

Institutt for kjemisk prosess teknologi

Eksamensoppgave i TKP4105 Separasjonsteknologi

Faglig kontakt under eksamen: May-Britt Hägg Tlf: 930 80834

Sigurd Skogestad Tlf: 913 71669

Eksamensdato: 19.12.15

Eksamenstid (fra-til): 09:00 – 13:00

Hjelpemiddelkode/Tillatte hjelpemidler: Ingen trykte eller håndskrevne hjelpemidler tillatt. Bestemt enkel kalkulator tillatt (kode D)

Annen informasjon:

Målform/språk: Bokmål / Nynorsk

Antall sider: 4

Antall sider vedlegg: 0

mm-papir nødvendig for oppgave 1 og 2

Kontrollert av:

Dato

Sign

Oppgave 1 / Oppgave 1 (Destillasjon, 32%)

(Benytt mm-papir til å løse oppgaven)

Føden ($F=1$ mol/s) til en destillasjonskolonne som opererer ved 1 atm er mettet væske med 20 mol% metanol og 80 mol% isopropanol. Produktene skal være 95 mol% metanol (D) og 99 mol% isopropanol (B).

- (3%) Bestem mengdene av de to produktene (D og B).
- (7%) Bestem grafisk minimum antall likevektstrinn (N_{\min})
- (7%) Bestem grafisk minimum refluxs (L_{\min}).
- (3%) Hva er minimum varme (Q_{\min}) som må tilføres kokeren når det antas at fordampingsvarmen for isopropanol er 45 kJ/mol?
- (3%) Med en gitt verdi av N_{\min} , hva vil du anbefale som et rimelig antall likevektstrinn (N) i en virkelig kolonne? Hvor mye høyere vil med dette valget den virkelige refluxs L være i forhold til L_{\min} (omtrentlig).
- (3%) Følgende analytiske uttrykk kan brukes for å beregne N_{\min} og L_{\min} :

$$\text{Fenske: } N_{\min} = \ln S / \ln \alpha$$

$$\text{King: } L_{\min}/F = 1/(\alpha-1)$$

Hva betyr symbolene? Hvilke antagelser er uttrykkene basert på? Forklar kort hvordan uttrykkene kan utledes.

- (3%) Bestem relativ flyktighet $\alpha = (y_1/x_1)/(y_2/x_2)$ for $x_1=0.068$, $x_1=0.524$ og $x_1=0.947$. Er det rimelig å anta konstant relativ flyktighet? Beregn N_{\min} og L_{\min} fra de analytiske formlene. Kommenter på evt. avvik fra det du fant grafisk.
- (3%) Det analytiske uttrykket for N_{\min} er hensiktsmessig å bruke i «hjørnene» på McCabe-Thiele diagrammet der det er vanskelig å bestemme N_{\min} grafisk. Bruk den analytiske Fenske-formelen til å finne økningen i N_{\min} dersom destillatproduktet endres fra 95% til 99.99% metanol (bruk her α som gjelder for toppen av kolonnen).

Data: Damp/væske-likevekt for metanol(1) og isopropanol(2) ved 1 atm:

EXPERIMENTAL DATA		
T DEG C	X1	Y1
79.20	0.0680	0.1460
78.50	0.1060	0.2060
78.50	0.1410	0.2680
76.50	0.1840	0.3360
74.10	0.3100	0.5010
72.20	0.4250	0.6120
70.50	0.5240	0.6840
68.80	0.6520	0.7850
67.10	0.8110	0.8860
66.50	0.8240	0.8890
65.90	0.8780	0.9240
65.30	0.9470	0.9670

- a) Du har gitt figuren under som viser likevekts-relasjonen mellom en gass eller væske som adsorberes på en adsorbent. Figuren viser tre typer likevektsisotemer: Langmuir, Freundlich og Henry's lov – likningene er gitt under oppgaven. Forklar hvordan du vil finne hvilken likning som gjelder når du har et gitt sett likevektsdata.

