

Institutt for kjemisk prosessteknologi

## **Eksamensoppgave i TKP 4105 SEPARASJONSTEKNIKK**

Faglig kontakt under eksamen: May-Britt Hägg, mobil: 930 80834

Sigurd Skogestad, mobil: 913 71669

Eksamensdato: 04.12.2014

Eksamenstid (fra-til): 09:00 – 13:00

Hjelpemiddelkode/Tillatte hjelpemidler:

Ingen trykte eller håndskrevne hjelpemidler tillatt. Bestemt enkel kalkulator tillatt (kode D)

Annen informasjon: Diagram i Vedlegg 1 skal leveres inn med oppgaven /

(Diagram in Attachment 1 to be turned in with the solution)

Målform/språk: Norsk/Nynorsk - Engelsk

Antall sider (uten forside): 6

Antall sider vedlegg: 3 (2 vedlegg)

**Kontrollert av:**

\_\_\_\_\_ (for Skogestad)

\_\_\_\_\_ (for Hägg)

Dato

Sign

Dato

Sign

## NORSK / NYNORSK TEKST

### Oppgave 1 / Oppgave 1 (Ekstraksjon, 20%)

En vandig løsning ( $L=1000$  kg/h) fra tobakksavfall inneholder 30 g nikotin pr.kg vann. Nikotinen skal ekstraheres i motstrøm med parafin (V). Parafin og vann er praktisk talt uløselig i hverandre. Likevekten ved den aktuelle temperatur er gitt ved

$$y \text{ [kg nikotin/kg parafin]} = m * x \text{ [kg nikotin/kg vann]}$$

der  $m=2.8$ .

- Hva er den minste mengden parafin [kg/h] som kan brukes hvis 99% av nikotinen skal overføres fra vannfasen til parafinfasen.
- Det benyttes to likevektstrinn og mengde parafin er  $V= 600$  kg/h. Tegn et flytskjema av prosessen og bestem de fire ukjente sammensetningene ( $x_1, x_2, y_1, y_2$ ). Hvor mye av nikotinen (i %) overføres fra vannfasen til parafinfasen?

Kommentar: Oppgaven anbefales løst analytisk med utgangspunkt i massebalanser for de to likevektstrinnene.

### Oppgave 2 / Oppgave 2 (Fuktighetsdiagram og bakgrunn, 25%)

En fuktig luft av temperatur  $57.5^\circ\text{C}$  (tørrkuletemperatur) har et fuktighetsinnhold på  $0.030$  kg  $\text{H}_2\text{O}$  / kg tørr luft. (Den fuktige lufta er ved standard trykk 1 bar.)

- Bestem, ved å benytte vedlagte fuktighetsdiagram, prosent fuktighet ( $H_P$ )
- Definer (med symboler) fuktighet (H), metningsfuktighet ( $H_S$ ), prosent fuktighet ( $H_P$ ), og prosent relativ fuktighet ( $H_R$ )
- Beregn  $H_S$  og  $H_P$  ved å benytte gitt informasjon, vedlagte tabell A2.9 og dine definisjoner i b). Er din beregnede verdi i overenstemmelse med ditt svar i a)?
- Definer duggpunkt , og finn duggpunktet for den gitte fuktige lufta (fra fuktighetsdiagrammet). Dersom tørkeprosessen skulle skje i et adiabatisk metningskammer, hva ville da luftas temperatur være ved 90% metning?
- Illustrer med en skisse en typisk tørkekurve hvor tørkeraten er en funksjon av fritt vanninnhold, og indiker på kurven hvilke mekanismer som kontrollerer tørkeraten.

