

Institutt for kjemisk prosess teknologi

Eksamensoppgave i TKP4105 Separasjonsteknikk (Kontinuasjoneksamen)

Faglig kontakt under eksamen: Jana P. Jakobsen, Tlf.: 90847746

Sigurd Skogestad, Tlf.: 91371669

Eksamensdato: 09. august

Eksamenstid (fra-til): 09:00-13:00

Hjelpemiddelkode/Tillatte hjelpemidler:

Kalkulator / Calculator

Ingen trykte eller håndskrevne hjelpemidler tillatt. / No printed or handwritten aids are allowed

Annen informasjon:

Vedlegg side 1 (fuktighets-diagram) skal leveres inn med oppgaven. / Attachment page 1 (humidity diagram) to be turned in with the solution.

Målform/språk: Norsk/nynorsk, English

Antall sider (uten forside): 6

Antall sider vedlegg: 2

Informasjon om trykking av eksamensoppgave

Originalen er:

1-sidig 2-sidig

sort/hvit farger

skal ha flervalgskjema

Kontrollert av:

Dato

Sign

Oppgave / oppgave 1: Adsorpsjon (25%)

En avløpsvannløsning med et volum på $2,5\text{ m}^3$ inneholder $0,25\text{ kg fenol} / \text{m}^3$ løsning. Denne løsningen blandes med $3,0\text{ kg}$ frisk granulert aktivert karbon i en likevektsbatchprosess. Testmålinger ble utført i laboratoriet for å finne adsorpsjonsisotermen for fenol i avløpsvann og granulert aktivert karbon ved romtemperatur. De oppnådde dataene er oppført i tabellen under:

c [$\text{kg fenol} / \text{m}^3$ løsning] fenolkonsentrasjon i løsningen	q [$\text{kg fenol} / \text{kg karbon}$] fenolkonsentrasjon adsorbert på fast stoff
0.322	0.150
0.117	0.122
0.039	0.094
0.0061	0.059
0.0011	0.045

- Forklar prinsippet til likevekt-batch-adsorpsjonsprosess.
- Eksperimentelle data kan bli representert med Freundlich isoterm: $q = A \cdot c^n$. Det ble funnet ut at for de angitte data har konstanter A og n følgende verdier: $q = 0,191 \cdot c^{0,218}$. Forklar hvordan formen på adsorpsjon isoterm og verdiene for konstanter A og n kan bli evaluert fra de angitte data.
- Formuler materialbalanse, beregn de endelige likevektskonsentrasjonene og prosentandelen fenol som ble ekstrahert.
- Forklar og illustrer i en figur hva som er en gjennombruddskurve for en adsorpsjonskolonne.
- Forklar og illustrer hva kan estimeres fra en kjent gjennombruddskurve og hvordan.

Oppgave / oppgave 2: Tørking (25%)

En "batch" på 100 kg bomullsgarn (tørr vekt) tørkes ved atmosfærisk trykk fra et fri vanninnhold på $X = 0,40$ til $X = 0,08\text{ kg vann/kg}$ tørt materiale. Tørkelufta er ved konstant temperatur 65°C og med konstant fuktighetsinnhold på $0,02\text{ kg damp/kg}$ tørr luft. Tørkeraten er konstant lik $16\text{ kg H}_2\text{O}/(\text{time m}^2)$ til det frie vanninnholdet når et verdi på $X = 0,25\text{ kg H}_2\text{O/kg}$ tørt materiale. Vi betrakter et tørkeareal på 1 m^2 . Likevekt nås ved $x^* = 0,05\text{ kg H}_2\text{O} / \text{kg}$ tørt garn. I intervallet mellom fri vanninnhold på $X = 0,25$ og likevekts fuktighet $x^* = 0,05$ antas tørkeraten å være proporsjonal med det frie vanninnholdet i garnet. ($R = aX$)