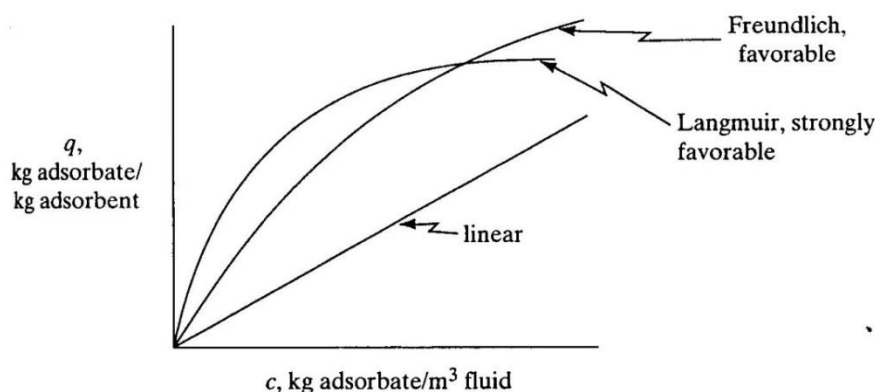


FIGURE 12.1-1. Some common types of adsorption isotherms.

- b) Du har gitt følgende likevektsdata for glucose som skal fjernes fra en væske ved å adsorberes på aktivert alumina-partikler. Bestem likningen for den isotermeren som gjelder i dette tilfelle. (Benytt mm-papir for å løse oppgaven):

c (g/cm ³)	0.0040	0.0087	0.019	0.027	0.094	0.195
q (solute/ (g alumina)	0.026	0.053	0.075	0.082	0.123	0.129

- c) Forklar hvordan vi kan bestemme kapasiteten til en absorpsjonskolonne ved hjelp av figuren under. Forklar hva vi forstår med «breakpoint», og «mass transfer zone».

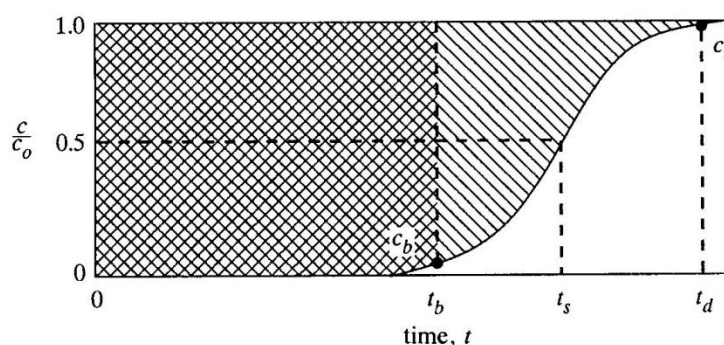
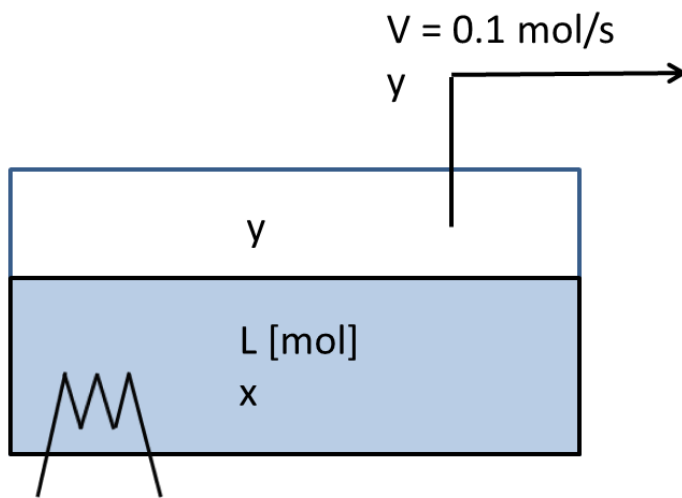


FIGURE 12.3-2. Determination of capacity of column from breakthrough curve.

- **Gitt:** Henry's law: $q = K \cdot c$
 - Freundlich isotherm: $q = K \cdot c^n$
 - Langmuir isotherm: $q = (q_0 c) / (K + c)$

Oppgave 3 / Oppgave 3 (Diverse, 18%)

- (a) (5%) En tank har en innstrøm og en utstrøm og vi ønsker å holde nivået i tanken konstant. Foreslå to alternative reguleringsstrukturer basert på tilbakekobling (begge skal ha en LC). Når skal de brukes?
- (b) (5%) 1. Hva er Raoult's lov og når kan den brukes?
2. Det er oppgitt at damp/væske-likevekten (VLE) for en blanding ved 1 atm kan skrives $y = Kx$ der K er konstant. Under hvilke betingelser gjelder dette? Vil K endres dersom trykket økes til 2 atm?
- (c) (8%) Figuren viser en tank med konstant trykk der en flyktig komponent (med molfraksjoner x og y) dampes av.



