

SIK2501 Prosessteknikk

Konte-eksamen 6. august 1999

Løsningsforslag

Oppgave 1. (15%)

$$\text{Gassens volum er i utgangspunktet: } v_0 = \frac{RT_0}{p_0} = \frac{8.3145 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1} \times 298 \text{ K}}{10^5 \text{ Pa}} = 0.02478 \text{ m}^3$$

$$\text{En kraftbalanse gir at } p = p_{ytre} + \frac{F}{A} = p_{ytre} + \frac{k}{A}(l_0 - l)$$

For $l = l_0$ er $p = p_{ytre} = 10^5 \text{ Pa}$.

a) Konstant volum.

Fjæra strekkes 0.2 m mens stempelet holdes i ro. Det gir

$$\underline{\underline{p}} = p_{ytre} + \frac{k}{A}(l_0 - l) = 10^5 \text{ Pa} + \frac{2 \times 10^4 \text{ N m}^{-1}}{0.1 \text{ m}^2}(l_0 - l_0 - 0.2 \text{ m}) = \underline{\underline{6 \times 10^4 \text{ Pa}}}$$

$$\underline{\underline{T}} = \frac{pV_0}{R} = \frac{pRT_0}{Rp_0} = \frac{pT_0}{p_0} = 298 \text{ K} \frac{6 \times 10^4 \text{ Pa}}{10^5 \text{ Pa}} = \underline{\underline{179 \text{ K}}}$$

b) Konstant trykk.

Da må $l = l_0$, dvs stempelet forskyver seg 0.2 m slik at volumet øker.

$$\underline{\underline{v}} = v_0 + 0.2 \text{ m} \times 0.1 \text{ m}^2 = \underline{\underline{0.0478 \text{ m}^3}}$$

$$\underline{\underline{T}} = \frac{pv}{R} = \frac{10^5 \text{ Pa} \times 0.0478 \text{ m}^3}{8.3145 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}} = \underline{\underline{575 \text{ K}}}$$

c) Isoterm.

$$pv = RT = p_0 v_0$$

$$\left[p_{ytre} + \frac{k}{A}(l_0 - l) \right] (v_0 + A\Delta x) = p_0 v_0$$

$$\left[p_0 + \frac{k}{A}(\Delta x - 0.2 \text{ m}) \right] (v_0 + A\Delta x) = p_0 v_0$$

$$k(\Delta x)^2 + \left(\frac{k}{A}v_0 + p_0 A - 0.2 \text{ m} \times k \right) \Delta x - 0.2 \text{ m} \times \frac{k}{A}v_0 = 0$$

$$2 \times 10^4 \text{ N m}^{-1} \times (\Delta x)^2$$

$$+ \left(\frac{2 \times 10^4 \text{ N m}^{-1}}{0.1 \text{ m}^2} \times 0.02478 \text{ m}^3 + 10^5 \text{ Pa} \times 0.1 \text{ m}^2 - 0.2 \text{ m} \times 2 \times 10^4 \text{ N m}^{-1} \right) \Delta x$$

$$- 0.2 \text{ m} \times \frac{2 \times 10^4 \text{ N m}^{-1}}{0.1 \text{ m}^2} \times 0.02478 \text{ m}^3 = 0$$

$$\therefore \Delta x = 0.079 \text{ m}$$

$$\underline{v} = v_0 + 0.079 \text{ m} \times 0.1 \text{ m}^2 = \underline{0.03268 \text{ m}^3}$$

$$\underline{p} = \frac{RT_0}{v} = \frac{8.3145 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1} \times 298 \text{ K}}{0.03268 \text{ m}^3} = \underline{75.8 \text{ kPa}}$$

Oppgave 2. (25%)

(a) Føde: Kjenner alt (OK)

Reaktor: 1 uavhengig reaksjon, dvs. trenger 1 opplysning (NB!!)

Separator: Gitt at det er perfekt separasjon for A og B. Også gitt data for hvordan N fordeles (OK)

Splitter: Gitt splittfraksjon (OK)

Konklusjon: Trenger 1 opplysning og har gitt mengde strøm 7 så det skulle være OK

(b) Det må være føden til reaktoren (strøm 2) som har mest A fordi både føde og resirkulert inneholder A

(c) Balanser over hele prosessen ($\text{Inn1} = \text{Ut7} + \text{Ut4}$).

1. Totalbalanse (merk at totalt antall mol er konserverv)

$$n_4 = n_1 - n_7 = 100 - 12 = 88 \text{ mol/s (totalt antall mol i strøm 4).}$$

- Dvs. $n_{4B} = 0.99 \times 88 = 87.12 \text{ mol/s}$ (B i strøm 4).

- Dvs. $n_{4N} = 0.01 \times 88 = 0.88 \text{ mol/s}$ (inert i strøm 4).

