

Institutt for kjemisk prosess teknologi

Eksamensoppgave i TKP4105 Separasjonsteknikk

Faglig kontakt under eksamen: Jana P. Jakobsen, Tlf.: 908 477 46

Liyuan Deng, Tlf.: 988 839 97

Johannes Jäschke Tlf.: 984 122 39

Eksamensdato: 13. 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 side skal leveres inn med oppgaven. / Attachment page to be turned in with the solution.

Målform/språk: Norsk/nynorsk, English

Antall sider (uten forside): 10

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: Membran gas separasjon (30p)

En fødestrøm med blanda gass inneholder 50% av gass A og 50% av gass B. Disse gassene skal skilles i en membran separator. Gass A er den gass som permeerer hurtigst, mens gass B er den verdifulle gassen vi vil ha så ren som mulig. Dette kan for eksempel være biogass, med andre ord: A = CO₂ og B = CH₄).

Det er gitt følgende opplysninger om systemet:

Feed stream	$V_{in} = 2 \text{ m}^3(\text{STP}) / \text{min}$	
Feed pressure	$p_r = 10 \text{ bar}$	
Permeate pressure	$p_p = 1 \text{ bar}$	1 bar = 76 cm Hg
Volumetric stage cut	$\theta = 0,53$	
Membrane thickness	$L = 10^{-6} \text{ m}$	
Permeability of A	$P_A = 400 \text{ Barrer}$	1 Barrer = $10^{-10} \text{ cm}^3(\text{STP}).\text{cm}/(\text{s}.\text{cm}^2.\text{cm Hg})$
Selectivity P_A/P_B	$\alpha = 30$	

Antatt ideell blande modell kan prosessen beskrives med bla følgende ligninger:

- «transfer rate equation»

- «operating line»
$$y_{Ap} = \frac{y_{Ain} - y_{Ar}(1 - \theta)}{\theta}$$

- «volumetric flux equation»

- Tegn en skisse av prosessen med beskrivelser av alle strøm. Forklar hva er ideell blande modell, hvor kommer ligninger fra og hva de beskriver.
- Beregn minimum konsentrasjon vi kan oppnå av komponent A i retentat strømmen. Hvor ren ville den produserte gassen B vært i dette tilfelle?
- Anta at vi klarer å oppnå en konsentrasjon av A i retentatet som er 25% høyere enn den du har beregnet i oppgave a). Hva blir da sammensetningen av permeat strømmen? Hvor mye av komponent B (gi svaret i %) mister vi med permeat strømmen?
- Hvor stort membranareal er nødvendig for å utføre denne separasjonen?

Oppgave 2/ Oppgave 2: Adsorpsjon (12p)

Ved å bruke en molekylsikt, skal vanndamp fjernes fra N₂ gass i en pakket kolonne ved 28°C.

Kolonnas høyde er 0.3 m, og bulk tettheten av partiklene er 712.8 kg/m³. Den opprinnelige

konsentrasjonen av vann i partiklene i kolonna er 0.01 kg H₂O/kg partikler, og massehastigheten av

N₂-gassen er 4052 kg/(m².h). Vann konsentrasjonen i gassen er ved innløp $c_0 = 926 \times 10^{-6}$ kg H₂O /kg N₂

«The break through» data for masseoverføringsonen er gitt i tabellen under. En verdi for $c/c_0 = 0.02$ er antatt for å være «the break point».

tid t [h]	0	9.0	9.2	9.6	10.0	10.4	10.8	11.3	11.5	12.0	12.5	12.8
Konsentrasjon c [kgH ₂ O/kgN ₂ x 10 ⁶]	<0.6	0.6	2.6	21	91	235	418	630	717	855	906	926

- Skisser typisk «break through» kurve c/c_0 som funksjon av tid. Beskriv aksene og forklar betydningen av forskjellige punkter og områder i figuren.
- Forklar hvilke fysiske prosesser påvirker formen på kurven?
- Bestem tiden frem til «break point» t_b , og høyden på ubrukt kolonne H_{UB} antatt følgende relasjon for forholdet mellom høyden på brukt kolonne H_B og total høyde på kolonnen gjelder:

$$\frac{H_B}{H_T} = \frac{t_b}{t_{tot}}$$

- Forklar hvordan forholdet brukt under c blir utledet fra «break-through» kurven?