1. Materialbalansen for total masse gir $dL/dt = -V$ [mol/s]. Utled denne samt den tilsvarende materialbalansen for flyktig komponent.
2. Vis hvordan man fra de to materialbalansene kan utlede Rayleigh-ligningen
$$\int_{L_0}^{L_1} \frac{dL}{L} = \ln \frac{L_1}{L_0} = \int_{x_0}^{x_1} \frac{dx}{y-x}$$
3. Hvor lang tid tar det før molfraksjonen av lett komponent har sunket fra $x_0=1.E-2$ til $x_1=1.E-4$ og hvor mye væske (L_1) er det da igjen.?

Data: $x_0 = x(t=0) = 1.E-2$. $L_0=L(t=0)=1000$ mol.

Avdampet mengde er konstant: $V = 0.1$ mol/s

Damp/væske-likevekt: $y = K x$, $K=100$.

Oppgave 4/Oppgave 4: DIFFUSJON – MEMBRAN – DIALYSE**(26%)**

En membran dialyse prosess settes opp for å gjenvinne et løst stoff A (solute) fra en fortynna 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 og symbolene gitt under som skrives inn på figuren
- Vis at likningen for fluksen, N_A , blir som 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 som er nødvendig for å kunne overføre 0,02 kmol A/time
- Dersom systemet endres og masseoverføringskoeffisienten k_{c1} blir uendelig stor, samtidig med at vi lykkes i å redusere tykkelsen på membranen til 1 μm ; hva blir da fluksen, N_A ?

Gitt for systemet / Given for the system:

$$\text{Flux equation: } N_A = \frac{c_1 - c_2}{\frac{1}{k_{c1}} + \frac{1}{p_M} + \frac{1}{k_{c2}}}$$

Concentration on side 1, $c_1 = 2,5 \times 10^{-2}$ 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, $L = 1,5 \times 10^{-5}$ m

Diffusion coefficient in the membrane, $D_{AB} = 4 \times 10^{-11}$ m^2/s

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

Mass transfer coefficients in the dilute solutions:

$$k_{c1} = 3,7 \times 10^{-5} \text{ m/s and } k_{c2} = 2,2 \times 10^{-5} \text{ m/s}$$

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

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



NTNU – Trondheim
Norwegian University of
Science and Technology

Department of chemical engineering

Examination paper for TKP4105 (Separation Technology)

Academic contact during examination: May-Britt Hägg Phone: 930 80834
Sigurd Skogestad, Phone: 931 71669

Examination date: 19.12.15

Examination time (from-to): 09:00 – 13:00

**Permitted examination support material: No printed or handwritten material
permitted. Simple calculator code D accepted.**

Other information:

Language: English

Number of pages: 4

Number of pages enclosed (attachments): 0

mm-paper is needed for problem 1 and 2

Checked by:

Date

Signature

Problem 1 (Distillation, 32%)

(Use mm-paper to solve the problem)

The feed ($F=1$ mol/s) to a distillation column operating at 1 atm is saturated liquid with 20 mol% methanol and 80 mol% isopropanol. The products should be 95 mol% methanol (D) and 99 mol% isopropanol (B).

- (3%) Find the amount of the two products (D and B).
- (7%) Find graphically the minimum number of equilibrium stages (N_{\min})
- (7%) Find graphically the minimum reflux (L_{\min}).
- (3%) What is the minimum heat (Q_{\min}) that must be supplied to the reboiler when it is assumed that the heat of vaporization for isopropanol is 45 kJ/mol?
- (3%) With a given value of N_{\min} , what would you suggest as a reasonable number of equilibrium stages (N) in a real column? With this choice, how much larger do you expect the actual reflux L to be compared with L_{\min} (approximately)
- (3%) The following analytical equations can be used to compute N_{\min} and L_{\min} :

$$\text{Fenske: } N_{\min} = \ln S / \ln \alpha$$

$$\text{King: } L_{\min}/F = 1/(\alpha-1)$$

What do the symbols mean? What assumptions are the equations based on? Explain briefly how the equations can be derived.

