

# Oppgave 1

En fødestrøm med blanda gass inneholder 50% av gass A og 50% av gass B. Disse gassene skal skilles i en membran separator. Gass A er den gass som permeerer hurtigst, mens gass B er den verdifulle gassen vi vil ha så ren som mulig. Dette kan for eksempel være biogass, med andre ord: A = CO<sub>2</sub> og B = CH<sub>4</sub>).

Det er gitt følgende opplysninger om systemet:

Feed stream	$V_{in} = 2 \text{ m}^3(\text{STP}) / \text{min}$	
Feed pressure	$P_r = 10 \text{ bar}$	
Permeate pressure	$P_p = 1 \text{ bar}$	1 bar = 76 cm Hg
Volumetric stage cut	$\theta = 0,53$	
Membrane thickness	$L = 10^{-6} \text{ m}$	
Permeability of A	$P_A = 400 \text{ Barrer}$	1 Barrer = $10^{-10} \text{ cm}^3(\text{STP}) \cdot \text{cm} / (\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{cm Hg})$
Selectivity $P_A/P_B$	$\alpha = 30$	

Antatt ideell blande modell kan prosessen beskrives med bla følgende ligninger:

- «transfer rate equation»

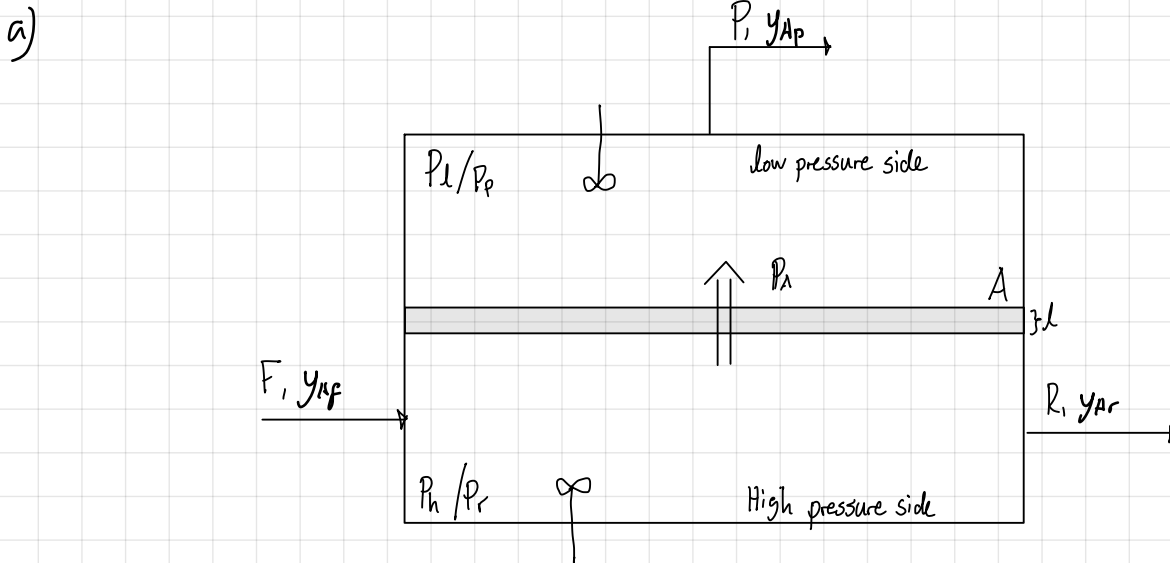
$$J_{Ar} = \frac{y_{Ap} [R(1-y_{Ap})(\alpha-1)+1]}{\alpha - (\alpha-1)y_{Ap}}$$

- «operating line»

$$y_{Ap} = \frac{y_{Ain} - y_{Ar}(1-\theta)}{\theta}$$

- «volumetric flux equation»

$$J_{AV} = \frac{V_{AD}}{A} = \frac{P_{MA}}{L} \Delta p_A \cdot \frac{P_{MA}}{L} (P_r y_{Ar} - P_p y_{Ap})$$



• Ideal mixing

- No concentration gradient along the membrane

(Ideal gas) - No film on surface of membrane  $\Rightarrow$  No gradient towards membrane

$\hookrightarrow$  The only resistance is diffusion through membrane

Transfer rate: Combining the definitions of volumetric and molar flux.

