SIK2501 Prosessteknikk
Konte-eksamen 6. august 1999

Løsningsforslag

Oppgave 1. (15%)

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

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

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

a) Konstant volum.
Fjæra strekkes 0.2 m mens stempelet holdes i ro. Det gir

$$\underline{\underline{p}} = p_{ytre} + \frac{k}{A}(l_0 - l) = 10^5\ \text{Pa} + \frac{2\times10^4\ \text{N m}^{-1}}{0.1\,\text{m}^2}(l_0 - l_0 - 0.2\ \text{m}) = \underline{\underline{6\times10^4\ \text{Pa}}}$$

$$\underline{\underline{T}} = \frac{pV_0}{R} = \frac{pRT_0}{Rp_0} = \frac{pT_0}{p_0} = 298\,\text{K}\,\frac{6\times10^4\ \text{Pa}}{10^5\ \text{Pa}} = \underline{\underline{179\ \text{K}}}$$

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

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

$$\underline{\underline{T}} = \frac{pv}{R} = \frac{10^5\ \text{Pa} \times 0.0478\,\text{m}^2}{8.3145\ \text{J mol}^{-1}\ \text{K}^{-1}} = \underline{\underline{575\ \text{K}}}$$

c) Isoterm.

$$pv = RT = p_0 v_0$$

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

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

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

$$2\times10^4\ \mathrm{N\ m^{-1}} \times (\Delta x)^2$$

$$+\left(\frac{2\times10^4\ \mathrm{N\ m^{-1}}}{0.1\ \mathrm{m}^2} \times 0.02478\ \mathrm{m}^3 + 10^5\ \mathrm{Pa} \times 0.1\ \mathrm{m}^2 - 0.2\ \mathrm{m} \times 2\times10^4\ \mathrm{N\ m^{-1}} \right)\Delta x$$

$$-0.2\ \mathrm{m} \times \frac{2\times10^4\ \mathrm{N\ m^{-1}}}{0.1\ \mathrm{m}^2} \times 0.02478\ \mathrm{m}^3 = 0$$

$$\therefore \underline{\Delta x = 0.079\ \mathrm{m}}$$

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

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

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 (Inn1 = Ut7 + Ut4).
1. Totalbalanse (merk at totalt antall mol er konservert)
n4 = n1 - n7 = 100 - 12 = 88 mol/s (totalt antall mol i strøm 4).
- Dvs. n4B = 0.99*88 = 87.12 mol/s (B i strøm 4).
- Dvs. n4N = 0.01*88 = 0.88 mol/s (inert i strøm 4).
2. Inertbalanse
n7N = n1N - n4N = 3 - 0.88 = 2.12 mol/s (inert i strøm 7)
- Da er
n7A = n7 - n7N = 12 - 2.12 = 9.88 mol/s (A i strøm 7)

(d) Strøm 5 og 6 har samme sammensetning som strøm 4. Vi har
n7 = 0.04 n5
n6 = 0.96 n5
dvs.
n6 = (0.96/0.04) n7 = 24 n7 = 288 mol/s

dvs.
n6A = 24 n7A = 237.12 mol/s (A i strøm 6)
n6N = 24 n7N = 50.88 mol/s (N i strøm 6)
Strøm 2 blir da:
n2A = 97 + 237.12 = 334.12 mol/s
n2N = 3 + 50.88 = 53.88 mol/s
n2 = 388.00 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 st\o kiometriske 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 fordamningsvarmen
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: HCOOCH3(l) + 2 O_2(g) = 2 CO_2(g) + 2 H_2 O(l)
Dette gir dannelsesvarme (-379.2 kJ/mol) mens SI Data gir (-387 kJ/mol).

Oppgave 4. (25%)

(a) (T2/T1) = (p2/p1)^(R/Cp) = 10^0.222 = 1.668 dvs. T2=505.4 K
og Ws = n Cp (T2-T1) = n Cp T1 (T2/T1 - 1)
= 100*37.4*303 (1.668-1)
= 757.0 kJ/s
(b) Trykkstigningen i hvert trinn er put/pinn=10^(1/2) = 3.16.
Det blir samme temperaturstigning i hvert av de to trinnene
T2/T1 = Tut/Tinn = (put/pinn)^(R/Cp) = 3.16^0.222 = 1.291 dvs. T2=391.33 K
og Ws = 2 * n Cp T1 (Tut/Tinn - 1)
= 2*100*37.4*303 (1.291-1)
= 660.8 kJ/s
(c) Trykkstigningen i hvert trinn er put/pinn=10^(1/12) = 1.211.
Det blir samme temperaturstigning i hvert av de 12 trinnene og
T2/T1 = Tut/Tinn = (put/pinn)^(R/Cp) = 1.211^0.222 = 1.043
og Ws = 12 * n Cp T1 (Tut/Tinn - 1)
= 12*100*37.4*303 (1.043-1)
= 592.4 kJ/s
(d) For isoterm kompresjon av ideell gass er
Ws = n RT ln (P2/p1) = 100*8.31*303*ln(10)= 579.8 kJ/s

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

(e) Reell gass.
Fra energibalansen er H2-H1 = Ws + Q der for en reversibel isoterm prosess
Q = T(S2-S1). Dvs. vi har Ws = H2-H1 - Q = H2-H1 - T(S2-S1).
Vi avleser fra diagrammet
H1=1460 kJ/kg, S1=6.66 J/kg K
H2=1400 kJ/kg, S1=5.40 J/kg K
Vi får da
Ws = -60 - 303*(-1.26) = - 60 + 381.8 = 321.8 kJ/kg
Molvekten av ammoniakk er ca. 17 g/mol, dvs. massestrømmen er
m = 100 mol/s * 17g/mol = 1.7 kg/s og vi får da
Ws = 1.7*321.8 e3 J/s = 547 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
Ws = V*(p2-p1) = m*(p2-p1)/rho = 1.7*(10-9)e5 / 800 = 1.91 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

$$5[\min] = \frac{1}{k} \ln\left(\frac{1}{1-X}\right)_0^{0,3}$$

gir k= 0,0713 $\min^{-1}$.
Setter inn for X = 0,5 og finner tiden t:

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

gir <u>t = 9,72 min.</u>

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

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

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

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 :

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

<u>X = 0,5098 (= 51%)</u>