

**Oppgave 1/Oppgave 1: DIFFUSJON – MEMBRAN – DIALYSE 25% vekt**

En membran dialyse prosess settes opp for å gjenvinne et løst stoff A (solute) fra en fortynta løsning. Nødvendige opplysninger for å løse oppgaven er gitt under på engelsk.

- Skisser systemet hvor du tegner inn konsentrasjonsprofilene i løsningen på begge sider av membranen, og gjennom membranen - benytt informasjonen gitt under.
- Beregn de individuelle motstandene og den totale motstand for prosessen. Hvor stor er membranens %-vise motstand?
- Beregn fluksen ( $N_A$ ) ved steady-state og det totale areal i  $m^2$  for å overføre 0,01 kmol A/time
- Hva skjer med systemet (fluks og motstander) dersom strømningshastigheten dobles på begge sider av membranen? Begrunn svaret ditt – beregninger er ikke nødvendig.

**Gitt for systemet / Given for the system:**

Concentration on side 1,  $c_1=2,0 \times 10^{-2}$  kmol A/  $m^3$

Concentration of A on side 2,  $c_2=0,3 \times 10^{-2}$  kmol A/  $m^3$

Distribution coefficient,  $K'=0,75$  where  $K'=c_s/c_l$

Membrane thickness,  $L=1,6 \times 10^{-5}$  m

Diffusion coefficient in the membrane,  $D_{AB}=3,5 \times 10^{-11}$   $m^2/s$

Membrane permeability,  $p_M=(D_{AB} \cdot K')/L$

Mass transfer coefficients in the dilute solutions,  $k_{c1}=3,5 \times 10^{-5}$  m/s and  $k_{c2}=2,1 \times 10^{-5}$  m/s

General flux equations: in the solutions:  $N_A = k(c - c_i)$

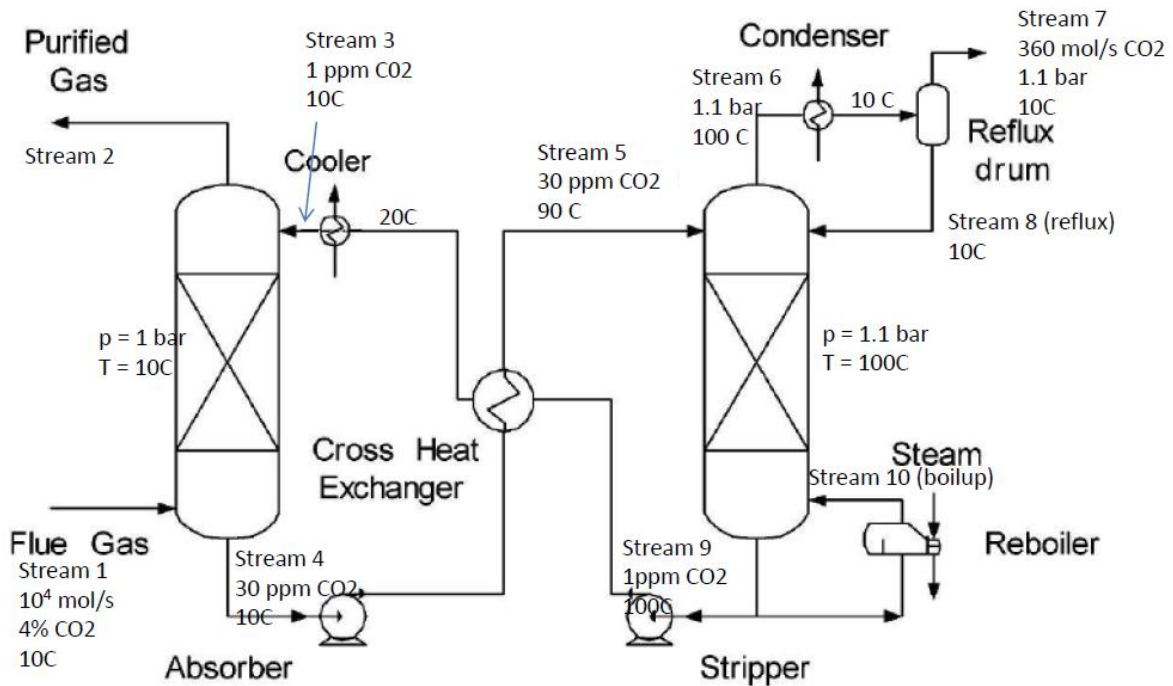
in the membrane:  $N_A = (D_{AB}/l)(c_{1is} - c_{2is})$

**Problem 1, English text: Diffusion – membrane – dialysis 25% weight**

A membrane process is set up to recover solute A from a dilute solution. Information for the system is given above under the Norwegian text.

