NORGES TEKNISK-NATUR-
VITENSKAPELIGE UNIVERSITETET
INSTITUTT FOR KJEMISK PROSESSTEKNOLOGI

Faglig kontakt under eksamen/fagleg kontakt under eksamen:
Professor Edd A. Blekkan, tlf.73594157 (Oppgave 1 og 5)
Professor Sigurd Skogestad, tlf. 73594154 (Oppgave 2, 3 og 4)

EKSAMEN I FAG SIK 2501 - Prosessteknikk
Fredag 2. juni 2000
Tid: 0900 - 1500

Hjelpemidler B2: Typegodkjent kalkulator, med tomt minne, i henhold til liste utarbeidet av NTH tillatt. Tillatt formelsamling: Aylward & Findlay: SI Chemical Data.
Hjelpemedel B2: Typegodkjend kalkulator, med tomt minne, i henhold til utarbeid liste av NTH tillate. Tillete formelsamling: Aylward & Findlay: SI Chemical Data.

Sensur foreligger i uke 25.

Oppgave 1/Oppgåve 1.

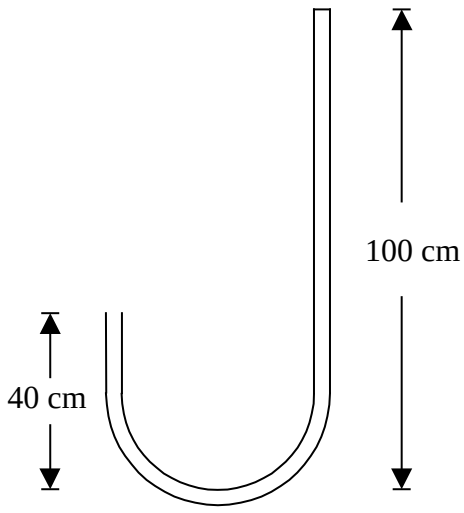
Dibutylftalat brukes ofte som manometervæske (i stedet for kvikksøv). Dibutylftalat har tetthet 1047 kg m^{-3}.

a) Hvor stort trykk gir en væskesøyle på 1000 mm av dette stoffet? Gitt: Tyngdens akselleras jon er g = 9.81 m s^{-2}.

Et glassrør med J-form som vist i figur 1 er lukket i den høyeste enden og åpen i den andre. Lufttrykket er 1 atm og temperaturen er 22°C. Du heller dibutylftalat inn i den åpne enden av røret inntil det er fylt til randen.

b) Finn et uttrykk for trykket i bunnen av væskesøylen i den åpne enden av røret (ved bunnen av 40 cm væskesøyle)

c) Hvor langt fra toppen av det lukkede røret står væskenivået?



Figur 1. Glassrør som er lukket i øverste (høyre) ende og åpent i nederste (venstre).

Oppgave 2/Oppgåve 2.

Bakgrunn:
I et gasskraftverk fås mesteparten av elektrisiteten ved at gassen forbrennes i en gass-turbin (som ligner en flymotor). Men for å få bedre energiutnyttelse bygges idag såkalte kombinerte kraftverk hvor det også taes ut energi av den varme forbrennings-gassen ved at det innstalleres varmevekslere i eksoskanalen slik at det lages overhetet høytrykks vanndamp.
Betrakt et gasskraft der det lages høytrykksdamp ved 100 bar og 529 °C. Denne høytrykksdampen ekpanderes adiabatisk til 28.5 bar mellomtrykks-damp i en høytrykksturbin med 77% virkningsgrad, og ekspanderes videre til 0.096 bar damp i en adiabatisk lavtrykksturbin med 82% virkningsgrad. I begge de to turbinene taes det ut arbeide som kan brukes til å generere elektrisk kraft.

Data: Anta at vanndampen er ideell gass med varmekapasitet 2 kJ/kg.
Ved 45 °C er metningstrykket (damptrykket) av vann lik 0.096 bar.
Anta at fordampningsvarmen for vann er 2400 kJ/kg ved 45°C.

a) Lag en skisse (flytskjema) av prosessen med de to turbinene.

Velg 1 kg damp som basis i de videre beregninger.

b) Hvor mye arbeid taes det ut i høytrykksturbinen?

c) Hvilken temperatur har mellomtrykksdampen?

d) Hvor mye arbeid taes det ut i lavtrykksturbinen?