Gitt: Molekylvekt  $\text{H}_2\text{O} = 18$  kg/kmol, Molekylvekt luft =  $29$  kg/kmol

*NB: svarene for a) og d) må vises ved å trekke linjer i fuktighetsdiagrammet som skal leveres med oppgaven.*

Vedlegg 1: Fuktighetsdiagram – skal leveres inn med besvarelsen

### Oppgave 3 / Oppgave 3 (Diverse, 30%)

- (a) (3%) Nevn fordeler og ulemper med absorpsjon i medstrøm kontra i motstrøm.
- (b) (3%) Hva er grunnen(e) til at det kan oppstå «flooding» i en destillasjonskolonne?
- (c) (9%) Vi har en tank med en væskeføde ( $q_{in}$ ) og ett væskeprodukt ( $q_{out}$ ).
- Vis at volumet av væske i tanken ( $V$ ) kan beskrives av ligningen  $dV/dt = q_{in} - q_{out}$  [ $m^3/min$ ]. Hvilke antagelser må gjøres?
  - Anta at det brukes en proporsjonalregulator,  $q_{out} = K_c V$  med  $K_c = 0.1 \text{ min}^{-1}$ . Tegn et flytskjema med prosess og regulator (LC).
  - Hva er stasjonærverdien av  $V$  når  $q_{in} = q_{out} = 1 \text{ m}^3/min$ ? Hva er stasjonærverdien av  $V$  når  $q_{in} = q_{out} = 1.5 \text{ m}^3/min$ ? Hvordan ville dette ha endret hvis regulatoren hadde integralvirkning?
  - Med den gitte proporsjonalregulatoren: Skisser responsen (dynamisk) for hvordan  $V$  og  $q_{out}$  endres når det skjer et sprang i  $q_{in}$  fra 1 til  $1.5 \text{ m}^3/min$  (Tips for  $q_{out}$ : Omskriv ligningen på formen  $\tau dy/dt = -y + k d$ , der  $y = q_{out}$  og  $d = q_{in}$ . Hva er tallverdien av  $\tau$  og  $k$ ?).
- (d) (15%) En væskeføde ( $F = 10 \text{ mol/s}$ ) med 10 mol% etan (L) og 90 mol% butan (H) skal separeres i to produkter (V og L) en flashtank der det tilføres varme. Anta ett likevektstrinn og konstant relativ flyktighet  $\alpha$ .
- Bestem mengden og sammensetningen av produktene (V og L) når det er gitt at væskeproduktet (L) skal inneholde 1 mol% etan.
  - Hvor mye varme (Q) må tilføres?
  - Tegn flytskjema med forslag til reguleringsystem (med LC, PC, CC).

Data: Gitt  $\alpha = (y_L/x_L)/(y_H/x_H) = 280$ . Trykket i flashtanken er 2 bar. Fordamningsvarmen kan regnes lik  $16 \text{ kJ/mol}$ .

#### Oppgave 4 / Oppgave 4 (Osmotisk – revers osmotisk prosess, 25%)

- a) 1) Forklar med skisse hvordan et osmotisk trykk ( $\pi$ ) bygges opp.
- 2) Forklar hva som forstås med revers osmose. Vis med piler strømningsretning på vannfluks ( $N_w$ ) og saltfluks ( $N_s$ )
- 3) Gi eksempler på en prosess hvor vi har *fordel* av et osmotisk trykk

En revers osmose prosess skal benyttes for å produsere ferskvann om bord på et skip. Friskt sjøvann inneholder 3.5vekt% NaCl. Ferskvannet bør ikke inneholde over 0.1 kg NaCl/m<sup>3</sup>. Sjøvannets temperatur er 4°C. Øvrige data for prosessen er gitt under og i vedlegg 2.

