



# CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Institutionen för kemi- och kemiteknik

Avdelningen för kemiteknik

KURSNAMN	Separationsteknik 1, LKT335	<i>Förslag till lösningar av beräkningsuppgifter</i>
PROGRAM: namn åk / läsperiod	Högskoleingenjörsprogram i kemiteknik årskurs 2 läsperiod 3	
EXAMINATOR	Krister Ström	
TID FÖR TENTAMEN LOKAL	Fredag 12 oktober, kl. 14.00–18.00 M	
HJÄLPMEDEL	Valfri räknedosa/kalkylator med <b>tömt</b> minne. Egna anteckningar och kursmaterial är <b>ej</b> godkänt hjälpmedel. "Data och Diagram" av Sven-Erik Mörtstedt/Gunnar Hellsten "Tabeller och Diagram" av Gunnar Hellsten "Physics Handbook" av Carl Nordling/Jonny Österman "BETA $\beta$ " av Lennart Råde/Bertil Westergren Formelblad (vilket bifogats tentamenstesesen)	
ANSV LÄRARE: namn telnr besöker tentamen	Krister Ström 772 5708 ca. kl. 15.00 och 17.00	
DATUM FÖR ANSLAG av resultat samt av tid och plats för granskning	Svar till beräkningsuppgifter anslås tisdag 16 oktober på kurshemsidan. Resultat på tentamen anslås tidigast måndag 22 oktober. Visning av tentamen fredag 26 oktober kl. 12.30-13.00 i seminarierummet plan 2 i forskarhus II.	
ÖVRIG INFORM.	Tentamen består av teoriproblem, del A, och en beräkningsdel, del B. Omfattningen av del A är ca 40% av totalpoängen på tentamen. Poäng på respektive uppgift finns noterat i tentamenstesesen. För godkänd tentamen fordras 40% av tentamens totalpoäng.  Samtliga diagram och bilagor skall bifogas lösningen av tentamens-uppgiften. Diagram och bilagor kan <b>ej</b> kompletteras med vid senare tillfälle. Det är Ditt ansvar att Du besitter nödvändiga kunskaper och färdigheter. Det material som Du lämnar in för rättning skall vara väl läsligt och förståeligt. Material som inte uppfyller detta kommer att utelämnas vid bedömningen.  Betyggränser: 20-29 poäng betyg 3, 30-39 poäng betyg 4 och 40-50 poäng ger betyg 5.	

---

## **Del A: Teori**

- A1.** Varför väljer man att utforma en destillationsprocess som en kolonn, där ånga och vätska strömmar i motström? Beakta energi- och masstransportaspekter! (4p)
- A2.** Ange tre olika alternativ för att ordna vätskeföringen på en destillationsbotten! När är det fördelaktigt att använda den ena typen framför den andra? (3p)
- A3.** Hur påverkar tillflödets tillstånd ång- och vätskeflödena i en destillationskolonn? Motivera svaret! (3p)
- A4.** Varför sjunker separationsgraden om det utvecklas ett blandningsvärme under ett absorptionsförlopp? Motivera ditt svar! (2p)
- A5.** Beskriv två principiella sätt att åstadkomma kontakt mellan gas (eller ånga) och vätska vid separationsmetoderna destillation och absorption! (2p)
- A6.** Redogör för arbetssätt och funktion för en valfri apparatur för lakning som arbetar kontinuerligt i motström och är kommersiellt tillgänglig! Komplettera din beskrivning med en tydlig skiss! (3p)
- A7.** Beskriv för hur man kan förbehandla lakgodset vid lakningsoperationer för att få så effektiv lakning som möjligt! (1p)
- A8.** Nämn två fördelar och två nackdelar med en centrifugalextraktor! (2p)

## Del B: Beräkningsuppgifter

**B1.** En blandning av två ämnen, A och B, skall destilleras i en avdrivarkolonn så att en bottenprodukt hållande 90 mol-% B erhålls. Tillflödet, som är kokvarmt, är 100 kmol/h och håller 50 mol-% A.