Operating line: Reformulating component balances with stage cut  $\theta = \frac{\dot{V}_p}{\dot{V}_{in}}$

Volumetric flux: Flux through membrane is volume transferred per surface area.

- Tegn en skisse av prosessen med beskrivelser av alle strøm. Forklar hva er ideell blande modell, hvor kommer ligninger fra og hva de beskriver.
- Beregn minimum konsentrasjon vi kan oppnå av komponent A i retentat strømmen. Hvor ren ville den produserte gassen B vært i dette tilfelle?
- Anta at vi klarer å oppnå en konsentrasjon av A i retentatet som er 25% høyere enn den du har beregnet i oppgave a). Hva blir da sammensetningen av permeat strømmen? Hvor mye av komponent B (gi svaret i %) mister vi med permeat strømmen?
- Hvor stort membranareal er nødvendig for å utføre denne separasjonen?

$$b) \quad V_{in} = 2, \quad p_r = 10 \text{ bar}, \quad p_p = 1 \text{ bar}$$

$$\Theta = 0,53 = \frac{V_p}{V_{in}} \Rightarrow V_p = 0,53 V_{in}$$

$$L = 10^{-6} \text{ m}, \quad P_A = 400 \text{ Barner}$$

$$\alpha = \frac{P_A}{P_B} = 30, \quad R = \frac{P_p}{p_r} = \frac{1}{10} = 0,1$$

Ved minimum konsentrasjon er  $\Theta = 1 \Rightarrow$  Treffer  $\Theta$ -line treffer likevektingen

lengst til venstre.  $\Rightarrow V_{in} = V_p \Rightarrow y_{Ap} = y_{Af}$

$$\Rightarrow y_{Ar} = \frac{y_{Ap} [R(1-y_{Ap})(\alpha-1)+1]}{\alpha - (\alpha-1)y_{Ap}} = \frac{0,5 [0,1(1-0,5)(30-1)+1]}{30 - (30-1)0,5} = \underline{\underline{0,079}}$$

Den ville vært 92,1% ren B

$$c) \quad y_{Ar} = 1,25 \cdot 0,079 = 0,09875$$

$$y_{Ap} = \frac{0,5 - 0,09875(1-0,53)}{0,53} = \underline{\underline{0,856}}$$

$$y_{Bp} = 1 - 0,856 = \underline{\underline{0,144}}$$

$$V_{in} = 2, \quad p_r = 10 \text{ bar}, \quad p_p = 1 \text{ bar}$$

$$\Theta = 0,53 = \frac{V_p}{V_{in}} \Rightarrow V_p = 0,53 V_{in} \Rightarrow V_p = 1,06$$

$$L = 10^{-6} \text{ m}, \quad P_A = 400 \text{ Barner}$$

$$\alpha = \frac{P_A}{P_B} = 30, \quad R = \frac{P_p}{p_r} = \frac{1}{10} = 0,1$$

$$\text{Tap: } V_p \cdot y_{Bp} = 0,15264$$

$$\text{Inn: } V_F \cdot y_{Bf} = 2 \cdot 0,5 = 1$$

$$\underline{\underline{\text{Tap\%} = \frac{0,15264}{1} \cdot 100 = 15,3\%}}$$

$$d) \quad J_{AV} = \frac{\dot{V}_{AP}}{A} = \frac{P_A}{L} (P_r y_{Ar} - P_p y_{Ap})$$

$$= \frac{400 \cdot 10^{-10} \text{ cm}^3(\text{STP}) \cdot \text{cm} / \text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{cm} \cdot \text{Hg}}{10^{-6} \text{ m} \cdot \frac{100 \text{ cm}}{\text{m}}} (10 \text{ bar} \cdot 0,09875 - 1 \text{ bar} \cdot 0,856) \cdot \frac{76 \text{ cm Hg}}{\text{bar}}$$