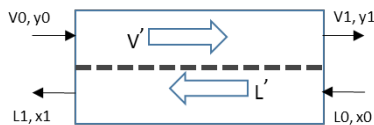
Oppgave 3/ Oppgave 3: Destillasjon (30p)

En blanding av 100 kmol/h benzen-toluen inneholdende 35 mol% benzen (en mettet væske) skal separeres i en destillasjonskolonne under atmosfæriske forhold. Produktene skal være et flytende destillat på 95 mol% (D) med en total kondensator, og et flytende bunnprodukt av 90 mol% toluene (B). Likevektsmolfraksjonsdata (x-y diagram for benzen-toluensystemet ved 1 atm (101,3 kPa) er gitt i Vedlegg 1.

- Tegn et prosessflytskjema, inkludert de to produktstrømmene (D, B) og interne strømmer (L_T , V_T , L_B , V_B). (3%)
- Beregn strømningsmengdene av produktene D og B. (3%)
- Bestem grafisk minimum antall teoretiske trinn (N_{min}). (2%)
- Bestem grafisk minimum refluxforhold (R_{min}). (4%)
- Bruk McCabe-Thiele-metoden til å bestemme antall teoretiske trinn (N) og bestem det optimale innmatingstrinn ($R=1.4 \cdot R_{min}$). (10%)
- Beregn det nødvendige energiforbruket (ΔH_{vap} for benzen og toluen er henholdsvis 34 kJ/mol og 38 kJ/mol). (8%)

Oppgave 4/ Oppgave 4: Absorpsjon (12p)

En membrankontaktor brukes til å absorbere en liten mengde A fra en blanding av A + B (antar 2 mol% A i B), hvor 98% A kreves for å bli absorbert. Fødegass-strømmen er 300 kmol / t, ved 30°C, 1atm. Rent vann ($L = 250$ kmol / t) brukes som absorbent i en motstrømstrøm (counter-current flow). Gass-væske likevektsforholdet for A i vann kan beskrives ved $y = 0,6x$ ved 30°C, 1atm.



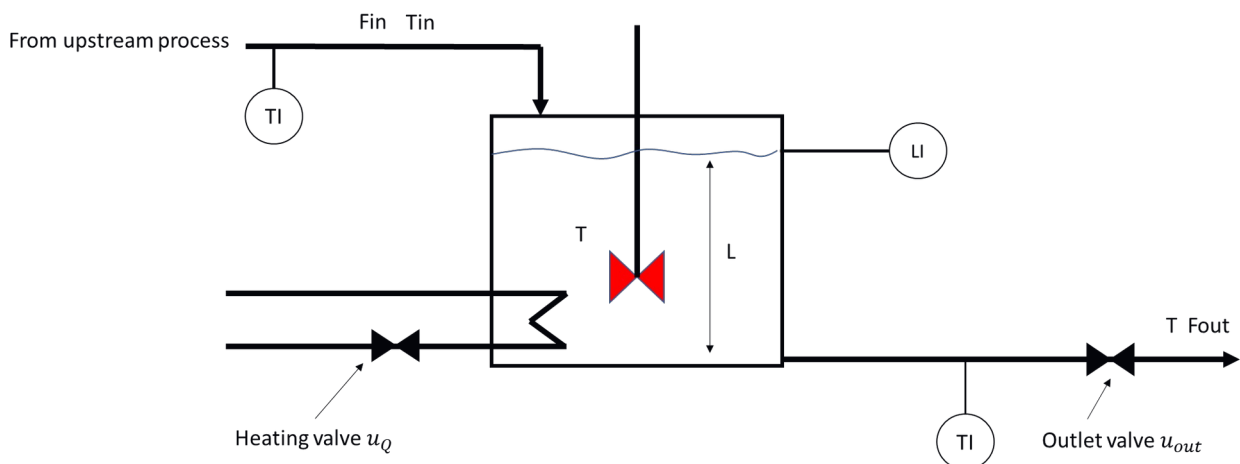
- Beregn molstrømmer og sammensetninger av gass- og væskeuttakene. (4p)
- Bestem minste flyt (Minimum flow) av væske (L_{min}). (4p)
- Nevn fordeler og ulemper ved bruk av membrankontaktor som absorber. (4p)

Oppgave 5/ Oppgave 5: Prosessregulering (6p)

- Forklar konseptet for tilbakekobling (feedback).
- Forklar konseptet foroverkobling (feedforward).
- Hva er betydningen av tidskonstanten τ (time constant)?