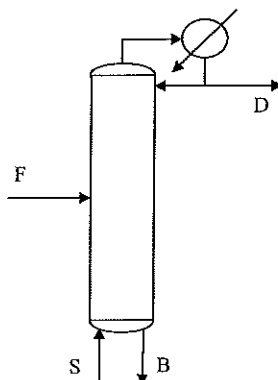
- Beräkna mängd och sammansättning av destillatet samt antal erforderliga bottnar i kolonnen, med Sorels metod, om produktionen bottenprodukt är 50 kmol/h.

Jämviktssambandet för detta system kan tecknas  $y=2x$ .

(5p)

**B2.** En blandning av etanol och vatten ska separeras i en destillationskolonn utrustad med totalkondensator samt arbeta vid ett yttre återflödesförhållande av 3.0 vid 760 mmHg. Uppkokningen i kolonnen sker med direktång, S, se figur nedan.

Det kokvarma vätskeformiga tillflödet, 150 kmol/h, håller 35 mol-% etanol och ska separeras till två produkter hållande 80 respektive 10 mol-% etanol.



- a) Vilket flöde av vattenånga, S, fordras per timma för separationen?
- b) Hur stort kommer bottenproduktflödet att vara per timma?
- c) Hur många verkliga bottnar fordras för separationen då totalverkningsgraden är 0.80?

Jämviktsdiagram för systemet etanol/vatten bifogas.

(12p)

**B3.** En absorptionskolonn ska dimensioneras för ett gasflöde på 1.5 kg/s och ett vätskeflöde på 3.0 kg/s. Gasens densitet är 1.2 kg/m<sup>3</sup> och vätskans 1000 kg/m<sup>3</sup>. Vätskans viskositet är 1.0·10<sup>-3</sup> kg/m·s och dess ytspänning 72 dyn/cm.

- Bestäm kolonnens diameter om silbottnar skall användas och att bottenavståndet mellan dem planeras vara 24 inch (0.6 m). Man räknar med att fallrören upptar 25% av tvärsnittsytan och att gashastigheten är 80% av gashastigheten vid flödning. (1 ft = 0.3048 m)

(7p)

---

**B4.** Rapsolja ska utvinnas ur rapsfrön i en lakningsanläggning bestående av två ideala lakningssteg. Ingående lakgods, 100 kg/h, håller 40 vikt-% lakbar rapsolja och resten inerta växtdelar. Man önskar en extraktproduktion på 170 kg/h som håller 40 vikt-% rapsolja. Underströmmen kvarhåller 1.0 kg lösning per kg inert material.

- Vad kommer sammansättningen att vara i utgående underström och vilket flöde av extraktionsvätska fordras för separationen?

(6p)

Göteborg 2018-10-01  
Krister Ström

---

# Separationsteknik 1

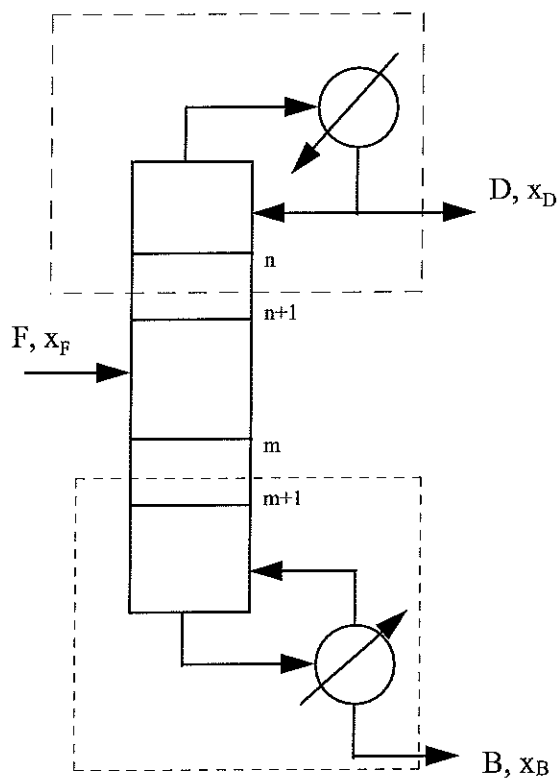
## Formelsamling

## DESTILLATION

Relativ flyktighet: 
$$\alpha_{1,2} = \frac{\frac{y_1}{x_1}}{\frac{y_2}{x_2}}$$

där x anger vätskefassammansättning  
 y anger ångfassammansättning  
 1 anger lättflyktig komponent  
 2 anger tung komponent

