

Institutt for kjemisk prosessteknologi

Eksamensoppgave i TKP4105 Separasjonsteknikk

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

Liyuan Deng, Tlf.: 98883997

Eksamensdato: 19. desember

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 sider (fuktighets-diagram og koordinatnettet) skal leveres inn med oppgaven. / Attachment pages (humidity diagram and coordinate grids) 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 1/ Oppgave 1: Tørking (25%)

En "batch" på 100 kg bomullsgarn (tørr vekt) tørkes ved atmosfærisk trykk fra et fri vanninnhold på $X=0,53$ til $X=0,11$ kg vann/kg tørt materiale. Tørkelufta er ved konstant temperatur 62°C og med konstant fuktighetsinnhold på $0,0134$ kg damp/kg tørr luft. Tørkeraten er konstant lik $15 \text{ kg H}_2\text{O}/(\text{time m}^2)$ til det frie vanninnholdet når et verdi på $X=0,23$ kg $\text{H}_2\text{O}/\text{kg}$ 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 $X=0,23$ og likevekts fuktighet $X^* = 0,05$ antas tørkeraten å være proporsjonal med det frie va $(R=aX)$ t.

- 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 2/ Oppgave 2: Gass membran separasjon (25%)

En miljøvennlig metode for å fjerne CO_2 fra en gasstrøm, kan være å benytte skreddersydde membraner der CO_2 permeerer hurtigst gjennom membranen og de andre gasskomponentene holdes tilbake på fødesiden. Utfordringene er forskjellig alt etter type gasstrøm som skal renses. For å illustrere dette, ser vi på tre forskjellige gassblandinger hvor CO_2 skal fjernes. For enkelhets skyld, betrakter vi gassblandingene som kun bestående av to komponenter; komposisjon er gitt i parentes. Prosessbetingelsene er også gitt i hvert enkelt tilfelle.

- CO_2 fjerning fra forbrenningsgass (13 mol% CO_2 i blanding med 87 mol% N_2)
Fødetrykk: 4 bar, permeattrykk: 0,1 bar, volumstrøm $5 \cdot 10^5 \text{ m}^3(\text{STP})/\text{time}$
- CO_2 fjerning for oppgradering av biogass (40 mol% CO_2 i blanding med 60 mol% CH_4)
Fødetrykk: 7bar, permeattrykk: 1 bar, volumstrøm: $75 \text{ m}^3(\text{STP})/\text{time}$
- CO_2 fjerning fra naturgass (10 mol% CO_2 i blanding med 90 mol% CH_4)
Fødetrykk: 70 bar, permeattrykk: 1 bar, volumstrøm: $10^4 \text{ m}^3(\text{STP})/\text{time}$

Det er ønskelig å benytte en bestemt type polymer membran som er svært permeabel for CO_2 i alle tre tilfellene. Membranen er $2 \mu\text{m}$ tykk, og har følgende permeabiliteter, P:

$$P_{\text{CO}_2} = 6 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3(\text{STP}) \cdot \text{m}/\text{m}^2 \cdot \text{bar} \cdot \text{h}$$

$$P_{\text{N}_2} = 3 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3(\text{STP}) \cdot \text{m}/\text{m}^2 \cdot \text{bar} \cdot \text{h}$$

$$P_{\text{CH}_4} = 1,2 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3(\text{STP}) \cdot \text{m}/\text{m}^2 \cdot \text{bar} \cdot \text{h}$$

a) Tenk komplette blandemodell. Tegn en skisse og forklar forutsetningene modellen er basert på.

b) Ligningen for masseoverførings hastighet kan formuleres som følger:

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

Hvor R er relativ trykk og α er selektivitet.