Oppgave 6/ Oppgave 6: Prosessregulering (10p)

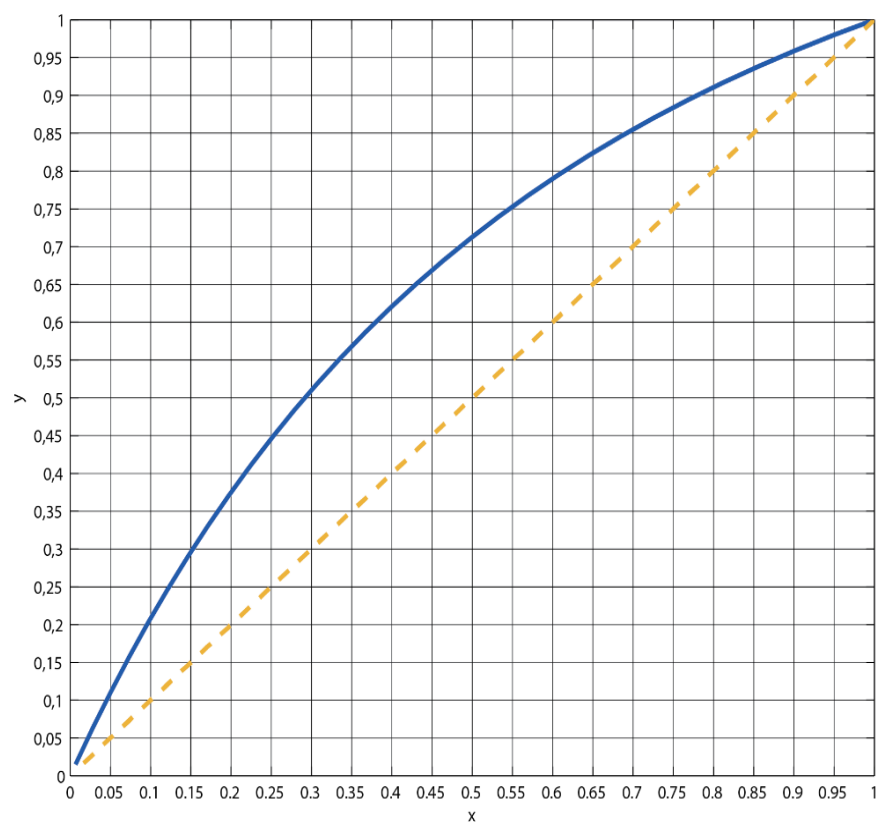
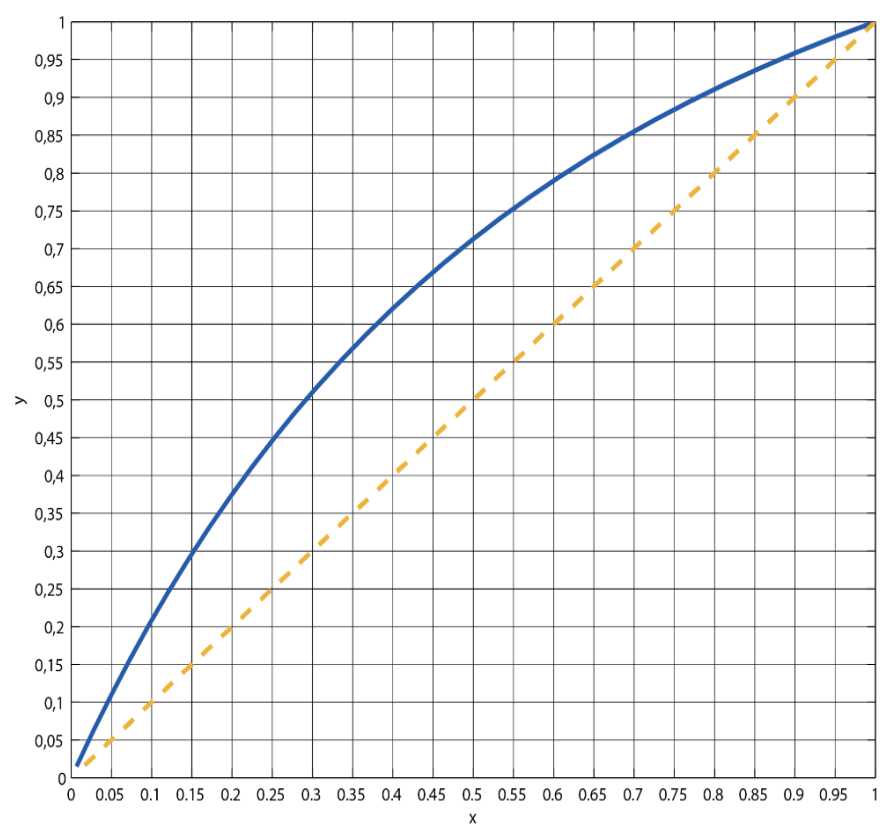
En oppvarmingstank har variable fødetemperatur og fødemengde. Prosessen har to ventiler, to temperatursensorer og en nivåmåling som vist i tegningen. Det er ingen andre målinger tilgjengelige enn de som er vist i figuren.