- b) Beregn det osmotiske trykk. Presiser eventuelle antagelser du gjør.
- c) Hvilken retensjon (R) må den membranen ha som skal brukes?
- d) Beregn vannfluksen,  $N_w$  [kg H<sub>2</sub>O / (s·m<sup>2</sup>)], for membranen som benyttes
- e) Beregn nødvendig membranareal for å produsere 15000 liter ferskvann i døgnet

Gitt: Vannets permeabilitetskoeffisient,  $A_w = 3.04 \cdot 10^{-4}$  kg H<sub>2</sub>O / (s m<sup>2</sup> bar)

Tilgjengelig trykk for prosessen,  $\Delta P = 55$  bar

Vannets flukslikning er:  $N_w = A_w (\Delta P - \Delta \pi)$

Likning for beregning av det osmotiske trykk,  $\pi = (n/V_m)RT$

Hvor  $n$  = antall mol av løst stoff

$V_m$  = volum av rent løsningsmiddel (her vann)

$T$  = temperatur, K

Molekylvekt for NaCl = 58.45 kg/kmol

Vedlegg 2: Table A2-3 Density of water, and Table A1-1 Gas Law Constant, R

## ENGLISH TEXT

### Problem 1 (Extraction, 20%)

An aqueous solution ( $L=1000$  kg/h from tobacco waste contains 30 g nicotine per kg water. The nicotine is to be extracted in countercurrent with paraffin ( $V$ ). Water and paraffin are essentially immiscible in each other. The equilibrium at the temperature of operation is given by

$$y \text{ [kg nicotine/kg paraffin]} = m * x \text{ [kg nicotine/kg water]}$$

where  $m=2.8$ .

- What is the minimum amount of paraffin [kg/h] we can use when 99% of the nicotine should be transferred from the water phase to the paraffin phase.
- We have two equilibrium stages and the amount of paraffin is  $V= 600$  kg/h. Make a flow sheet of the process and find the four unknown compositions ( $x_1, x_2, y_1, y_2$ ). How much of the nicotine (in %) is transferred from the water phase to the nicotine phase?

Comment: It is suggested to solve the problem analytically based on mass balances for the two equilibrium stages.

### Problem 2 – (the humidity chart and background for drying , 25%)

An air-water vapor mixture going to a drying process has a dry bulb temperature of  $57.5^\circ\text{C}$  and a humidity of  $0.030$  kg  $\text{H}_2\text{O}$  / kg dry air. (The humid air is at standard pressure, 1 bar.)

- Using the humidity chart, find the percentage humidity ( $H_P$ )
- Define (with symbols) humidity ( $H$ ), saturation humidity ( $H_S$ ), percentage humidity ( $H_P$ ), and percentage relative humidity ( $H_R$ )
- Using the given information, the attached table A2.9 and your definitions in b), *calculate*  $H_S$  and  $H_P$ . Is your calculated value in agreement with your answer in a)?
- Define the dew point, and give the dew point for this gas mixture (from humidity chart). If the drying process was to take place in an adiabatic saturation chamber, what would the temperature of the air be at 90% saturation?
- Illustrate by a sketch a typical drying curve where the drying rate is a function of free moisture content, and indicate on the curve which mechanisms are controlling the drying rate.

Given: Molecular weight  $\text{H}_2\text{O} = 18$ , molecular weight of air = 29

Attachment 1: The answers for a) and d) must be shown by drawing the lines in the humidity chart. The chart must be turned in with your answers.