Forklar opprinnelsen til denne ligningen og hva den representerer. Beregn teoretisk minimum konsentrasjon som kan oppnås for CO_2 i retentatstrømmen, i de tre tilfellene over. Illustrer og forklar hvordan kan minimum retentat konsentrasjon bli bestemt grafisk.

c) I tilfelle 1 (forbrenningsgass) skal den CO_2 som permeerer helst ha en renhet på 95 mol%, og 85% av all CO_2 skal fanges inn - er det mulig å oppnå dette ved de gitte betingelser og et permeatkutt θ lik 0,1?

d) I tilfelle 3 (naturgass) skal den rensede naturgassen selges til Europa. Da er kravet at fraksjonen av CO_2 ikke skal være høyere enn 2,5 mol%. For å minske tapet av CH_4 settes dessuten permeatkuttet θ til 0,1. Bruk ligningen for volumetrisk fluks gjennom membranen:

$$J_{AV} = \frac{P_A}{L} (p_r y_{Ar} - p_p y_{Ap})$$

og beregne nødvendig membranareal.

e) Redegjør for hva slags strømningskonfigurasjon du vil velge på membranmodulen bør det være medstrøm, motstrøm eller kryss-strøm?

Oppgave 3/ Oppgave 3: Destillasjon (30%)

(Benytt koordinatnettet i Vedlegg 2 for å løse oppgaven)

En blanding av 200 kmol / h mettet damp inneholdende 60 mol% benzen og 40 mol% toluen skal separeres i en destillasjonskolonne. Produktene skal være et flytende destillat på 95 mol% (D) og et flytende bunnprodukt av 5 mol% benzen (B). Damptrykk og likevektsmolfraksjonsdata for benzen-toluensystemet ved 1 atm (101,3 kPa) er gitt i tabellen under.

- Tegn et prosessflytskjema, inkludert to produktstrømmene (D, B) og interne strømmer (L_T , V_T , L_B , V_B).
- Beregn mengdene av produktene, og de interne strømmer.
- Plott x-y diagrammet.
- Bestem grafisk minimum antall likevektstrinn (N_{min}).
- Bestem grafisk refluxforhold R ($R = 1,4R_{min}$).

- f) Bruk McCabe-Thiele-metoden til å bestemme antall teoretiske trinn (N) og bestem den optimale innmatingstrinn.

TABLE 11.1-1. Vapor-Pressure and Equilibrium-Mole-Fraction Data for Benzene-Toluene System

Vapor Pressure							
Temperature		Benzene		Toluene		Mole Fraction Benzene at 101.325 kPa	
K	°C	kPa	mm Hg	kPa	mm Hg	x_A	y_A
353.3	80.1	101.32	760			1.000	1.000
358.2	85	116.9	877	46.0	345	0.780	0.900
363.2	90	135.5	1016	54.0	405	0.581	0.777
368.2	95	155.7	1168	63.3	475	0.411	0.632
373.2	100	179.2	1344	74.3	557	0.258	0.456
378.2	105	204.2	1532	86.0	645	0.130	0.261
383.8	110.6	240.0	1800	101.32	760	0	0

Oppgave 4/ Oppgave 4: Absorpsjon (20%)

I en bioprosess som produserer en væske som inneholder etylalkohol, utvikles en CO₂-rik damp med en liten mengde etylalkohol. Alkoholen gjenvinnes ved absorpsjon med vann i et absorpsjonstårn pakket med 1,0-tommers tilfeldig pakning, hvor høyden på overføringsenheten (H_{OG}) er gitt til 0,4 m. Det er nødvendig å gjenvinne 97% etylalkohol.

- Føden strømmer inn fra bunnen; $V = 180 \text{ kmol} / \text{h}$ inneholdende 2 mol% etylalkohol og 98 mol% CO₂ ved 30°C, 1 atm.
- Absorbenten (rent vann) er i en motstrømstrøm; $L = 145 \text{ kmol} / \text{time}$ ved 30°C, 1 atm.
- Gass-væske likevekt forholdet for etylalkoholen i vann kan beskrives ved $y = 0,57x$.