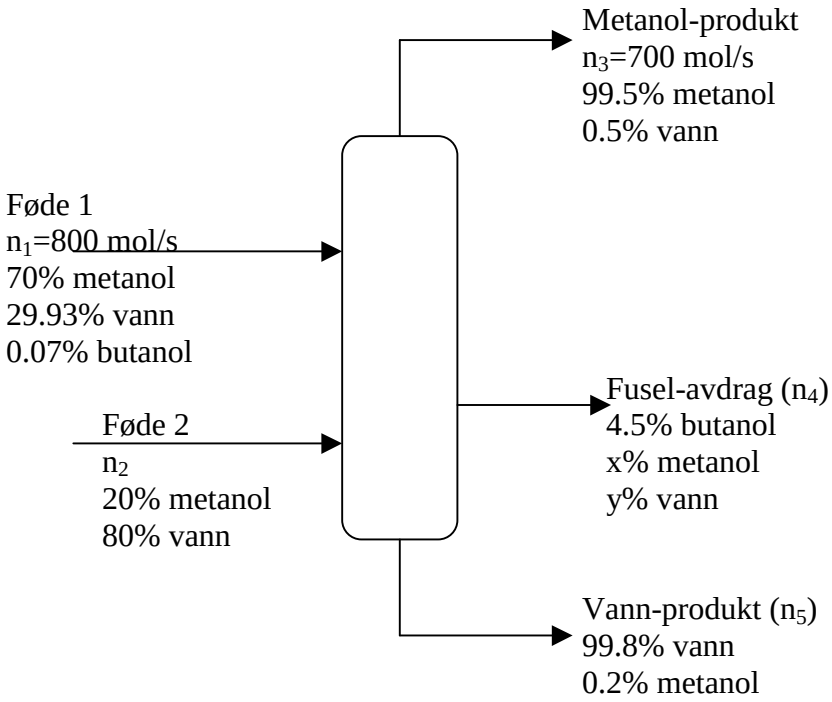
e) Hvis du har regnet riktig vil du nå finne ut at lavtrykksdampen har en temperatur som ligger under metningstemperaturen på 45 °C ved 0.096 bar, men i praksis vil væske (vann) utkondenseres. Hvor mye vann vil dannes (fuktighetsinnholdet bør ikke overstige 10% fordi lavtrykks-turbinen ellers kan bli ødelagt)?

f) Det vurderes å bruke mellomtrykksdampen til boligoppvarming. Vil du anbefale dette?

Oppgave 3/Oppgåve 3

I en metanolfabrikk er det en destillasjonskolonne der metanol taes av som topp-produkt og vann som bunn-produkt. Kolonnen har to føder. Det er litt butanol i den ene føden, og butanolen tas ut i et "fuselavdrag" midt på kolonnen. (Destillasjon er basert på forskjeller i flyktighet, og man skulle forvente at butanol, som koker ved en høyere temperatur enn vann, kommer ut i bunn av kolonnen. Grunnen til at dette ikke skjer er at vann og butanol "ikke liker hverandre" i væskefasen og derved presses butanolen oppover i kolonnen.)
Flere opplysinger er gitt i figur 2 (alle tall er i mol-%).
Vi ønsker å bestemme mengden av føde 2 (n_2).

a) Hvor mange uavhengige massebalanser kan settes opp for kolonnen?



Figur 2.

b) Hvor mange ytterligere opplysninger trenger du for å løse problemet?

c) Er systemet løsbart hvis det er gitt at fuselen inneholder 2% metanol? (Hvis ja, finn svaret).

d) Er systemet løsbart hvis det er gitt at fuselmengden er n_4 = 20 mol/s ? (Hvis ja, finn svaret).

Oppgave 4/oppgåve 4.