- Bestem den innkomne lufts prosentvise relative fuktighetsinnhold (H_R). Bruk vedlagt fuktighetsdiagram.
- Skisser tørkekurven utfra gitte opplysninger og forklar de ulike punkter og deler av kurven.
- Tørke rate er definert som:
Bestem tørketiden for konstant tørkerate periode.
$$R = - \left[\frac{\text{Masse}_{\text{dry solid}}}{\text{Areal}_{\text{dried solid}}} \right] \cdot \frac{dX}{dt}$$
- Bestem tørketiden for avtagende tørkerate periode. Ta i betraktning antagelsen som er oppgitt i teksten.
- Forklar hvorfor tørkerate begynner å falle når kritisk fuktighets innhold er nådd?

Oppgave / Oppgave 3 Destillasjon (Vekt 30%)

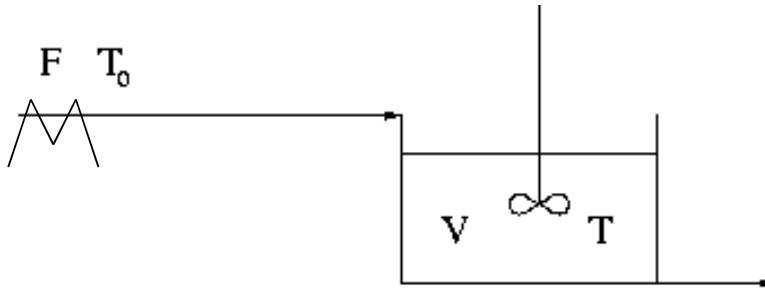
En fødestrøm (100 mol/s) med 40 mol% metanol og 60 mol% vann skal separeres ved destillasjon i en kolonne med total kondensator og trykk $p = 200$ mmHg.

- a) Anta at destillatet inneholder 95 mol% metanol og bunnproduktet 2 mol% metanol. Bestem destillat- og bunnproduktstrømmene.
- b) Det tilføres en konstant varmemengde i kokeren som gir en dampstrøm (oppkok) $V_B=35.4$ mol/s. Tegn en figur av kolonnen og skriv på verdien av alle strømmer (inkl. interne strømmer L_T , V_T , L_B , V_B) når fødestrømmen består av 50% væske og 50% damp (dvs. $q=0.5$). Anta at fordampningsvarmen til vann og metanol (i alle blandingsforhold) er 40 kJ/mol. Hvor mye varme må tilføres (koker) og fjernes (kondensator)? Oppgi svarene i kW.
- c) Bestem det nødvendige antall teoretiske trinn i bunn- og toppseksjonen når føden er optimalt plassert (gi ett tallsvar for hver seksjon). Bruk vedlagte millimeterpapir. Likevektsdata finner du i tabell 1.
- d) Anta at den virkelige kolonnen bygges med 6 teoretiske trinn i bunnen (inklusive koker) og 4 teoretiske trinn i toppen. Anta at renheten i bunnen holdes på 2 mol% metanol og at det brukes samme oppkok som før (du kan da anta at driftslinjen i bunnen av kolonnen er tilnærmet uforandret). Bestem renheten i destillatet for den virkelige kolonnen.
- a) Hva skjer med renheten i destillatet for den virkelige kolonnen (med uforandret oppkok og renhet i bunn) dersom føden forvarmes slik at den er ren damp? Hva hvis føden er ren væske? Diskuter om disse tilfellene i det hele tatt er mulig å få til.

Tabell 1: Likevektsdata for metanol-vann ved 200 mmHg

Molbrøk metanol i væskefase	Molbrøk metanol i dampfase
0.0130	0.0950
0.0250	0.1700
0.0640	0.3630
0.1560	0.5900
0.2740	0.6960
0.4280	0.7860
0.5430	0.8480
0.6250	0.8720
0.7220	0.9050
0.7950	0.9370
0.8850	0.9660

Oppgave / Oppgave 4 Regulerings-teknikk/dynamikk (Vekt 20%)



Figur 1: Tank-prosess

Vi har en kontinuerlig prosess der vann kommer inn på en tank via et langt rør, se figur 1. I tanken antas perfekt blanding og konstant volum. Varmetapet til omgivelsene neglisjeres. Vi ønsker å se nærmere på hvordan temperaturen i tanken (T) varierer med innløpstemperaturen til røret (T_0).