- Make a sketch of the system where you draw the concentration profiles in the solution on both sides of the membrane and through the membrane – use the information given above.
- Calculate the individual resistances and the total resistance for the process. How large is the membrane resistance given as % of the total resistance?
- Calculate the flux ( $N_A$ ) at steady-state, and the total area ( $m^2$ ) needed to transfer 0,01 kmol A/h
- What happens to the system (the flux, the resistances) if the liquid flow velocity is doubled on both sides of the membrane? (No calculations needed, but give good explanations.)

## Oppgave 2/Oppgave 2: ABSORPSJON OG STRIPPING 32% vekt



Vi ser på CO<sub>2</sub>-fangst fra et 170 MW gasskraftverk der forbrenningsgassen (10 kmol/s) inneholder 4 mol% CO<sub>2</sub> (resten er ikke-kondenserbare komponenter som N<sub>2</sub> og O<sub>2</sub>). Det er et krav om å fjerne 90% av innkommende CO<sub>2</sub>. Vi skal se på en prosess som bruker rent vann som absorbent, dvs. uten amintilsats. Vi vet at dette ikke er en realistisk prosess, og vi ønsker å forstå hvorfor. I denne oppgaven skal vi se på absorberen og den partielle kondensatoren i stripperen.

Data er gitt under og på figur (alle fraksjoner er på molbasis). Angi ytterligere antagelser du gjør for å løse oppgaven.

(a) Absorpsjonskolonne.

- (i) Finn mengde forbrenningsgass (strøm 1) i m<sup>3</sup>/s. Hva er nødvendig kolonnediameter hvis gasshastigheten for tomt tårn er 1 m/s?
- (ii) Finn vannmengden L (i strøm 3 og 4). Gi svaret for L i mol/s, kg/s og m<sup>3</sup>/s. Hva er varmeeffekten (Q in MW) for kryss-varmeveksleren (cross heat exchanger)? Kommenter på om svaret er rimelig med tanke på å bygge et slikt anlegg.
- (iii) Bruk en grafisk metode (McCabe-Thiele) til å bestemme det nødvendige antall teoretiske trinn i absorpsjonskolonnen.
- (iv) Vi vurderer å bruke en fylt kolonne. Hva er nødvendig pakningshøyde når det er gitt at  $K_y a = 0.066 \text{ kmol/s, m}^3$ ?
- (v) Hva er minimum vannmengde ( $L_{\min}$ ) med uendelig antall trinn (eller uendelig pakningshøyde)?

(b) Flash i refluksstanken. Finn mengde og sammensetning av strømmene 6, 7 og 8. Hva er kjøleeffekten i kondensatoren (i MW)? Du kan anta at partialtrykket av vann i strøm 6 er 1 bar.

*Some data (you may not need all of this):*

Henry's law for CO<sub>2</sub>.  $p_{\text{CO}_2} = H x_{\text{CO}_2}$  where  $H = 1000$  bar at 10C and  $H = 5000$  bar at 100C.

Vapor pressure for water:  $p^{\text{sat}} = 0.012$  bar at 10C and  $p^{\text{sat}} = 1$  bar at 100C.

Heat of vaporization for water at 100C: 40.7 kJ/mol

Heat capacity for water: 4.18 kJ/kg,K (liquid) and 1.87 kJ/kg,K (gas).

Heat capacity for CO<sub>2</sub>: 37 J/K,mol (gas)

Molecular weights [g/mol]: 44 for CO<sub>2</sub> and 18 for water

Density water: 1000 kg/m<sup>3</sup>

$R = 8.31$  J/K,mol

Assuming straight equilibrium and operating lines:

$n_A$  [mol/s] =  $K_y a S z (y-y^*)_{\text{LM}}$ , where  $(y-y^*)_{\text{LM}} = [(y-y^*)_1 - (y-y^*)_2] / \ln[(y-y^*)_1 / (y-y^*)_2]$

## **Problem 2: ABSORPTION AND STRIPPING.      32% weight**

We consider CO<sub>2</sub> removal from a 170 MW gas fired power plant where the flue gas (10 kmol/s) contains 4 mol% CO<sub>2</sub> (the rest is non-condensable components, like N<sub>2</sub> and O<sub>2</sub>). It is required to remove 90% of the incoming CO<sub>2</sub>. We consider a process using pure water as the absorbent, that is, without amine addition. We know that this process is not very realistic, and we want to understand why. In this problem you shall consider the absorber and the partial condenser for the stripper column.