Etylbenzen reagerer til styren ved en katalytisk gassfasereaksjon

C_8H_{10} (g) 6 C_8H_8 (g) + H_2 $\quad \Delta_r H^{\Theta}$ (600 °C) = +124.5 kJ/mol

I figur 3 er det vist en noe forenklet versjon av prosessens flytskjema. Prosessen foregår ved 1 atm. Føde og resirkulert etylbenzen i væskefase ved 25 °C blandes og oppvarmes fra 25 °C til 500 °C i en fordamper (A). Etylbenzen, som nå er i gassfase, blandes med vanndamp ved 700 °C, og gir reaktorføden ved 600 °C (B) (vanndampen må innblandes for å unngå uønskede bireaksjoner og fjerne karbon fra katalysatoren). I reaktoren (C) er omsetningsgraden 35% (for hvert gjennomløp). Produktet kjøles til 25 °C (D), slik at etylbenzen, styren og vann kondenseres, mens H_2 tas ut som gassprodukt. Vann og hydrokarboner er uløselige og separeres i en væskeseparator (E). Vannet fordampes (F) og resirkuleres til reaktoren. Hydrokarbonstrømmen separeres i nesten ren etylbenzen (som resirkuleres til fordamperen) og ren styren (produkt) i et destillasjonsanlegg (G). Mengde styrenprodukt skal være 1 kg/s.

(a) Beregn mengde føde og resirkulert etylbenzen (alt i mol/s).

Se hoved00_figur.jpg

Figur 3. Forenklet flytskjema for styren-prosessen

b) Beregn mengde vann som sirkulerer i reaktorsystemet (i mol/s).

c) Bestem mengde tilført eller fjernet varme (energi) i fordamperen (A), fordamperen (F) og reaktoren (C) (i J/s).

d) Diskuter muligheten for å redusere energiforbuket.

e) I figuren mangler det en fødestrøm som skal erstatte tap av vann i produktene. Hvor stor må denne minst være dersom damptrykket av vann ved 25 °C er 0.03 atm slik at hydrogenproduktet inneholder 3 mol% vann.

Data:

Etylbenzen (EB): $C_P(l) = 182$ J/mol K

$\Delta_{vap}H = 36.0$ kJ/mol (ved $T_b = 136$ °C)

$C_P(g)$ [J/mol K] = 118 + 0.30 * T [°C]

Styren (S): $C_P(l) = 209$ J/mol K

$\Delta_{vap}H = 37.1$ kJ/mol (ved $T_b = 145$ °C)

$C_P(g)$ [J/mol K] = 115 + 0.27 * T [°C]

Vann (H_2O): $C_P(l) = 75.3$ J/mol K

$\Delta_{vap}H = 40.7$ kJ/mol (ved $T_b = 100$ °C)

$C_P(g)$ [J/mol K] = 33.4 + 0.01 * T [°C]

Hydrogen: $C_P(g) = 29.1$ J/mol K

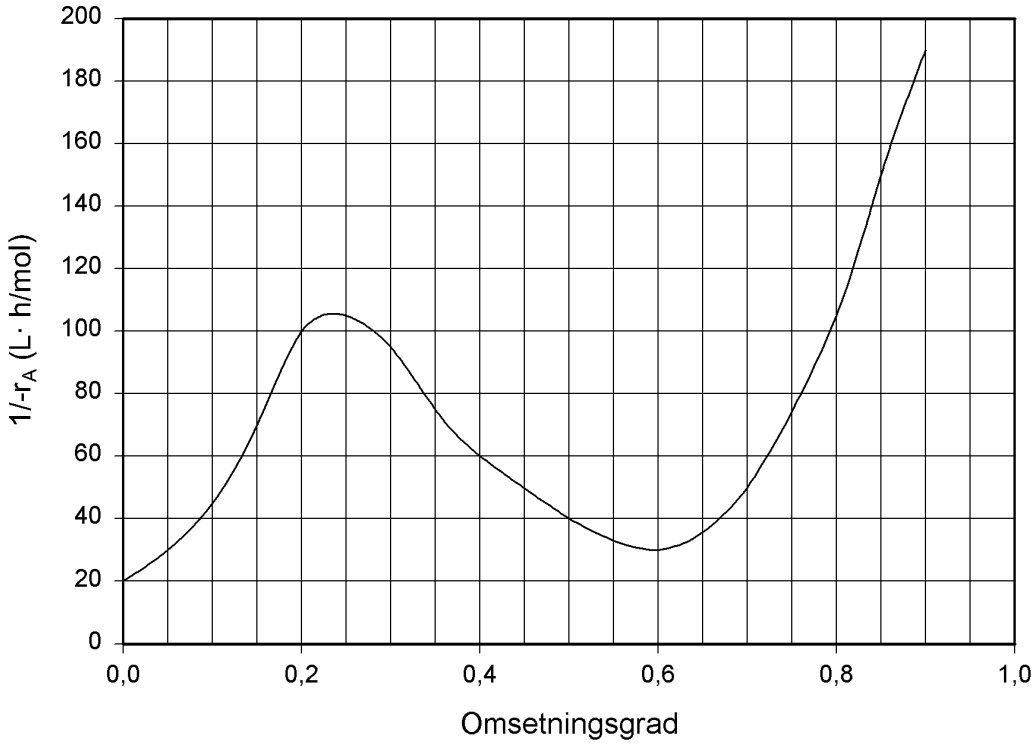
Oppgave 5/oppgåve 5.