### Problem 3 (Various, 30%)

- (a) (3%) For absorption, state advantages and disadvantages of using cocurrent flow versus countercurrent flow.
- (b) (3%) Give reasons for why flooding may occur in a distillation column.
- (c) (9%) We have a tank with a liquid feed ( $q_{in}$ ) and a liquid product ( $q_{out}$ ).
- Show that the volume of liquid in the tank ( $V$ ) is given by the equation  $dV/dt = q_{in} - q_{out}$  [ $m^3/min$ ]. Which assumptions do we need to make?
  - Assume that we use a proportional controller,  $q_{out} = K_c V$  with  $K_c = 0.1 \text{ min}^{-1}$ . Make a flowsheet with the process and controller (LC).
  - What is the steady state value of  $V$  when  $q_{in} = q_{out} = 1 \text{ m}^3/min$ ? What is the steady state value of  $V$  when  $q_{in} = q_{out} = 1.5 \text{ m}^3/min$ ? How would this change if we used integral action in the controller?
  - With the given proportional controller, sketch the response (dynamic) for how  $V$  and  $q_{out}$  change where there is a step change in  $q_{in}$  from 1 to  $1.5 \text{ m}^3/min$  (Hint for  $q_{out}$ : Rearrange the equation to the form  $\tau dy/dt = -y + k d$ , where  $y = q_{out}$  and  $d = q_{in}$ . What are the numerical values for  $\tau$  and  $k$ ?).
- (d) (15%) A liquid feed ( $F = 10 \text{ mol/s}$ ) with 10 mol% ethane (L) and 90 mol% butane (H) should be separated into two products (V and L) in a flash tank where heat is supplied. Assume one equilibrium stage and constant relative volatility  $\alpha$ .
- Find the amount and composition of the products (V and L) when it is given that the liquid product (L) should contain 1 mol% ethane.
  - How much heat (Q) must be supplied?
  - Make a flow sheet and propose a control system (with LC, PC, CC)

Data: Given  $\alpha = (y_L/x_L)/(y_H/x_H) = 280$ . The pressure in the flash tank is 2 bar. The heat of vaporization is approximately 16 kJ/mol.

## Problem 4 (Osmosis - Reverse Osmosis, 25%)

- a) 1) Explain with illustrations how an osmotic pressure is being built up.
- 2) Explain what is understood with reverse osmosis. Illustrate with arrows the directions of the water flux ( $N_w$ ) and the salt flux ( $N_s$ )
- 3) Give an example of a process where we have *the advantage* of an osmotic pressure

A reverse osmotic process is used to produce fresh water on board a ship. Fresh sea water contains 3.5 w% NaCl. The produced fresh water should not contain more than 0.1 kg NaCl/m<sup>3</sup>. The sea water temperature is 4°C. Additional data for the process is given below and in Attachment 2.

- b) Calculate the osmotic pressure. Comment any assumptions you make.
- c) Which retention (R) is needed for the membrane to be used?
- d) Calculate the water flux,  $N_w$  [kg H<sub>2</sub>O / (s m<sup>2</sup>)], for the membrane used
- e) Calculate necessary membrane area to produce 15000 liter of fresh water per 24 hours

Given: Water permeability coefficient,  $A_w = 2.04 \cdot 10^{-4}$  kg H<sub>2</sub>O / (s m<sup>2</sup> bar)

Available pressure for the process,  $\Delta P = 55$  bar

Flux equation for the water:  $N_w = A_w (\Delta P - \Delta \pi)$

Equation for calculation of the osmotic pressure,  $\pi = (n/V_m) \cdot RT$

Where n = number of moles solute

$V_m$  = volume of pure solvent (water)