*Data are given above and in the figure (all fractions are on mole basis).*

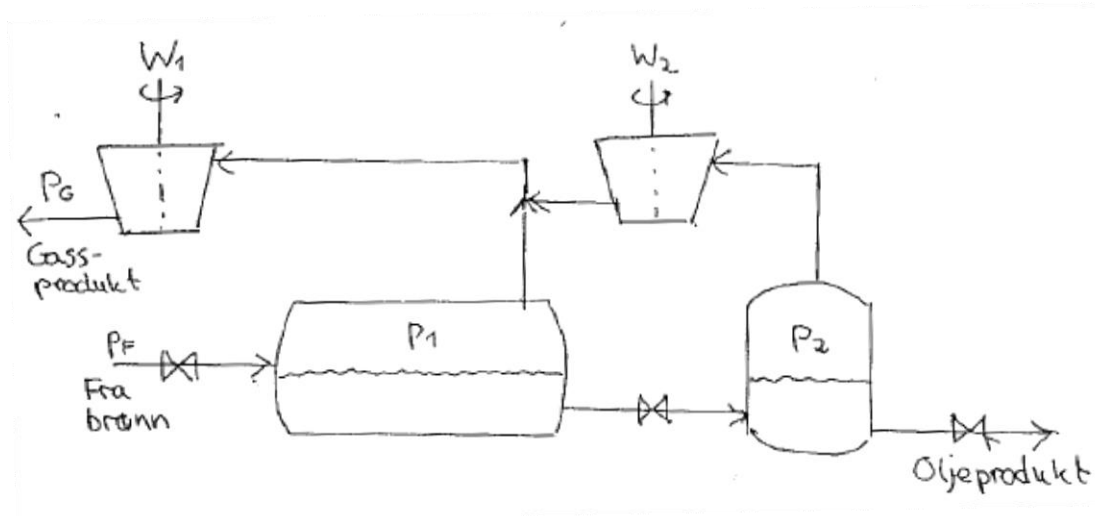
*Specify any other assumptions you make when solving the problem.*

(a) Absorption column.

- (i) Find the amount of flue gas (stream 1) in m<sup>3</sup>/s. What is the required tower diameter if the gas velocity (empty tower) should be 1 m/s?
- (ii) Find the required water flow L (in stream 3 and 4). You can neglect evaporation of water in the absorber. Give your answer for L in mol/s, kg/s and m<sup>3</sup>/s. What is the heat duty (Q in MW) for the cross heat exchanger? Comment on whether you find the result reasonable for actual implementation.
- (iii) Use a graphical solution (McCabe-Thiele) to find the required number of theoretical stages in the absorber.
- (iv) We consider using a packed column. What is the required packing height given that  $K_y a = 0.066$  kmol/s,m<sup>3</sup> ?
- (v) What is the minimum amount of water ( $L_{\text{min}}$ ) with an infinite number of stages (or infinite packing height)?

(b) Reflux flash drum. Find the flows and compositions of streams 6, 7 and 8. What is the cooling duty of the condenser (in MW)? You can assume that the partial pressure of water in stream 6 is 1 bar.

### Oppgave 3/ Oppgave 3. PROSESSREGULERING (18%)



Typical data:  $p_f = 50$  bar,  $p_1 = 30$  bar,  $p_2 = 3$  bar,  $p_G = 100$  bar

I en prosess for å separere olje og gass fra en produksjonsbrønn (se figur) er det ønskelig å regulere nivå og trykk i de to separatorene samt trykket av gassproduktet.

- Klassifiser variablene
- Foreslå et reguleringsopplegg (vis på en figur)
- Vanligvis brukes PI regulatorer. Forklar hensikten med integralvirkningen. Integraltiden velges ofte lik prosessens tidskonstant  $\tau$ . Forklar hvordan man kan finne  $\tau$  eksperimentelt.