- Tegn et prosessdiagram med strømningsvariabler.
- Beregn mengdene og sammensetningene av gass- og væskeutløpene.
- Bestem minimumstrømmen av væsken L_{min} .
- Bestem den nødvendige pakkehøyde (H), forutsatt isotermiske, isobariske forhold og at bare alkohol absorberes.
- Hvordan endres pakkehøyden H hvis absorbereren opereres ved høyere trykk? Hvorfor?

$$H = \int_0^H dz = \frac{V}{K_y a S} \int_{y_1}^{y_2} \frac{1}{(y - y^*)} dy$$

$$H_{OG} = \frac{V}{K_y a S}$$

$$N_{OG} = \int_{y_1}^{y_2} \frac{dy}{y - y^*} = \frac{y_1 - y_2}{(y - y^*)_{lm}}$$

ENGLISH

Problem 1: Drying (25%)

A batch of 100 kg yarn (dry weight cotton) is going to be dried at atmospheric pressure from a free moisture content of $X = 0.53$ to $X = 0.11$ kg water/kg dry yarn. The air used for drying is coming in at a temperature of 62°C and with a humidity of 0.0134 kg water vapor/kg dry air. The drying rate is constant and equal to $15 \text{ kg H}_2\text{O} / \text{h m}^2$, until the free moisture content has reached a value of $X = 0.23$ kg H_2O /kg dry yarn. We consider a drying area of 1 m^2 . Equilibrium moisture content is reached at $X^* = 0.05$ kg H_2O /kg dry yarn. Over the range between the free moisture content of $X = 0.23$ and the equilibrium moisture content $X^* = 0.05$, the drying rate is assumed to be linear function of the free moisture content in the yarn. )

- a) Find the percentage relative humidity of the air coming in (H_R). Use attached humidity chart.
- b) Make a drawing of the drying curve based on the given information and explain the different points and parts of the curve.

c) Drying rate is defined as:

$$R = \frac{-\text{Mass}_{\text{dry solid}}}{\text{Area}_{\text{dried solid}}} \cdot \frac{dX}{dt}$$

Calculate the drying time for the constant drying rate period.

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

Problem 2: Membrane gas separation (25%)

An alternative environmentally friendly technology for removing CO_2 from gas streams is under development – this method is using tailor made membranes where CO_2 is permeating very fast through the material while the other gas mixture components are being retained on the feed side. The challenges are different depending on type of gas mixture. In order to illustrate this, three different gas streams containing CO_2 are given below. For the sake of simplicity, only two components are considered. Process conditions are also given for each case.

- 1) CO_2 capture from flue gas (13 mole% CO_2 in mixture with 87 mole% N_2)
Feed pressure: 4 bar, permeate pressure 0,1 bar. Volume stream: $5 \cdot 10^5 \text{ m}^3(\text{STP})/\text{hour}$
- 2) CO_2 capture from biogas (40 mole% CO_2 in mixture with 60 mole% CH_4)
Feed pressure: 7 bar, permeate pressure: 1 bar. Volume stream: $75 \text{ m}^3(\text{STP})/\text{hour}$
- 3) CO_2 capture from natural gas (10 mole% CO_2 in mixture with 90 mole% CH_4)
Feed pressure: 70 bar, permeate pressure: 1 bar. Volume stream: $10^4 \text{ m}^3(\text{STP})/\text{hour}$

A polymeric membrane with high permeation for CO_2 is to be used for all three cases. The membrane is $2 \mu\text{m}$ thick, and has the following permeabilities, P:

$$P_{\text{CO}_2} = 6 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3(\text{STP}) \cdot \text{m} / \text{m}^2 \cdot \text{bar} \cdot \text{h}$$

$$P_{\text{N}_2} = 3 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3(\text{STP}) \cdot \text{m} / \text{m}^2 \cdot \text{bar} \cdot \text{h}$$

$$P_{\text{CH}_4} = 1,2 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3(\text{STP}) \cdot \text{m} / \text{m}^2 \cdot \text{bar} \cdot \text{h}$$

- a) Consider the complete mixing model. Draw a sketch and explain the underlying assumptions the complete mixing model is based on.
- b) The rate transfer equation can be formulated as follows:

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

Where R is the pressure ratio and α is the selectivity.

Explain the origin of this equation and what does it represent. Calculate the theoretical minimum concentration of CO₂ which can be obtained in the retentate stream for all three cases. Illustrate and explain how the minimum retentate concentration would be determined graphically.