2. Inertbalanse

$$n_{7N} = n_{1N} - n_{4N} = 3 - 0.88 = 2.12 \text{ mol/s (inert i strøm 7)}$$

- Da er

$$n_{7A} = n_7 - n_{7N} = 12 - 2.12 = 9.88 \text{ mol/s (A i strøm 7)}$$

(d) Strøm 5 og 6 har samme sammensetning som strøm 4. Vi har

$$n_7 = 0.04 n_5$$

$$n_6 = 0.96 n_5$$

dvs.

$$n_6 = (0.96/0.04) n_7 = 24 n_7 = 288 \text{ mol/s}$$

dvs.

$$n_{6A} = 24 \quad n_{7A} = 237.12 \text{ mol/s (A i strøm 6)}$$

$$n_{6N} = 24 \quad n_{7N} = 50.88 \text{ mol/s (N i strøm 6)}$$

Strøm 2 blir da:

$$n_{2A} = 97 + 237.12 = 334.12 \text{ mol/s}$$

$$n_{2N} = 3 + 50.88 = 53.88 \text{ mol/s}$$

$$n_2 = 388.00 \text{ mol/s}$$

dvs. fraksjonen inert i føden til reaktoren er

$$53.88/388.00 = 13.89\%$$

Kommentar: Som ekstraoppgave kan du gjerne regne ut omsetningsgraden og reaksjonsomfanget for komponent A.

Oppgave 3. (20%)

(a) Ved å bruke de støkiometriske koeffisienter får vi da at standard reaksjonsentalpi er

$$2(-393.51) + 3.5(-285.83) + 0.5 \cdot 0 - 3.75 \cdot 0 - x = -1713.3$$

Her er x er dannelsesvarmen for etylamin (l) ved 298 K som vi finner er lik -74.1 kJ/mol.

I SI Chemical data finner vi ved 298K

at dannelsesvarmen for etylamin (g) er -46 kJ/mol og at fordampningsvarmen er 32 kJ/mol. Dette gir at dannelsesvarmen for etylamin (l) er $-46 - 32 = -78$ kJ/mol (som avviker en del fra verdien funnet over; jeg ville nok stole mest på SI Chemical Data).

(b)

Forbrenningsreaksjonen er: $\text{HCOOCH}_3(\text{l}) + 2 \text{O}_2(\text{g}) = 2 \text{CO}_2(\text{g}) + 2 \text{H}_2\text{O}(\text{l})$
Dette gir dannelsesvarme (-379.2 kJ/mol) mens SI Data gir (-387 kJ/mol).

Oppgave 4. (25%)

(a) $(T_2/T_1) = (p_2/p_1)^{(R/C_p)} = 10^{0.222} = 1.668$ dvs. $T_2 = 505.4$ K

og $W_s = n C_p (T_2 - T_1) = n C_p T_1 (T_2/T_1 - 1)$

$$= 100 \cdot 37.4 \cdot 303 (1.668 - 1)$$

$$= 757.0 \text{ kJ/s}$$

(b) Trykkstigningen i hvert trinn er $p_{\text{ut}}/p_{\text{inn}} = 10^{(1/2)} = 3.16$.

Det blir samme temperaturstigning i hvert av de to trinnene

$$T_2/T_1 = T_{\text{ut}}/T_{\text{inn}} = (p_{\text{ut}}/p_{\text{inn}})^{(R/C_p)} = 3.16^{0.222} = 1.291$$
 dvs. $T_2 = 391.33$ K

og $W_s = 2 \cdot n C_p T_1 (T_{\text{ut}}/T_{\text{inn}} - 1)$

$$= 2 \cdot 100 \cdot 37.4 \cdot 303 (1.291 - 1)$$

$$= 660.8 \text{ kJ/s}$$

(c) Trykkstigningen i hvert trinn er $p_{\text{ut}}/p_{\text{inn}} = 10^{(1/12)} = 1.211$.

Det blir samme temperaturstigning i hvert av de 12 trinnene og

$$T_2/T_1 = T_{\text{ut}}/T_{\text{inn}} = (p_{\text{ut}}/p_{\text{inn}})^{(R/C_p)} = 1.211^{0.222} = 1.043$$

og $W_s = 12 \cdot n C_p T_1 (T_{\text{ut}}/T_{\text{inn}} - 1)$

$$= 12 \cdot 100 \cdot 37.4 \cdot 303 (1.043 - 1)$$

$$= 592.4 \text{ kJ/s}$$

(d) For isoterm kompresjon av ideell gass er

$$W_s = n R T \ln (P_2/p_1) = 100 \cdot 8.31 \cdot 303 \cdot \ln(10) = 579.8 \text{ kJ/s}$$

Kommentar: Som forventet ser vi at adiabatisk kompresjon med mange trinn nærmer seg isoterm kompresjon.