For å oppnå gode driftsbetingelser, må temperaturen T i tanken og nivået L holdes nær sine settpunktsverdier.

- a) Klassifiser variablene (MV, CV, viktige DV).
- b) Forslå en reguleringsstruktur basert på tilbakekobling for nivået.
- c) Forslå en enkel reguleringsstruktur basert på tilbakekobling for temperatur i tanken.
- d) Forslå en reguleringsstruktur basert på foroverkobling for temperatur i tanken.
- e) Forslå en reguleringsstruktur som kombinerer foroverkobling og tilbakekobling for temperatur i tanken.

Vedlegg 1. Equilibrium diagram of the benzene-toluene system at 1 atm.



ENGLISH

Problem 1: Membrane gas separation (30p)

A mixed gas feed stream contains 50% of gas A and 50% of gas B. These two gases should be separated in a membrane separator. Gas A is the gas that permits the fastest, while gas B is the most valuable gas we want as clean as possible. This can be, for example, biogas, in other words: A = CO₂ and B = CH₄).

The following information is provided about the system:

Feed stream	$V_{in} = 2 \text{ m}^3(\text{STP}) / \text{min}$	
Feed pressure	$p_r = 10 \text{ bar}$	
Permeate pressure	$p_p = 1 \text{ bar}$	1 bar = 76 cm Hg
Volumetric stage cut	$\theta = 0,53$	
Membrane thickness	$L = 10^{-6} \text{ m}$	
Permeability of A	$P_A = 400 \text{ Barrer}$	1 Barrer = $10^{-10} \text{ cm}^3(\text{STP}).\text{cm}/(\text{s}.\text{cm}^2.\text{cm Hg})$
Selectivity P_A/P_B	$\alpha = 30$	

The process can be described by the following equations assuming ideal mixing model:

- «transfer rate equation»

- «operating line»
$$y_{Ap} = \frac{y_{Ain} - y_{Ar}(1 - \theta)}{\theta}$$

- «volumetric flux equation»

- Draw a sketch of the process with descriptions of all streams. Explain the ideal mixing model, where do the equations come from and what do they describe.
- Calculate the minimum concentration of component A in the retentate stream that we can obtain. How clean would gas B be in this case?
- Suppose that the concentration of A in the retentate that we are able to achieve for the system is 25% higher than the one you calculated under a). What is then the composition of the permeate stream? How much of component B (give the answer in%) do we lose with the permeate stream?
- How large membrane area is needed in order to perform this separation?

Problem 2: Adsorption (12p)

Water vapor should be removed from N₂ gas in a packed column at 28 °C using a molecular sieve. The height of the column is 0.3 m and the bulk density of the particles is 712.8 kg/m³. The initial

concentration of water in the particles in the column is 0.01 kg H₂O/kg particles and the mass velocity of the N₂ gas is 4052 kg/(m².h). Water concentration in the gas at inlet is $c_0 = 926 \times 10^{-6}$ kg H₂O/kg N₂. The break through data for the mass transfer zone is given in the table below. A value for $c/c_0 = 0.02$ is assumed to be the "break point".

time t [h]	0	9.0	9.2	9.6	10.0	10.4	10.8	11.3	11.5	12.0	12.5	12.8
Concentration c [kgH ₂ O/kgN ₂ x 10 ⁶]	<0.6	0.6	2.6	21	91	235	418	630	717	855	906	926

- Draw a typical break-through curve c/c_0 as a function of time. Describe the axes and explain the different points and areas in the figure.
- Explain which physical processes influence the shape of the curve?
- Determine the time needed to reach the "break point" t_b , and the height of the unused column HUB assuming the following relationship for the ratio between the height of the used column H_B and the total height of the column H_T :
- Explain how the relation between the ratios used under c is deduced from the break-through curve?