$$= 4,00 \cdot 10^{-3} \frac{\text{cm}^3(\text{STP})}{\text{s} \cdot \text{cm}^2}$$

$$\dot{V}_{AP} = 2 \text{ m}^3(\text{STP})/\text{min} \cdot 0,53 \cdot 0,856 = 0,907 \text{ m}^3(\text{STP})/\text{min} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \cdot \frac{10^6 \text{ cm}^3}{\text{m}^3}$$

$$= 15166,66 \text{ cm}^3(\text{STP})/\text{s}$$

$$A = \frac{\dot{V}_{AP}}{J_{AP}} = \frac{15166}{4 \cdot 10^{-3}} = 379166 \text{ cm}^2 = \underline{\underline{378 \text{ m}^2}}$$

## Oppgave 2

Ved å bruke en molekylsikt, skal vanddamp fjernes fra N<sub>2</sub> gass i en pakket kolonne ved 28°C.

Kolonns høyde er 0.3 m, og bulk tettheten av partiklene er 712.8 kg/m<sup>3</sup>. Den opprinnelige

konsentrasjonen av vann i partiklene i kolonna er 0.01 kg H<sub>2</sub>O/kg partikler, og massehastigheten av

N<sub>2</sub>-gassen er 4052 kg/(m<sup>2</sup>·h). Vann konsentrasjonen i gassen er ved innløp c<sub>0</sub> = 926 × 10<sup>-6</sup> kg H<sub>2</sub>O

/kg N<sub>2</sub>

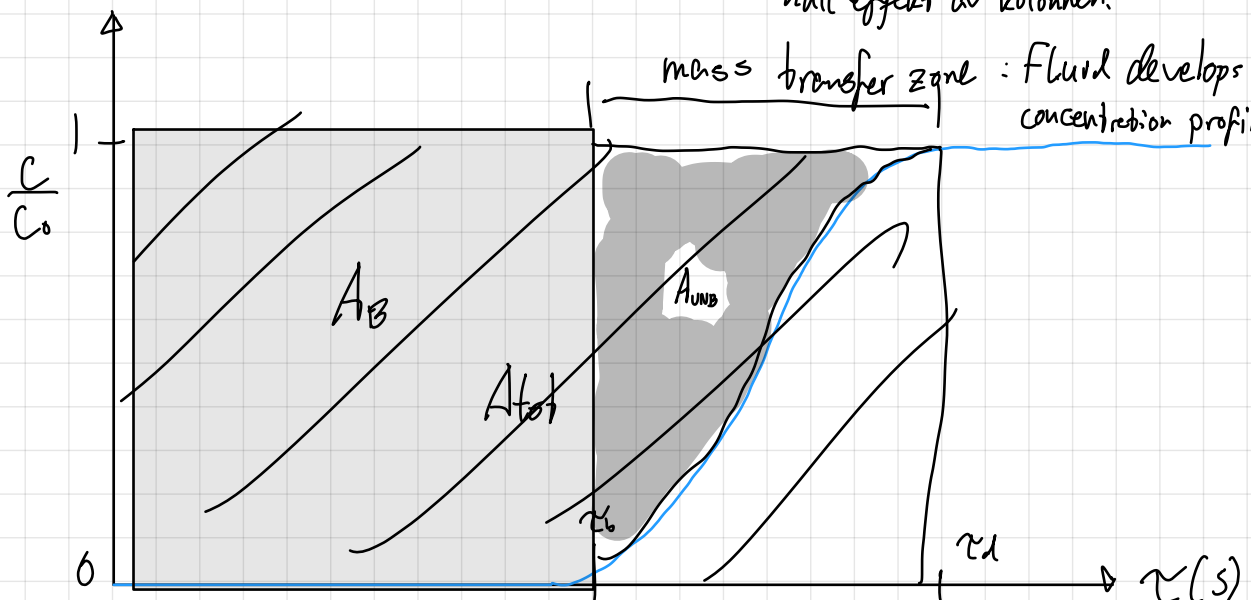
«The break through» data for masseoverføringsonen er gitt i tabellen under. En verdi for c/c<sub>0</sub> = 0.02 er antatt for å være «the break point».