- (3%) Find the relative volatility $\alpha = (y_1/x_1)/(y_2/x_2)$ for $x_1=0.068$, $x_1=0.524$ and $x_1=0.947$. Is it reasonable to assume constant relative volatility? Compute N_{\min} and L_{\min} from the analytical formulas. Comment on any deviation from what you found graphically.
- (3%) The analytical expression for N_{\min} is convenient to use in the «corners» of the McCabe-Thiele diagram where it is difficult find N_{\min} graphically. Use the analytical Fenske-formula to find the increase in N_{\min} if the distillate product changes from 95% to 99.99% methanol (use the α that applies to the top part of the column).

Data: Vapor-liquid equilibrium for methanol (1) and isopropanol (2) at 1 atm:

EXPERIMENTAL DATA		
T DEG C	X1	Y1
79.20	0.0680	0.1460
78.50	0.1060	0.2060
78.50	0.1410	0.2680
76.50	0.1840	0.3360
74.10	0.3100	0.5010
72.20	0.4250	0.6120
70.50	0.5240	0.6840
68.80	0.6520	0.7850
67.10	0.8110	0.8860
66.50	0.8240	0.8890
65.90	0.8780	0.9240
65.30	0.9470	0.9670

Problem 2 Adsorption (24 %)

- a) The figure below is showing the equilibrium relations between gas or liquid (solute) adsorbing on an adsorbent (solid). The figure shows three types of equilibrium isotherms: Langmuir, Freundlich and Henry's Law – the equations are given below. Explain how you can find which isotherm is valid for your system when the equilibrium data are given.

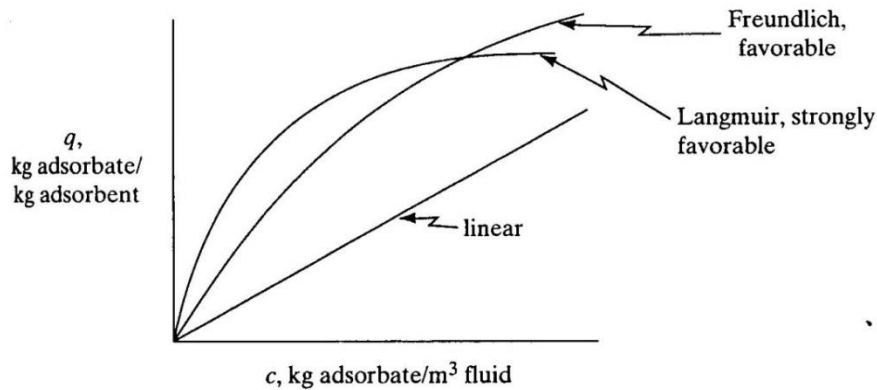


FIGURE 12.1-1. Some common types of adsorption isotherms.

- b) The following equilibrium data are given for glucose which is to be adsorbed from an aqueous solution using activated alumina. Determine the isotherm that fits the data and give the constants of the equations. (Use mm-paper to solve the problem.)

c (g/cm ³)	0.0040	0.0087	0.019	0.027	0.094	0.195
q (solute/ g alumina)	0.026	0.053	0.075	0.082	0.123	0.129

- c) Explain how we can determine the capacity of an absorption column by using the figure below. Explain what is understood by “break point” and “mass transfer zone”