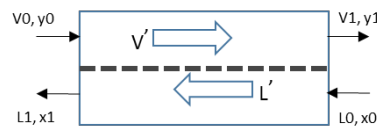
Problem 3: Distillation (30p)

A mixture of 35 mol% benzene and 65 mol% toluene is separated in a distillation tower at atmospheric conditions. The feed is a saturated liquid. The feed flow is 100 kmol/h. The distillate should be 95 mol% benzene (with a total condenser), while the bottom product (liquid) should be 90 mol% of toluene. The x-y diagram of the benzene-toluene system is given in the attachment 1.

- Draw a process flow diagram including the product flows (D, B) and internal flows (L_T , V_T , L_B , V_B). (3%)
- Determine D and B in the process. (3%)
- Find graphically the minimum number of equilibrium stages (N_{min}). (2%)
- Find the minimum reflux (R_{min}). (4%)
- Use the McCabe–Thiele method to determine the number of equilibrium stages N and determine the optimal feed-stage location ($R=1.4R_{min}$). (10%)
- Compute the required energy consumption (ΔH_{vap} for benzene and toluene are 34 kJ/mol and 38 kJ/mol, respectively). (8%)

Problem 4: Absorption (12p)

A membrane contactor is used to absorb a small amount of A from a mixture of A+B (assume 2 mol % A in B), in which 98% of A is required to be absorbed. The feed gas flow is 300 kmol/h, at 30°C, 1 atm. Clean water ($L=250$ kmol/h) is used as the absorbent in a countercurrent flow. The gas-liquid equilibrium relationship for the A in water can be described by $y=0.6x$ at 30°C, 1 atm.



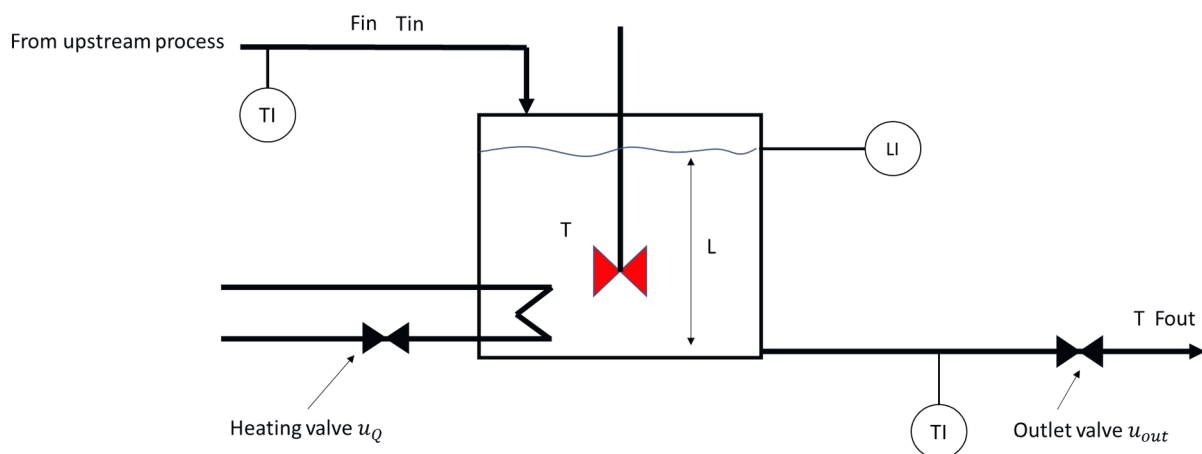
- Calculate the molar flows and compositions of the gas and liquid outlets. (4p)
- Determine the minimum flow of the liquid (L_{min}). (4p)
- State the advantages and disadvantages of using membrane contactor as an absorber. (4p)

Problem 5: Process control (6p)

- Explain the concept of feedback control.
- Explain the concept of feedforward control.
- Explain the significance of the time constant τ ?

Problem 6: Process control (10p)

In a heating tank, the feed temperature and feed flow rate are fluctuating. The process is equipped with two valves for adjusting heating and outflow. The process is further equipped with two temperature sensors and a level measurement.



To achieve a good process performance, the temperature T in the tank, and the liquid level L must be controlled tightly at their setpoints.

Tasks:

- a) Classify the variables (MV, CV, important DV).
- b) Propose a feedback control structure to control the level.
- c) Propose a simple feedback control structure to control the temperature.
- d) Propose a feed-forward control structure to control the temperature.
- e) Propose a combined feedforward-feedback structure to control the temperature.

Attachment 1. Equilibrium diagram of the benzene-toluene system at 1 atm.