R = gas constant

T = temperature, K

Molecular weight for NaCl = 58.45 kg/kmol

Attachment 2: Table A2-3 Density of water, and Table A1-1 Gas Law Constant, R

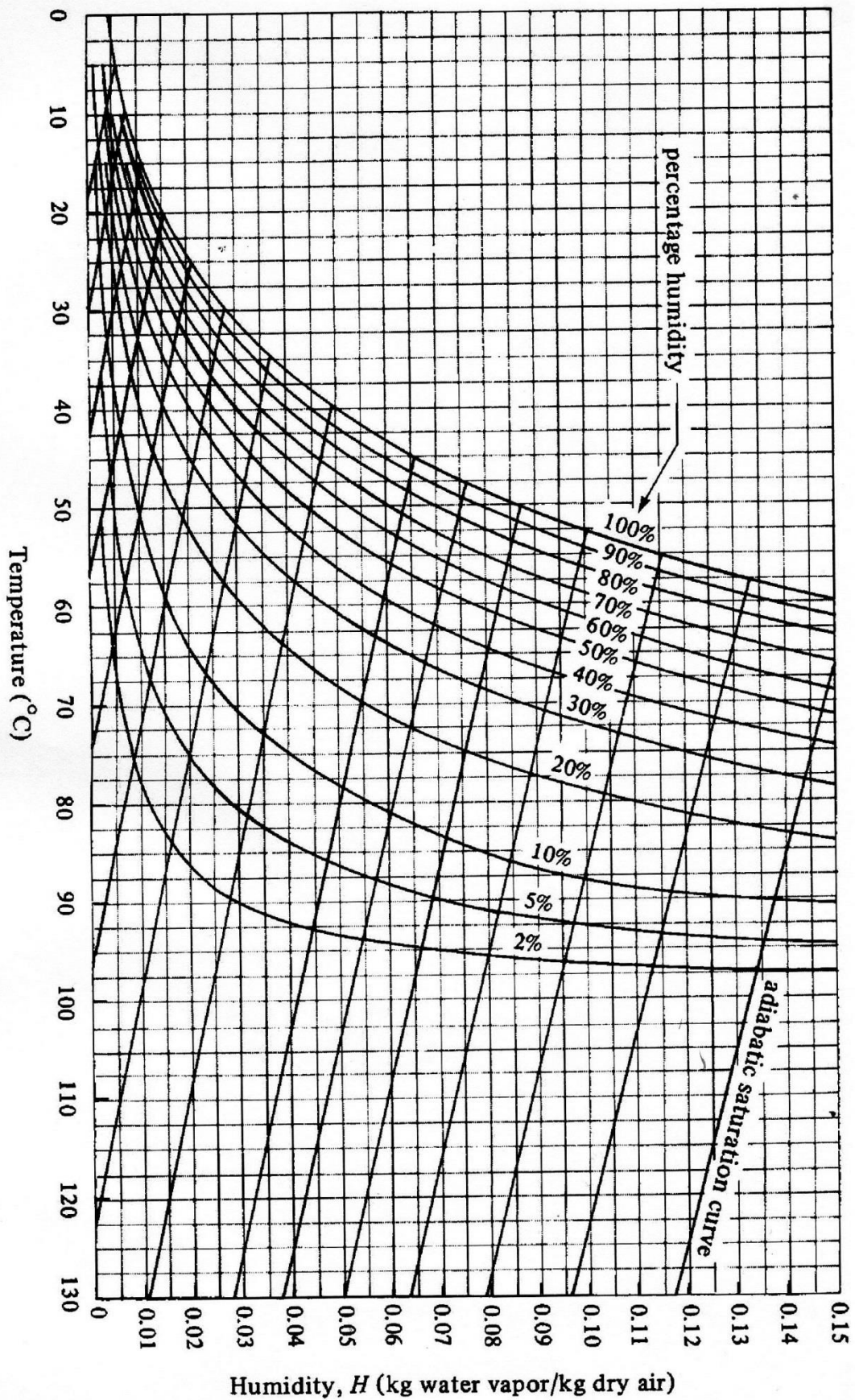


FIGURE 9.3-2. Humidity chart for mixtures of air and water vapor at a total pressure of 101.325 kPa (760 mm Hg). (From R. E. Treybal, Mass-Transfer Operations, 3rd ed. New York: McGraw-Hill Book Company, 1980. With permission.)