### Problem 3. PROCESS CONTROL (18%)

Consider a process for separating oil and gas from a production well (see Figure). We want to control level and pressure in the two separators, plus pressure of the gas product.

- Classify the variables
- Suggest a control structure (show on a figure)
- We normally use PI controllers. Explain the purpose of the integral action. The integral time is often selected equal to the process time constant  $\tau$ . Explain how one can find  $\tau$  experimentally.

#### Oppgave 4 TØRKING (25%)

- Den viktigste faktor ved tørkeprosesser er tiden det tar å tørke fra et gitt fritt vanninnhold  $X_1$  til der vi ønsker å være,  $X_2$ . Skisser en typisk tørkekurve hvor vi har tørkeraten ( $R$ ) som funksjon av fritt vann ( $X$ ). Forklar med tekst hva som skjer under tørkeprosessen.
- Et granulært materiale (dvs. kuler) tørkes i en brett-tørker med luft som kommer inn med en temperatur på  $60^\circ\text{C}$  – luftas våtkuletemperatur er  $29^\circ\text{C}$ . Hvor mye fuktighet inneholder tørkelufta (kg  $\text{H}_2\text{O}$  / kg tørr luft) ved innløp? Om vi antar at tørkeprosessen skjer adiabatisk, og lufta inneholder 90% fuktighet ved utløp, hva er nå temperaturen på lufta? Use the attached diagram to write on, and turn it in with your answer
- Brettet har et areal på  $1 \text{ m}^2$  og skal produsere 12 kg tørt materiale. Kulene har ved start et vanninnhold på  $0,35 \text{ kg H}_2\text{O} / \text{kg tørt materiale}$  – de skal tørkes til  $0,15 \text{ kg H}_2\text{O} / \text{kg tørt materiale}$  som er likevekts vanninnhold ( $X^*$ ). Det kritiske vanninnhold ( $X_c$ ) er  $0,22 \text{ kg H}_2\text{O} / \text{kg tørt materiale}$ . Det tar  $0,5$  time å komme ned til  $X_c$ . Skisser hvordan denne tørkekurven ser ut med gitte verdier, når vi også antar at tørkeprosessen er kapillærkontrollert i området fra  $X_c$  til  $X^*$ . Finn den konstante tørkeraten,  $R_c$
- Utledd uttrykket for tørketiden i den fallende delen av prosessen, og beregn tiden for denne del av tørkeprosessen når vi antar at tørkeraten er en lineær funksjon gjennom origo. Hva blir total tørketid?

#### Gitt for oppgaven /Given for the problem:

The general drying equation:  $= -\frac{L_S}{A} \frac{dX}{dt}$

where  $R$  = drying rate [ $\text{kg H}_2\text{O} / \text{h m}^2$ ],  $L_S$  = kg dry solids,  $A$  = area of dryer [ $\text{m}^2$ ],  
 $dX/dt$  = amount  $\text{H}_2\text{O}$  removed per time

#### Problem 4, English text: DRYING (25%)

- The most important factor in a drying process is the time it takes to dry a material from a given free water content  $X_1$  to where we want to end up,  $X_2$ . Sketch a typical drying curve with the drying rate  $R$  as function of free water content ( $X$ ). Explain in words what is happening during the drying process.
- A granular material (spheres) is being dried in a tray dryer with air of temperature  $60^\circ\text{C}$  – the wetbulb temperature of the air is  $29^\circ\text{C}$ . What is the humidity (kg  $\text{H}_2\text{O}$  / kg dry air) of the air at inlet? If we assume adiabatic drying process, and that the humidity is 90% at outlet, what is now the temperature of the air? Use the attached diagram to write on, and turn it in with your answer.
- The tray dryer has an area of  $1 \text{ m}^2$  and will produce 12 kg of dry material. The spheres have at start a water content of  $0,35 \text{ kg H}_2\text{O} / \text{kg dry material}$  – it is to be dried to  $0,15 \text{ kg H}_2\text{O} / \text{kg dry material}$  which is also then the equilibrium water content ( $X^*$ ). The critical water content ( $X_c$ ) is  $0,22 \text{ H}_2\text{O} / \text{kg dry material}$ . It takes  $0,5$  hour to get down to  $X_c$ . Sketch how this drying curve looks with the given information, when we assume the drying process is capillary controlled in the region from  $X_c$  to  $X^*$ . Find the constant drying rate,  $R_c$ .
- Derive the equation for the time,  $t$ , in the falling rate period, and calculate the time for this part when we assume that the drying rate is a linear function through origo. What is then the total drying time?