Dynamikk:

- Sett opp (dynamisk) energibalanse for tanken (uten røret)
- Skisser forventet tidsrespons for T for en sprangendring i T_0 .
- Hva er forsterkningen (k), tidskonstanten (τ) og dødtiden (θ) til denne prosessen (med T_0 som inngang og T som utgang).

Regulering:

- I praksis endres T_0 med et elektrisk varmeelement. Tegn flytskjema og vis på det hvordan man kan bruke varmeelementet til å regulere temperaturen T i tanken med én regulator.
- Dødtiden i det lange røret kan være et problem for å få god regulering av T . Foreslå en forbedret regulering (med kaskade) basert på måling av også T_0 . (Kommentar: Kaskade brukes blant annet for å korrigere for eventuelt varmetap.)

ENGLISH TEXT

Problem 1: Adsorption (25 %) English text

A wastewater solution having a volume of 2.5m³ contains 0.25 kg phenol/m³ of solution. This solution is mixed with a 3.0 kg of fresh granular activated carbon in an equilibrium batch process.

Test were performed in the laboratory to obtain the adsorption isotherm for phenol in wastewater and granular activated carbon at room temperature. The obtained data are listed in the table below:

c [kg phenol/ m ³ of solution] concentration of phenol in the solution	q [kg phenol/ kg carbon] concentration of phenol adsorbed on the solid
0.322	0.150
0.117	0.122
0.039	0.094
0.0061	0.059
0.0011	0.045

- Explain the principle of equilibrium batch adsorption process.
- The experimental data can be represented by Freundlich isotherm: $q = A c^n$. It was found that for the specified data set the constants A and n have the following values: $q = 0.191 c^{0.218}$. Explain how the form of adsorption isotherm and the values of constants A and n can be evaluated from the given data.
- Formulate the material balance equation, calculate the final equilibrium concentrations and the percent of phenol extracted.
- Explain and illustrate in a figure what is a breakthrough curve for an adsorption column
- Explain and illustrate in a figure what can be estimated from a known breakthrough curve and how.

Problem 2: Drying (25%) English text

A batch of 100 kg yarn (dry weight cotton) is going to be dried at atmospheric pressure from a free moisture content of $X = 0.40$ to $X = 0.08$ kg water/kg dry yarn. The air used for drying is coming in at a temperature of 65°C and with a humidity of 0.02 kg water vapor/kg dry air. The drying rate is constant and equal to 16 kg H₂O /h.m², until the free moisture content has reached a value of $X = 0.25$ kg H₂O/kg dry yarn. We consider a drying area of 1 m². Equilibrium moisture content is reached at $x^* = 0.05$ kg H₂O/kg dry yarn. Over the range of the free moisture content between $X = 0,25$ and equilibrium moisture content $x^* = 0.05$, the drying rate is assumed to be linear function of the free moisture content in the yarn. ($R = aX$)

- Find the percent relative humidity of the air coming in (H_R). Use attached humidity chart.
- Make a drawing of the drying curve from the given information and explain the different points and parts of the curve.
- Drying rate is defined as
$$R = - \frac{Mass_{dry\ solid}}{Area_{dried\ solid}} \cdot \frac{dX}{dt}$$

Calculate the drying time for the constant drying rate period.

- Calculate the drying time for the falling drying rate period under the assumption mentioned in the text above.
- Explain why the drying rate starts to fall after the critical free moisture content is reached?

Problem 3 Distillation. English text (Weight 30%)

A feed stream (100 mol/s) with 40 mol% methanol and 60 mol% water is separated by distillation in a column with total condenser and pressure $p = 200$ mmHg.

