 = 65 \quad \Delta T_2 = 1.5 \quad \Delta T_{lm} = (\Delta T_1 - \Delta T_2) / \ln(\Delta T_1 / \Delta T_2) = 16.85$$

Setter  $Q = 100$  (basis). Da er  $UA = 100/16.85 = 5.935$  og  $m \cdot C_p = 100/35 = 2.86$  (varm side) og  $m \cdot C_p = 100/28.5 = 3.51$  (kald side).

Motstrøm: Får tre ligninger (ligningene (1), (2) og (3) over) med tre ukjente ( $Q$ ,  $T_{c,u}$  og  $T_{h,u}$ ).

Løses her ved iterasjon; Gjetning  $Q$ /beregnet  $Q$ :

110/177.6, 135/129.6, 132/135.44, 133/133.5, 133.2/133.12, 133.17/133.18

OK, dvs.  $Q = 133.17$ ,  $T_{c,u} = 62.95$  og  $T_{h,u} = 43.39$  ( $\Delta T_{lm} = 22.44$ ), dvs det overføres 33.17% mer varme med motstrøm.

Brukte følgende Matlab-rutine (må bruke kalkulator på eksamen!):

```
%MATLAB-program benyttet
%Data:
mcpH=100/35; thi=90;
mcpC=100/28.5; tci=25;
UA=100/16.85;
% gjett Q
Q = 110
% Fra energibalanser paa kald og varm side
tcu = tci + Q/mcpH
thu = thi - Q/mcpH
% Beregn logaritmisk midlere temperaturdifferens (motstrøm)
dt1 = thi - tcu
dt2 = thu - tci
dtlm = (dt1 - dt2) / log(dt1 / dt2)
% beregn Q (varmemengde overført)
Q = UA * dtlm
```

#### Oppgave 4.

Det er 3 komponenter og dermed 3 uavhengige massebalanser (summen av de tre gir den totale massebalansen, men denne er ikke uavhengig)

Massebalanser for 3 komponenter

$$\text{Olje:} \quad m_1 = 0.99 \cdot m_3$$

$$\text{Benzen:} \quad 0.04 \cdot m_2 = 0.001 \cdot m_4 + 0.01 \cdot m_3$$

$$\text{Luft:} \quad 0.96 \cdot m_2 = 0.999 \cdot m_4$$

Gitt  $m_2 = 0.35 \text{ kg/s}$

Luft-balanse gir  $m_4 = 0.3363 \text{ kg/s}$

Benzen-balanse gir  $m_3 = 1.3664 \text{ kg/s}$

Oljebalanse gir  $m_1 = 1.3527 \text{ kg/s}$

Kontroll: Totalbalanse:  $m_1 + m_2 = 1.7027$ ;  $m_3 + m_4 = 1.7027$  (OK)

#### Oppgave 5.

CSTR: Massebalansen gir:  $F_{A0} - F_A + r_A \cdot V = 0$

$$F_A = v_0 \cdot C_A$$

$$C_A = C_{A0} \cdot (1 - X_A)$$

$$F_{A0} - F_A = F_{A0} \cdot X_A$$

$$r_A = -k \cdot C_A = k \cdot C_{A0} \cdot (1 - X_A)$$

gir massebalansen  $v_0 \cdot C_{A0} \cdot X_A - k \cdot C_{A0} \cdot (1 - X_A) \cdot V = 0$

Innfører  $\tau = V / v_0$ , gir  $X_A - k\tau(1 - X_A) = 0$

Løser ut  $X_A$ :  $X_A = k\tau / (1 + k\tau)$

Innsatt:  $\tau = 1 \text{ m}^3 / 0.1 \text{ m}^3/\text{min} = 10 \text{ min} = 600 \text{ s}$

Gir  $k\tau = 600 \text{ s} \cdot 0.003 \text{ s}^{-1} = 1.8$

Innsatt:  $X_A = 1.8 / (1 + 1.8) = 0.643$  (64.3 %)

c) PFR

Massebalansen gir  $V = F_{A0} \int_0^{X_A} \frac{dX}{-r_A}$ , innfører hast.lign. og  $\tau = V / v_0$ , gir:

$$k\tau = \int_0^{X_A} \frac{dX}{(1 - X_A)} = \ln \frac{1}{1 - X_A}$$

gir  $X_A = 1 - e^{-k\tau}$

Innsatt  $k\tau = 600 \text{ s} \cdot 0.003 \text{ s}^{-1} = 1.8$  gir  $X_A = 0.835$  (83.5%)

(Omsetningsgraden større i PFR enn i CSTR, som forventet for en reaksjon med orden  $>0$ )