tid t [h]	0	9.0	9.2	9.6	10.0	10.4	10.8	11.3	11.5	12.0	12.5	12.8
Konsentrasjon c [kgH <sub>2</sub> O/kgN <sub>2</sub> × 10 <sup>6</sup> ]	<0.6	0.6	2.6	21	91	235	418	630	717	855	906	926

- Skisser typisk «break through» kurve c/c<sub>0</sub> som funksjon av tid. Beskriv aksene og forklar betydningen av forskjellige punkter og områder i figuren.
- Forklar hvilke fysiske prosesser påvirker formen på kurven?
- Bestem tiden frem til «break point» t<sub>b</sub>, og høyden på ubrukt kolonne H<sub>UB</sub> antatt følgende relasjon for forholdet mellom høyden på brukt kolonne H<sub>B</sub> og total høyde på kolonnen gjelder:

$$\frac{H_B}{H_T} = \frac{t_b}{t_{tot}}$$

- Forklar hvordan forholdet brukt under c blir utledet fra «break-through» kurven?



y-akse: konsentrasjonen ut av kolonna  
delt på konsentrasjonen ut

x-akse: tid etter at strømmen ble slått på

t<sub>b</sub>: breakthrough time, tidspunktet når

vann kom gjennom kolonne

t<sub>d</sub>: Når tilnærmet all vann inn går ut.  
null effekt av kolonnen.

$A_B$ : Used bed capacity

$A_{UNB}$ : Unused bed capacity

b) • Adsorption equilibrium = Adsorption isotherm

• Flow regime

• Mass transfer

• Diffusion from bulk to surface

• Diffusion in the pores

• Surface diffusion

c)  $t_b$  er nær  $\frac{c}{c_0} = 0,02$ ,  $c_0 = 926 \cdot 10^{-6} \text{ kg H}_2\text{O} / \text{kg N}_2$

tid $t$ [h]	0	9.0	9.2	9.6	10.0	10.4	10.8	11.3	11.5	12.0	12.5	12.8
Konsentrasjon $c$ [ $\text{kgH}_2\text{O}/\text{kgN}_2 \times 10^6$ ]	<0.6	0.6	2.6	21	91	235	418	630	717	855	906	926
	$\approx 0$	$\approx 0$	0,0028	0,0226	0,096	0,25	0,46	0,68	0,774	0,923	0,978	

Uellon  $t = 9,2$  og  $9,6$

$$\text{Finner: } \frac{0,226 - 0,0028}{0,4} = a = \frac{21 - 2,6}{0,4 \cdot 926}$$

$$y - y_0 = a(x - x_0) \Rightarrow x = \frac{0,02 - 2,6/926}{a} + 9,2 = 9,55 \text{ h}$$

$$\underline{t_b = 9,55 \text{ h}}$$

~~$$H_B = \frac{t_b \cdot H_T}{t_{tot}} = \frac{9,55 \cdot 0,3}{12,8} = \underline{0,22 \text{ m}}$$~~

$$A_b \approx t_b \cdot I$$

$$\text{Linear regression from } t_b \rightarrow t_d \Rightarrow A_{UNB} = \frac{(t_d - t_b) \cdot I}{2}$$

$$A_T = A_b + A_{UNB} = t_b \cdot I + \frac{t_d - t_b}{2} \cdot I = \frac{t_b + t_d}{2} \cdot I$$