Destillation:



Materialbalanser:

$$V_{y_{n+1}} = Lx_n + Dx_D$$

$$\bar{V}_{y_{m+1}} = \bar{L}x_m - Bx_B$$

q-linje:

$$y = -\frac{q}{1-q}x + \frac{x_F}{1-q}$$

Beräkning av diameter för bottenkolonner

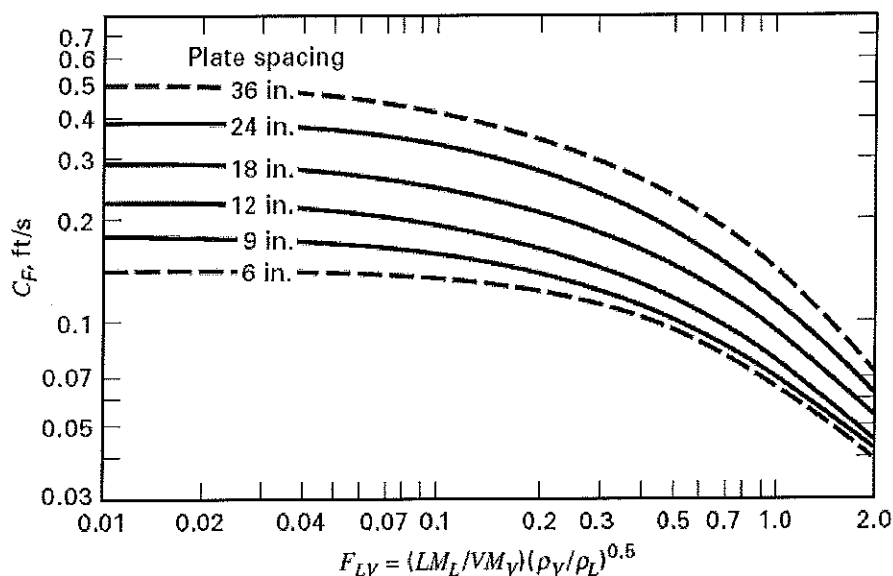


Figure 6.24 Entrainment flooding capacity in a trayed tower.

$$C = F_{ST}F_F F_{HA}C_F \quad \text{where}$$

$$F_{ST} = \{\text{surface tension factor}\} = (\sigma/20)^{0.2} \quad \{\text{liquid surface tension, dyne/cm}\}$$

$$F_F = \{\text{foaming factor}\} = 1.0 \text{ for many absorbers}$$

$$F_{HA} = \begin{cases} 1.0 & \text{for } A_h/A_a \geq 0.10 \\ 5(A_h/A_a) + 0.5 & \text{for } 0.06 \leq A_h/A_a \leq 0.1 \end{cases}$$

$A_h$  is the area open to vapour as it penetrates into the liquid on a tray.

$A_a$  is the active area for the tray.

$$U_f = C \left( \frac{\rho_L - \rho_V}{\rho_V} \right)^{1/2} \quad U_f \text{ är gashastigheten vid flödning}$$