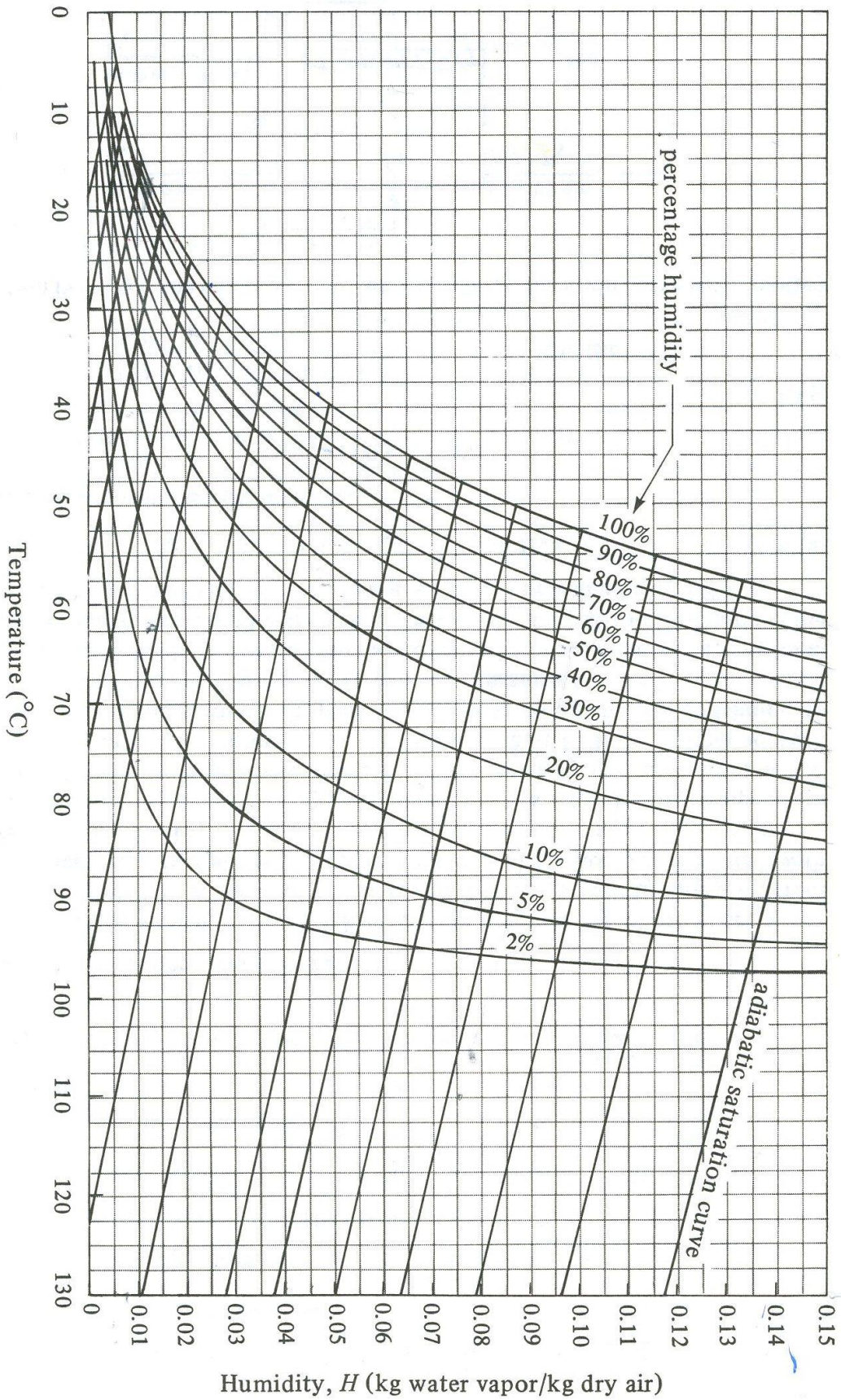


FIGURE 9.3-2. Humidity chart for mixtures of air and water vapor at a total pressure of 101.325 kPa (760 mm Hg). (From R. E. Treybal, *Mass-Transfer Operations*, 3rd ed. New York: McGraw-Hill Book Company, 1980. With permission.)