$$\text{And } A_T = t_{tot} \cdot I$$

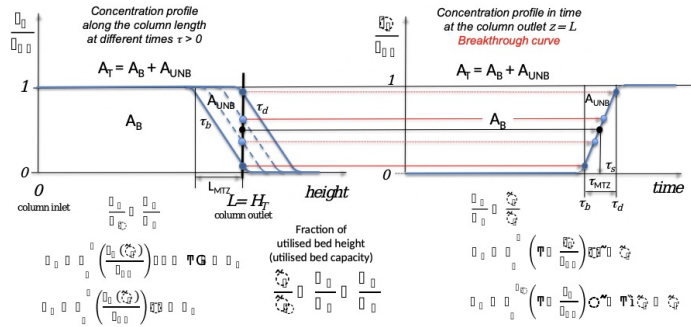
$$\Rightarrow t_{tot} = \frac{t_b + t_d}{2} = \frac{9,55 + 12,8}{2} = 11,19 \text{ h} \Rightarrow H_b = \frac{t_b \cdot H_T}{t_{tot}} = \frac{9,55}{11,19} \cdot 0,3 = \underline{0,257 \text{ m}}$$

$$H_{UNB} = H_T - H_b = 0,3 - 0,257 = \underline{0,043 \text{ m}}$$

d) Ratio used bed, unused bed is related to  $A_B, A_{UNB}$

d) Explain how the ratio used under c is deduced from the break-through curve? 4p

### Capacity of a column from breakthrough curve



How the ratio between the utilized bed height and the total bed height is related to the ratio between the area corresponding to utilized bed and the total area could be seen from the concentration profiles along the column at breakthrough time  $\tau_b$  and at full saturation of the column  $\tau_d$ .

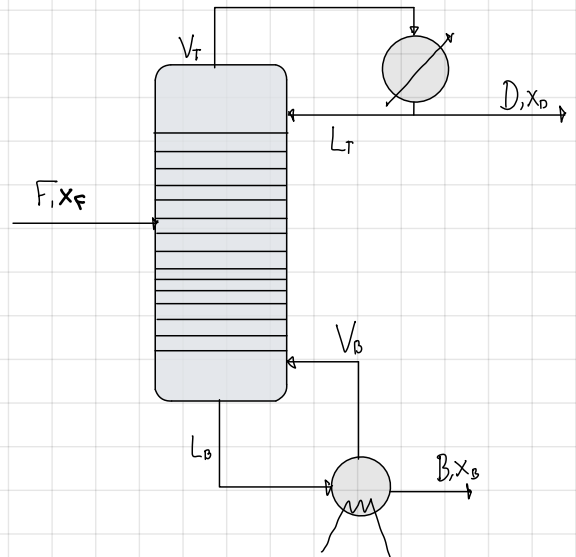
The figure above illustrates how these "spacial" concentration profiles (on the left-hand side) are linked to the concentration time profile at the outlet of the column (on the right-hand side) where the later are the type of data we usually have available. The areas under the outlet concentration time profile up to the time  $t_b$  and the time  $t_d$  will correspond to the utilized bed area and total bed area respectively.

## Oppgave 3

A mixture of 35 mol% benzene and 65 mol% toluene is separated in a distillation tower at atmospheric conditions. The feed is a saturated liquid. The feed flow is 100 kmol/h. The distillate should be 95 mol% benzene (with a total condenser), while the bottom product (liquid) should be 90 mol% of toluene. The x-y diagram of the benzene-toluene system is given in the attachment 1. Please:

- Draw a process flow diagram including the product flows (D, B) and internal flows ( $L_T, V_T, L_B, V_B$ ). (3%)
- Determine D and B in the process. (3%)
- Find graphically the minimum number of equilibrium stages ( $N_{min}$ ). (2%)
- Find the minimum reflux ( $R_{min}$ ). (4%)
- Use the McCabe-Thiele method to determine the number of equilibrium stages N and determine the optimal feed-stage location ( $R=1.4R_{min}$ ). (10%)
- Compute the required energy consumption ( $\Delta H_{vap}$  for benzene and toluene are 34 kJ/mol and 38 kJ/mol, respectively). (8%)

a)



a) Gitt  $F = 100, x_D = 0,95, x_B = 0,1$