Beräkning av diameter för packade kolonner

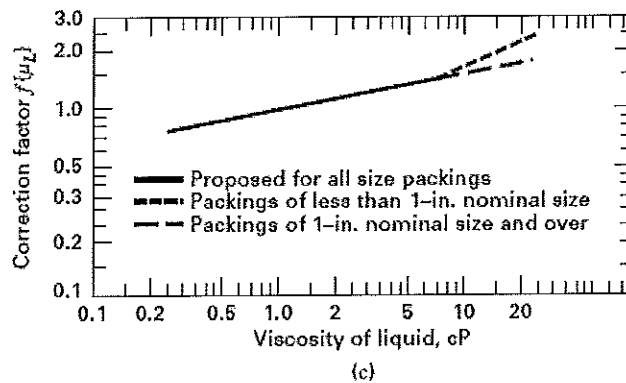
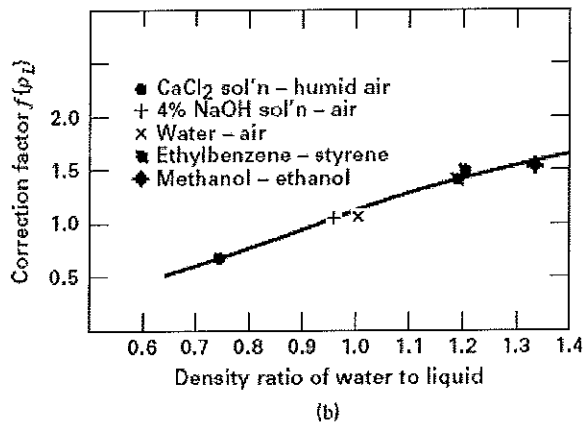
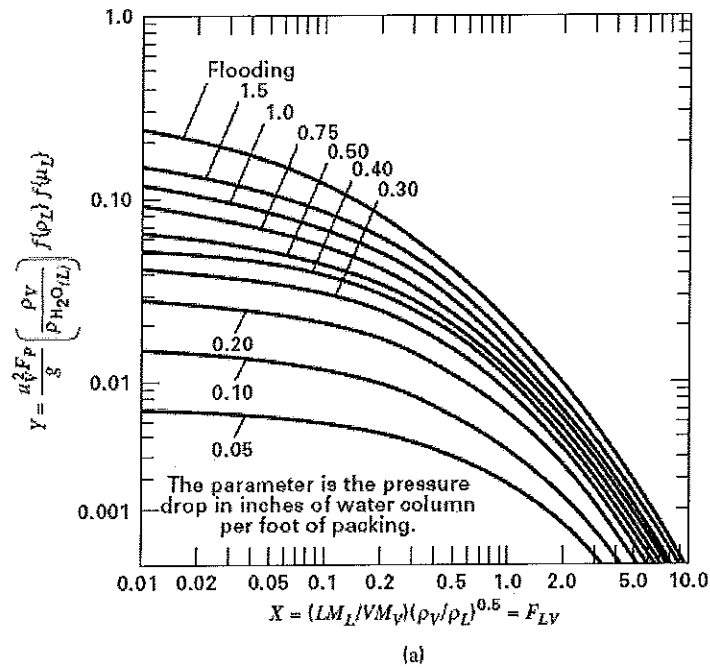


Figure 6.36 (a) Generalized pressure-drop correlation of Leva for packed columns. (b) Correction factor for liquid density. (c) Correction factor for liquid viscosity. [From M. Leva, *Chem. Eng. Prog.*, 88 (1), 65-72 (1992) with permission.]



## ABSORPTION

Vätningshastigheten: 
$$L_W = \frac{L'}{\rho_L \cdot S_B}$$

$L_W > 2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  för ringar med diameter mellan 25 mm och 75 mm, och för galler med delning mindre än 50 mm.

$L_W > 3.3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  för större packningsmaterial.

Bindelinjens lutning: 
$$\frac{y - y_i}{x - x_i} = - \frac{k_L \cdot a \cdot C_T}{k_G \cdot a \cdot P}$$

Packningshöjd: Vid låga halter: 
$$l_T = \frac{V}{k_G \cdot a \cdot P} \int_{y_2}^{y_1} \frac{dy}{(y - y_i)} = \frac{V}{K_G \cdot a \cdot P} \int_{y_2}^{y_1} \frac{dy}{(y - y^*)}$$

$$l_T = \frac{L}{k_L \cdot a \cdot C_T} \int_{x_2}^{x_1} \frac{dx}{(x_i - x)} = \frac{L}{K_L \cdot a \cdot C_T} \int_{x_2}^{x_1} \frac{dx}{(x^* - x)}$$

$$l_T = \frac{V'}{k_G \cdot a \cdot P} \int_{Y_2}^{Y_1} \frac{dY}{(Y - Y_i)} = \frac{V'}{K_G \cdot a \cdot P} \int_{Y_2}^{Y_1} \frac{dY}{(Y - Y^*)}$$

$$l_T = \frac{L'}{k_L \cdot a \cdot C_T} \int_{X_2}^{X_1} \frac{dX}{(X_i - X)} = \frac{L'}{K_L \cdot a \cdot C_T} \int_{X_2}^{X_1} \frac{dX}{(X^* - X)}$$