(e) Reell gass.

Fra energibalansen er $H_2 - H_1 = W_s + Q$ der for en reversibel isoterm prosess $Q = T(S_2 - S_1)$. Dvs. vi har $W_s = H_2 - H_1 - Q = H_2 - H_1 - T(S_2 - S_1)$.

Vi avleser fra diagrammet

$$H_1 = 1460 \text{ kJ/kg}, S_1 = 6.66 \text{ J/kg K}$$

$$H_2 = 1400 \text{ kJ/kg}, S_2 = 5.40 \text{ J/kg K}$$

Vi får da

$$W_s = -60 - 303 \cdot (-1.26) = -60 + 381.8 = 321.8 \text{ kJ/kg}$$

Molvekten av ammoniakk er ca. 17 g/mol, dvs. massestrømmen er

$m = 100 \text{ mol/s} \cdot 17 \text{ g/mol} = 1.7 \text{ kg/s}$ og vi får da

$$W_s = 1.7 \cdot 321.8 \text{ kJ/s} = 547 \text{ kJ/s}$$

som stemmer ganske bra med det vi fant for ideell gass.

(f) Alternativ prosess:

1. avkjøle gassen og kondensere ved 1 bar
2. pumpe væsken fra 1 bar til 10 bar
3. varme opp og fordampe ved 10 bar

Pumpearbeidet er for inkompressiblet fluid gitt som

$$W_s = V \cdot (p_2 - p_1) = m \cdot (p_2 - p_1) / \rho = 1.7 \cdot (10 - 1) \cdot 10^5 / 800 = 1.91 \text{ kJ/s}$$

som er ca. 3% av kompresjonsarbeidet

Ulempen med denne prosessen er at vi må kondensere ammoniakk ved ca. -34C

(som er kokepunktet for ammoniakk ved 1 bar) og vi må deretter

fordampe ammoniakk ved ca. 24C (kokepunkt ved 10 bar). Spesielt

vil det være kostbart (og kreve mye arbeide) å få tak i kjøling ved -34C (Et unntak kan være

Nordpolen, men her er tilgangen på varme

ved 24 C et problem)

Oppgave 5. (15%)

a)

Molbalanseligningen for batch-reaktor (utledning : se kompendium) gir at

$$t = N_{A0} \cdot \int_0^X \frac{dX}{-r_A \cdot V} = C_{A0} \cdot \int_0^X \frac{dX}{-r_A}$$

innfører hastighetsligningen

$$t = C_{A0} \cdot \int_0^X \frac{dX}{k \cdot C_A}$$

$$C_A = C_{A0} (1 - X)$$

$$\Rightarrow t = C_{A0} \cdot \int_0^X \frac{dX}{k \cdot C_{A0} (1 - X)} = \frac{1}{k} \cdot \int_0^X \frac{dX}{1 - X}$$

Innsatt tall

$$5[\text{min}] = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{1}{1 - X} \right) \Big|_0^{0.5}$$

gir $k = 0,0713 \text{ min}^{-1}$.

Setter inn for $X = 0,5$ og finner tiden t :

$$t = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{1}{1-X} \right) \Big|_0^{0,5} = \frac{1}{0,0713} \ln \left(\frac{1}{1-0,5} \right)$$

gir t = 9,72 min.

b) Massebalansen for PFR (utledning: se komp.) gir

$$V = F_{A0} \cdot \int_0^X \frac{dX}{-r_A}$$

$$r_A = k \cdot C_A \quad \text{hvor } k = 0,0713 \text{ min}^{-1}$$

Vi har (konstant tetthet)

$$F_{A0} = v_0 \cdot C_{A0} = 100 \frac{\text{dm}^3}{\text{min}} \cdot 1 \frac{\text{mol}}{\text{dm}^3} = 100 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

og

$$\frac{V}{F_{A0}} = \frac{1 \text{ m}^3}{100 \text{ mol/min}}$$

$$-r_A = kC_A = kC_{A0}(1-X)$$

Innfører $t = V/v_0$, (oppholdstid)

$$\tau = \frac{1 \text{ m}^3}{0,1 \text{ m}^3/\text{min}} = 10 \text{ min}$$

Analogi med batch-reaktoren (konstant volum i batch svarer til konstant tetthet i PFR) gir dermed

$$\tau = \frac{1}{k} \cdot \ln \left(\frac{1}{1-X} \right)$$

$$k\tau = \ln \left(\frac{1}{1-X} \right) \Rightarrow$$

$$\frac{1}{1-X} = e^{k\tau}$$

som gir at

$$X = \frac{e^{k\tau} - 1}{e^{k\tau}}$$

innsatt :

$$X = \frac{e^{0,0713 \cdot 10} - 1}{e^{0,0713 \cdot 10}}$$

$$\underline{X = 0,5098 (= 51\%)}$$