**A.2-9 Properties of Saturated Steam and Water (Steam Table),  
SI Units**

Temperature (°C)	Vapor Pressure (kPa)	Specific Volume (m <sup>3</sup> /kg)		Enthalpy (kJ/kg)		Entropy (kJ/kg·K)	
		Liquid	Sat'd Vapor	Liquid	Sat'd Vapor	Liquid	Sat'd Vapor
0.01	0.6113	0.0010002	206.136	0.00	2501.4	0.0000	9.1562
3	0.7577	0.0010001	168.132	12.57	2506.9	0.0457	9.0773
6	0.9349	0.0010001	137.734	25.20	2512.4	0.0912	9.0003
9	1.1477	0.0010003	113.386	37.80	2517.9	0.1362	8.9253
12	1.4022	0.0010005	93.784	50.41	2523.4	0.1806	8.8524
15	1.7051	0.0010009	77.926	62.99	2528.9	0.2245	8.7814
18	2.0640	0.0010014	65.038	75.58	2534.4	0.2679	8.7123
21	2.487	0.0010020	54.514	88.14	2539.9	0.3109	8.6450
24	2.985	0.0010027	45.883	100.70	2545.4	0.3534	8.5794
25	3.169	0.0010029	43.360	104.89	2547.2	0.3674	8.5580
27	3.567	0.0010035	38.774	113.25	2550.8	0.3954	8.5156
30	4.246	0.0010043	32.894	125.79	2556.3	0.4369	8.4533
33	5.034	0.0010053	28.011	138.33	2561.7	0.4781	8.3927
36	5.947	0.0010063	23.940	150.86	2567.1	0.5188	8.3336
40	7.384	0.0010078	19.523	167.57	2574.3	0.5725	8.2570
45	9.593	0.0010099	15.258	188.45	2583.2	0.6387	8.1648
50	12.349	0.0010121	12.032	209.33	2592.1	0.7038	8.0763
55	15.758	0.0010146	9.568	230.23	2600.9	0.7679	7.9913
60	19.940	0.0010172	7.671	251.13	2609.6	0.8312	7.9096
65	25.03	0.0010199	6.197	272.06	2618.3	0.8935	7.8310
70	31.19	0.0010228	5.042	292.98	2626.8	0.9549	7.7553
75	38.58	0.0010259	4.131	313.93	2635.3	1.0155	7.6824
80	47.39	0.0010291	3.407	334.91	2643.7	1.0753	7.6122
85	57.83	0.0010325	2.828	355.90	2651.9	1.1343	7.5445
90	70.14	0.0010360	2.361	376.92	2660.1	1.1925	7.4791
95	84.55	0.0010397	1.9819	397.96	2668.1	1.2500	7.4159
100	101.35	0.0010435	1.6729	419.04	2676.1	1.3069	7.3549

## ATTACHMENT 2

### A.1-1 Gas Law Constant $R$

Numerical Value	Units
1.9872	g cal/g mol · K
1.9872	btu/lb mol · °R
82.057	cm <sup>3</sup> · atm/g mol · K
8314.34	J/kg mol · K
$82.057 \times 10^{-3}$	m <sup>3</sup> · atm/kg mol · K
8314.34	kg · m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> · kg mol · K
10.731	ft <sup>3</sup> · lb <sub>f</sub> /in. <sup>2</sup> · lb mol · °R
0.7302	ft <sup>3</sup> · atm/lb mol · °R
1545.3	ft · lb <sub>f</sub> /lb mol · °R
8314.34	m <sup>3</sup> · Pa/kg mol · K

### A.2-3 Density of Liquid Water

Temperature		Density		Temperature		Density	
K	°C	g/cm <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	K	°C	g/cm <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>
273.15	0	0.99987	999.87	323.15	50	0.98807	988.07
277.15	4	1.00000	1000.00	333.15	60	0.98324	983.24
283.15	10	0.99973	999.73	343.15	70	0.97781	977.81
293.15	20	0.99823	998.23	353.15	80	0.97183	971.83
298.15	25	0.99708	997.08	363.15	90	0.96534	965.34
303.15	30	0.99568	995.68	373.15	100	0.95838	958.38
313.15	40	0.99225	992.25				

Source: R. H. Perry and C. H. Chilton, *Chemical Engineers' Handbook*, 5th ed. New York: McGraw-Hill Book Company, 1973. With permission.