Vid rät driftlinje  
och rät jämvikts-  
kurva:

$$l_T = \frac{V}{K_G \cdot a \cdot P} \cdot \frac{1}{1 - \frac{m \cdot V}{L}} \cdot \ln \frac{y_1 - m \cdot x_1}{y_2 - m \cdot x_2}$$

$$l_T = \frac{L}{K_L \cdot a \cdot C_T} \cdot \frac{1}{\frac{L}{m \cdot V} - 1} \cdot \ln \frac{y_1 - m \cdot x_1}{y_2 - m \cdot x_2}$$

---

Vid rät driftlinje och rät jämviktskurva gäller:

$$H_{OG} = H_G + \frac{m \cdot G}{L} \cdot H_L$$

$$H_{OL} = H_L + \frac{L}{m \cdot G} \cdot H_G$$

## SYMBOLFÖRTECKNING:

### ABSORPTION

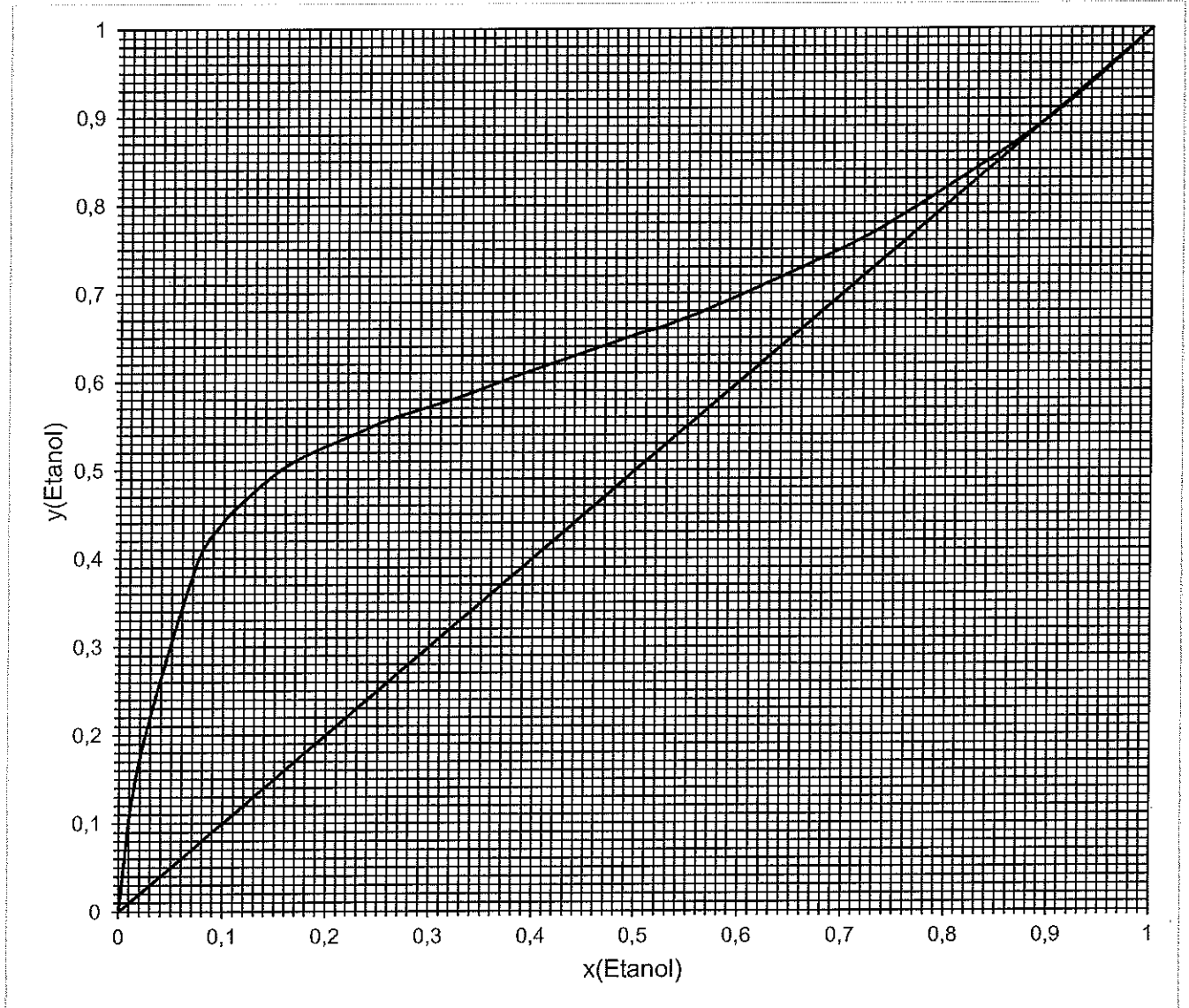
$a$	massöverförande yta per tornvolym, $m^2/m^3$
$C_{sb, flood}$	kapacitetsparameter, ft/s
$C_T$	vätskans totalkoncentration, $kmol/m^3$
$e$	packningens porositet, -
$F$	packningsfaktor, $m^{-1}$
$F_{lv}$	flödesparameter, -
$g$	tyngdaccelerationen, $m/s^2$
$V$	gasflöde, $kmol/(m^2 \cdot s)$
$G'$	gasflöde, $kg/(m^2 \cdot s)$
$V'$	inert gasflöde, $kmol/(m^2 \cdot s)$
$H_G$	höjd svarande mot en massöverföringsenhet, gasfilm, m
$H_L$	höjd svarande mot en massöverföringsenhet, vätskefilm, m
$H_{OG}$	höjd svarande mot en massgenomgångsenhet, gasfasstorheter, m
$H_{OL}$	höjd svarande mot en massgenomgångsenhet, vätskefasstorheter, m