- a) Assume that the distillate contains 95 mol% methanol and the bottom product 2 mol% methanol. Compute the amount of distillate and bottom products.
- b) A constant amount is supplied to the reboiler which generates a vapor stream (boilup) $V_B=35.4$ mol/s. Make a sketch of the column and write on the amount of all internal flows (including L_T, V_T, L_B) when the feed stream is 50% liquid and 50% vapor (i.e., $q=0.5$). Assume that the heat of vaporization for water and methanol (for all mixtures) is 40 kJ/mol. How much heat must be supplied (reboiler) and removed (condenser)? Give your answer in kW.
- c) Find the required number of theoretical stages in the bottom and top sections of the column when the feed stage is optimally located (give a number for each section). Use the enclosed mm-paper. Equilibrium data are given in Table 1.
- d) Assume that the real column is built with 6 theoretical stages in the bottom (including reboiler) and 4 theoretical stages in the top. Assume that the bottom purity is kept at 2 mol% methanol and that we use the same boilup as before (you may for then assume that the operating line in the bottom of the column is approximately unchanged). Find the distillate purity for the real column.
- e) What happens with the purity of the distillate in the real column (with unchanged boilup and bottom purity) if the column feed is preheated so that it is saturated vapor? What if the feed is liquid? Discuss if the two cases are even possible.

Table 1: Equilibrium data for Methanol-Water at 200 mmHg:

Liquid mole fraction methanol	Vapor mole fraction methanol
0.0130	0.0950
0.0250	0.1700
0.0640	0.3630
0.1560	0.5900
0.2740	0.6960
0.4280	0.7860
0.5430	0.8480
0.6250	0.8720
0.7220	0.9050
0.7950	0.9370
0.8850	0.9660

Problem 4. Process control/dynamics. English text (20%)

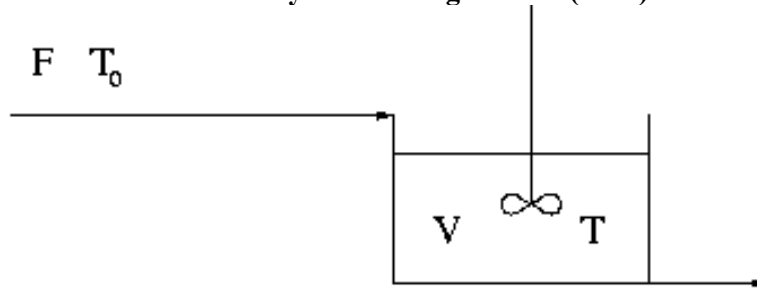


Figure 1: Tank-process

The feed to a continuous process enters through a long pipeline, see Fig. 1. We assume perfect mixing and constant volume in the tank. The heat loss is neglected. We want to consider how the tank temperature (T) changes when the feed temperature (T_0) varies.

Dynamics:

- Formulate the (dynamic) energy balance for the tank (without the pipeline).
- Sketch the time response in T (output) to a step change in T_0 (input).
- What is the gain (k), time constant (τ) and delay (θ) for this process (with T_0 as input and T as output).

Control:

- In practice, we adjust T_0 by use of an electrical heater. Make a flow sheet and show how to control the temperature T in the tank using the heater with a single controller.
- The time delay due to the long pipe can be a problem for good control of T . Suggest an improved control structure (with cascade) based on measuring also T_0 . (Comment: The cascade is intended, for example, to correct for possible heat loss).