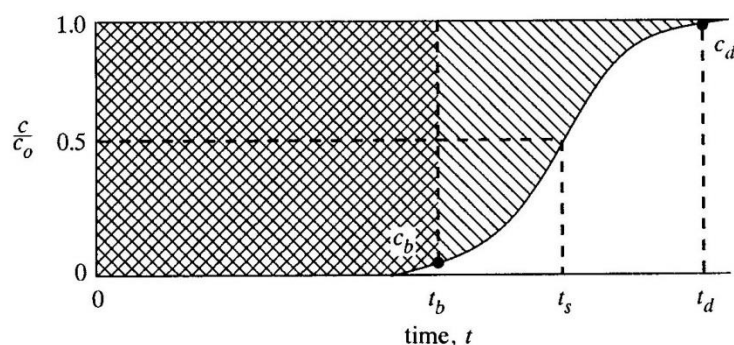
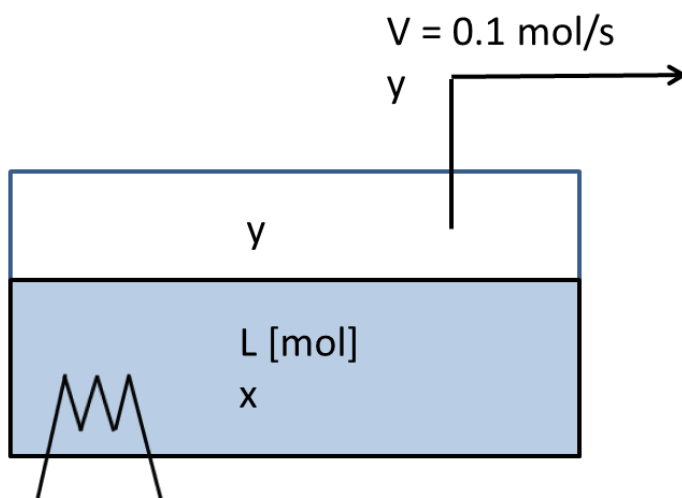


FIGURE 12.3-2. Determination of capacity of column from breakthrough curve.

- **Gitt:** Henry's law: $q = K \cdot c$
 - Freundlich isotherm: $q = K \cdot c^n$
 - Langmuir isotherm: $q = (q_0 c) / (K + c)$

Problem 3 (Various, 18%)

- (a) (5%) A tank has an inflow and an outflow and we want to keep the level in the tank constant. Suggest two alternative control structures based on feedback (both should have a LC). When should they be used?
- (b) (5%) 1. What is Raoult's law and when should it be used?
 2. It is given that the vapor-liquid equilibrium (VLE) for a mixture at 1 atm can be written $y = Kx$ where K is constant. Under what conditions does this apply? Will K change when the pressure is increased to 2 atm?
- (c) (8%) The figure shows a tank with constant pressure where a volatile component (with mole fractions x and y) is to be removed by evaporation.



1. The material balance for total mass gives $dL/dt = -V$ [mol/s]. Derive this plus the corresponding material balance for the light component.
2. Show how to use the two material balances to derive the Rayleigh equation:

$$\int_{L_0}^{L_1} \frac{dL}{L} = \ln \frac{L_1}{L_0} = \int_{x_0}^{x_1} \frac{dx}{y-x}$$

3. How long does it take for the mole fraction of light component to reduce from $x_0=1.E-2$ to $x_1=1.E-4$ and how much liquid (L_1) is then left?

Data: $x_0 = x(t=0) = 1.E-2$. $L_0=L(t=0)=1000$ mol.

Constant evaporation: $V = 0.1$ mol/s

Vapor-liquid equilibrium: $y = K x$, $K=100$.

Problem 4: DIFFUSION – MEMBRANE – DIALYSIS**(26%)**

A membrane process is set up to recover solute A from a dilute solution. Information for the system is given below.

- Make a sketch of the system where you draw the concentration profiles in the solutions on both sides of the membrane and through the membrane – use the information and symbols given below on the figure.
- Show that the equation for the flux, N_A , will be as given below
- Calculate the individual resistances and the total resistance for the process. How large is the resistance of the membrane compared to the total (in %)?
- Calculate the flux (N_A) at steady-state and the total area (m^2) in order to transfer 0,02 kmol A / hour
- If the system changes and the mass transfer coefficient k_{c1} becomes very large and can be considered infinite, and we at the same time are able to reduce the thickness of the membrane to 1 μm ; what will then be the value of the flux, N_A ?

Given for the system:

$$\text{Flux equation: } N_A = \frac{c_1 - c_2}{\frac{1}{k_{c1}} + \frac{1}{p_M} + \frac{1}{k_{c2}}}$$

Concentration on side 1, $c_1 = 2,5 \times 10^{-2}$ 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, $L = 1,5 \times 10^{-5}$ m

Diffusion coefficient in the membrane, $D_{AB} = 4 \times 10^{-11}$ m^2/s

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

Mass transfer coefficients in the dilute solutions:

$$k_{c1} = 3,7 \times 10^{-5} \text{ m/s and } k_{c2} = 2,2 \times 10^{-5} \text{ m/s}$$

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

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