- c) In case 1 (CO₂ capture from flue gas), the purity of permeated CO₂ should preferably be at least 95mol%, and 85% of all the CO₂ should be captured. Find out if it is possible to obtain the desired capture rate at the given conditions and a permeate cut θ of 0,1?
- d) The fraction of CO₂ in the purified natural gas must not be higher than 2,5 mol% when it is sold to Europe. In order to minimize the loss of CH₄ in the permeate stream, the permeate cut θ is set to 0,1. Calculate the necessary membrane area for case 3) by using the information provided above and the rate equation for volumetric flux through the membrane:

$$J_{AV} = \frac{P_A}{L} (p_r y_{Ar} - p_p y_{Ap})$$

- e) Explain which kind of flow configuration you will choose for the membrane module whether it should be co-current, counter-current or cross flow and why.

Problem 3: Distillation (30%)

(Use the coordinate grids in Attachment 2 to solve the problem)

A mixture of 200 kmol/h *saturated vapor* containing 60 mol% benzene and 40 mol% toluene is to be separated in a distillation column. The products are a liquid distillate of 95 mol% (D) and a liquid bottom product of 5 mol% benzene (B). The vapor pressure and equilibrium-mole-fraction data for benzene-toluene system at 1 atm (101.3 kPa) are given in the Table below.

- a) Draw a process flowsheet, including the product flows (D, B) and internal flows (L_T , V_T , L_B , V_B).
- b) Calculate the product flows and internal flows.
- c) Plot the x-y diagram.
- d) Find the minimum number of the theoretic stages N_{min} .
- e) Determine the reflux R ($R=1.4R_{min}$).
- f) Use the McCabe–Thiele method to determine the number of equilibrium stages N and determine the optimal feed-stage location.

TABLE 11.1-1. Vapor-Pressure and Equilibrium-Mole-Fraction Data for Benzene-Toluene System

Vapor Pressure							
Temperature		Benzene		Toluene		Mole Fraction Benzene at 101.325 kPa	
K	°C	kPa	mm Hg	kPa	mm Hg	x_A	y_A
353.3	80.1	101.32	760			1.000	1.000
358.2	85	116.9	877	46.0	345	0.780	0.900
363.2	90	135.5	1016	54.0	405	0.581	0.777
368.2	95	155.7	1168	63.3	475	0.411	0.632
373.2	100	179.2	1344	74.3	557	0.258	0.456
378.2	105	204.2	1532	86.0	645	0.130	0.261
383.8	110.6	240.0	1800	101.32	760	0	0

Problem 4: Absorption (20%)

In a bioprocess producing a liquor containing ethyl alcohol, a CO₂-rich vapor with a small amount of ethyl alcohol is evolved. The alcohol is recovered by absorption with water in an absorption tower packed with 1.0-inch random packing, in which the height of transfer unit (H_{OG}) is known as 0.4 m. It is required to recover 97% of ethyl alcohol.

- The feed gas flows in from the bottom; V=180kmol/h containing 2 mol% ethyl alcohol and 98 mol% CO₂, at 30°C, 1atm.
 - The absorbent (pure water) is in a countercurrent flow; L=145 kmol/h, at 30°C, 1atm.
 - The gas-liquid equilibrium relationship for the ethyl alcohol in water can be described by $y=0.57x$ at 30°C, 1atm.
- a) Draw a process diagram with all flow variables.
 - b) Calculate the molar flows and compositions of the gas and liquid outlets.
 - c) Determine the minimum flow of the liquid L_{min}.
 - d) Determine the required packed height (H), assuming isothermal, isobaric conditions and that only alcohol is absorbed.
 - e) How does the packed height H change if the absorber operates at a higher pressure? Why?

$$H = \int_0^H dz = \frac{V}{K_y a S} \int_{y_1}^{y_2} \frac{1}{(y - y^*)} dy$$

$$H_{OG} = \frac{V}{K_y a S}$$

$$N_{OG} = \int_{y_1}^{y_2} \frac{dy}{y - y^*} = \frac{y_1 - y_2}{(y - y^*)_{lm}}$$