En fortynnet løsning av forbindelse A fødes (v_0=100 L/h, C_{A0} = 1 mol/L) inn på et reaktorsystem hvor A reagerer til B:

$$2A \rightarrow B$$

Reaktorsystemet består av en stempelstrømsreaktor (PFR) med volum V_{PFR}, og produktet fra denne reaktoren fødes direkte til en perfekt blandetrinnsreaktor (CSTR) med volum V_{CSTR}.

Sammenhengen mellom omsetningsgraden av A og reaksjonshastigheten for omsetning av A, $-r_A$, er vist i et Levenspiel-plott ($1/-r_A$ mot omsetningsgrad) nedenfor.



a) Sett opp molbalanseligningene for A over systemet.

b) Omsetningsgraden av A ut fra PFR-reaktoren er X_1= 0.3 og ut fra CSTR-reaktoren er X_2 = 0.7. Bestem reaktorvolumene V_{PFR} og V_{CSTR}.

c) Hva vil omsetningsgraden av A være dersom reaktorene plasseres i motsatt rekkefølge? Kommenter løsningen du finner.

Data og formler til bruk under eksamen:

- Gasskonstanten R = 8.314 J/mol,K
- Van der Waals tilstandsligning: $p = \frac{nRT}{V - nb} - a\left(\frac{n}{V}\right)^2$
- For en adiabatisk (isentropisk) prosess gjelder for en ideell gass med konstant $\gamma = c_P/c_V$:

$$pV^{\gamma} = \text{konst.}$$

som er ekvivalent med:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

- For kontinuerlige prosesser er akselarbeidet ved reversible trykkendringer generelt gitt ved $W_S = \int_{p_1}^{p_2} V dP$. For isoterm reversibel kompresjon/eksansjon av en ideell gass er da

$$W_S = RT \ln \frac{p_2}{p_1} \qquad \text{[J/mol]}$$

- Logaritmisk midlere temperaturdifferens er: $\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}}$

- Følgende uttrykk kan brukes for å bestemme $\Delta_r G^{\Theta}(T)$ og K(T) fra data ved 298 K når varmekapasiteten antas konstant:

$$\Delta_r H^{\Theta}(T) = \Delta_r H^{\Theta}(298) + \Delta_r c_P^{\Theta} \cdot (T - 298)$$

$$\Delta_r S^{\Theta}(T) = \Delta_r S^{\Theta}(298) + \Delta_r c_P^{\Theta} \cdot \ln \frac{T}{298}$$

$$\Delta_r G^{\Theta}(T) = \Delta_r H^{\Theta}(T) - T\Delta_r S^{\Theta}(T)$$

$$K(T) = e^{-\frac{\Delta_r G^{\Theta}(T)}{RT}}$$

- Carnot-faktoren er $1 - T_C/T_H$
- Arrheniusligningen er $k = A \cdot e^{-\frac{E}{RT}}$
- Massebalanseligninger for ideelle kjemiske reaktorer:

	Differensiell form	Algebraisk form	Integral form
Sats (batch)	$N_{A0}\frac{dX}{dt} = -r_A V$		$t = N_{A0}\int_0^X \frac{dX}{-r_A V}$
Perfekt blandetank-reaktor (CSTR)		$V = \frac{F_{A0} - F_A}{-r_A}$	
Ideell stempel-strømsreaktor (PFR	$F_{A0}\frac{dX}{dV} = -r_A$		$V = F_{A0}\int_0^X \frac{dX}{-r_A}$