ATTACHMENT

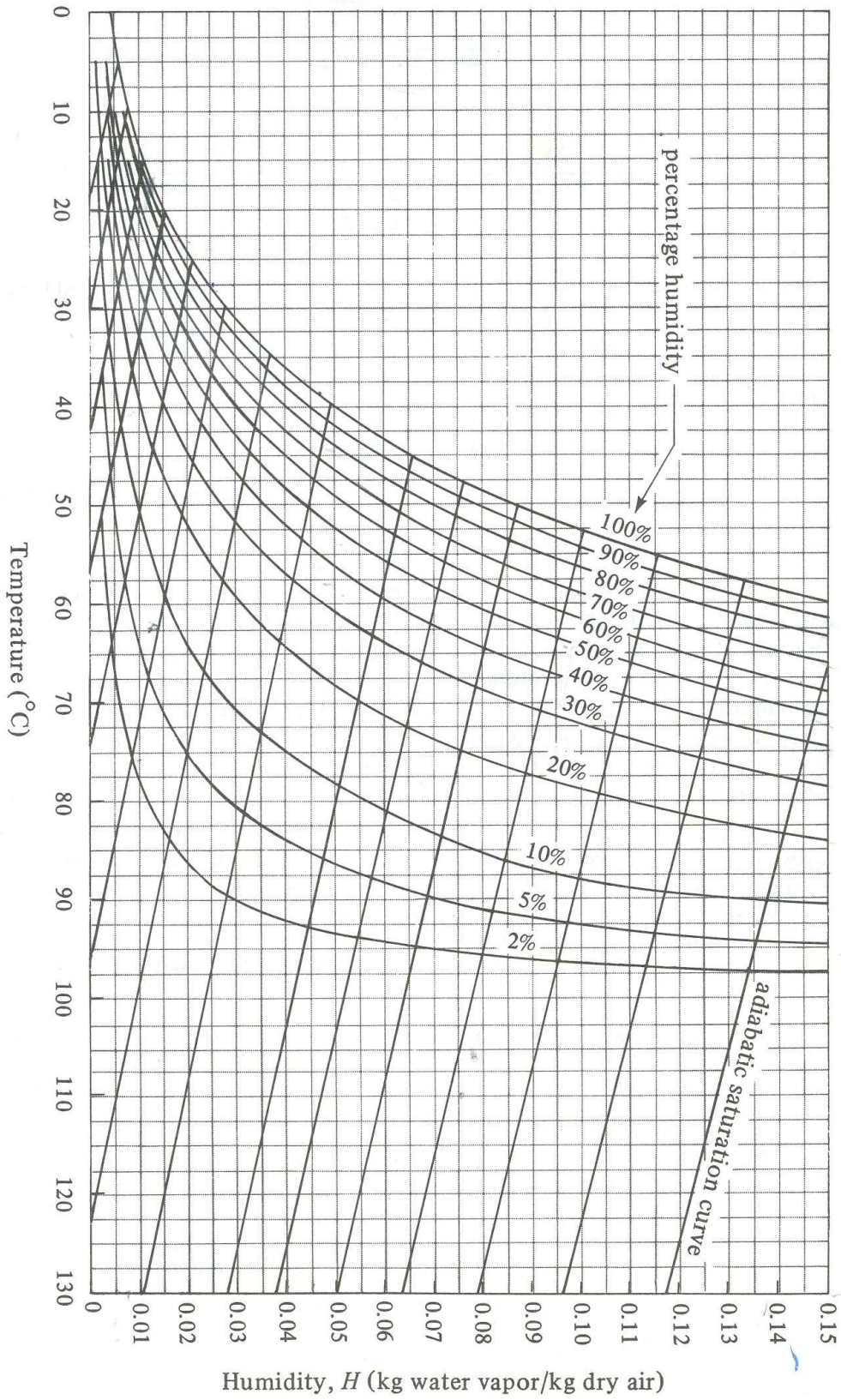


FIGURE 9.3-2. Humidity chart for mixtures of air and water vapor at a total pressure of 101.325 kPa (760 mm Hg). (From R. E. Treybal, *Mass-Transfer Operations*, 3rd ed. New York: McGraw-Hill Book Company, 1980. With permission.)

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

Temperature (°C)	Vapor Pressure (kPa)	Specific Volume (m ³ /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