ATTACHMENT 1

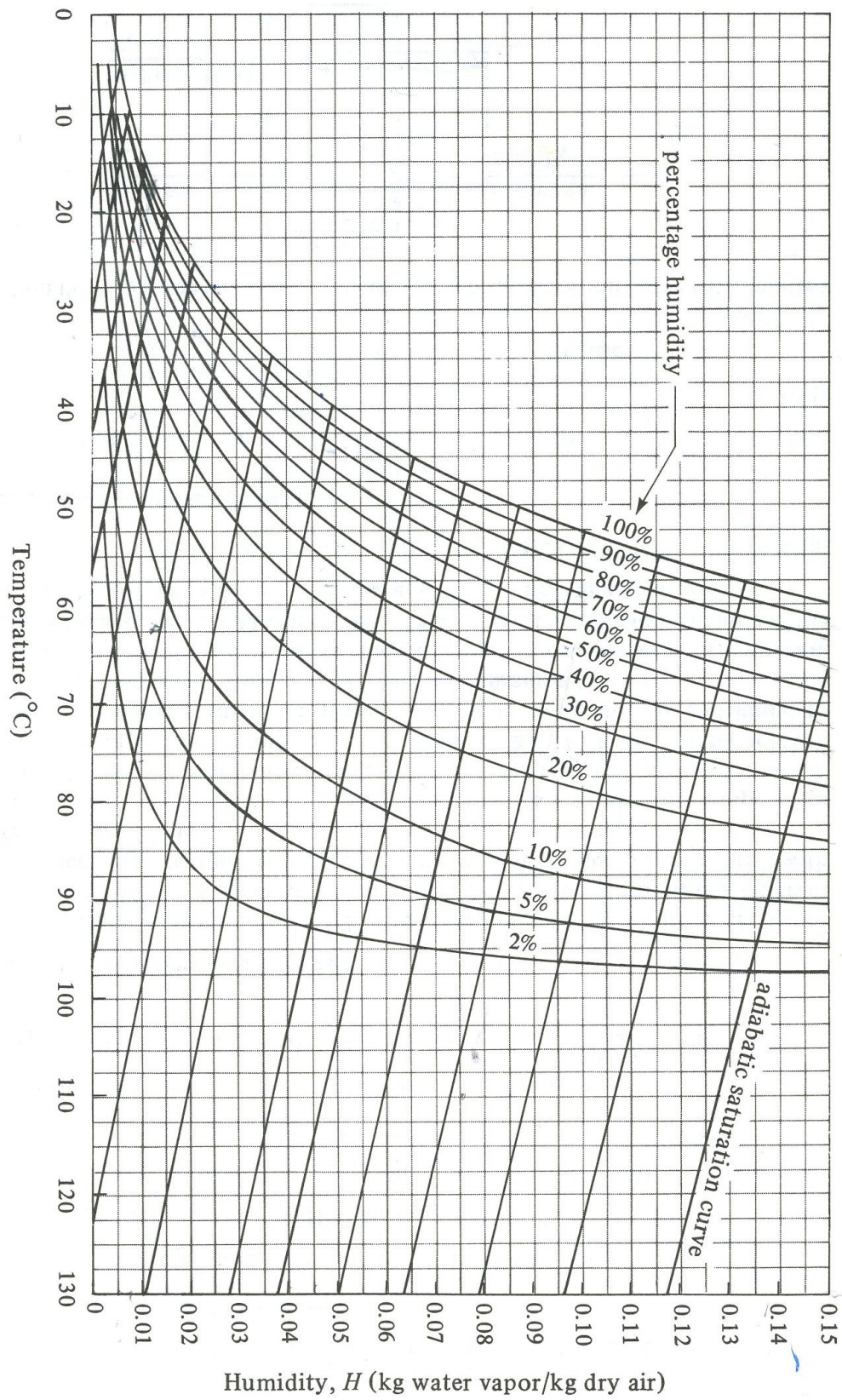


FIGURE 9.3-2. Humidity chart for mixtures of air and water vapor at a total pressure of 101.325 kPa (760 mm Hg). (From R. E. Treybal, *Mass-Transfer Operations*, 3rd ed. New York: McGraw-Hill Book Company, 1980. With permission.)

ATTACHMENT 2