$k_G$	massöverföringstal, gasfilm, $kmol/(m^2 \cdot s \cdot atm)$
$k_L$	massöverföringstal, vätskefilm, m/s
$K_G$	massgenomgångstal baserat på gasfasstorheter, $kmol/(m^2 \cdot s \cdot atm)$
$K_L$	massgenomgångstal baserat på vätskefasstorheter, m/s
$L$	vätskeflöde, $kmol/(m^2 \cdot s)$
$L'$	vätskeflöde, $kg/(m^2 \cdot s)$
$L''$	inert vätskeflöde, $kmol/s$
$L_W$	vätningshastighet, $m^2/s$
$m$	jämviktskurvans lutning, -
$P$	totaltryck, atm
$S_B$	specifik yta hos packningsmaterialet, $m^2/m^3$
$u_G$	gashastighet, m/s
$u_{nf}$	gashastighet vid flödning (baserad på aktiv area), ft/s
$x$	molbråk i vätskefas, -

---

$X$	molbråksförhållande i vätskefas, mol absorberbart/mol inert vätska
$y$	molbråk i gasfas, -
$Y$	molbråksförhållande i gasfas, mol absorberbart/mol inert gas
$l_T$	packningshöjd, m
$\mu_L$	vätskans dynamiska viskositet, Pa·s
$\mu_W$	dynamiska viskositeten för vatten vid 20°C, Pa·s
$\rho_G$	gasens densitet, kg/m <sup>3</sup>
$\rho_L$	vätskans densitet, kg/m <sup>3</sup>
$\rho_W$	densiteten för vatten vid 20°C, kg/m <sup>3</sup>
$\sigma$	ytpänning, dyn/cm (=mN/m)

Jämviktsdiagram till uppgift 2.

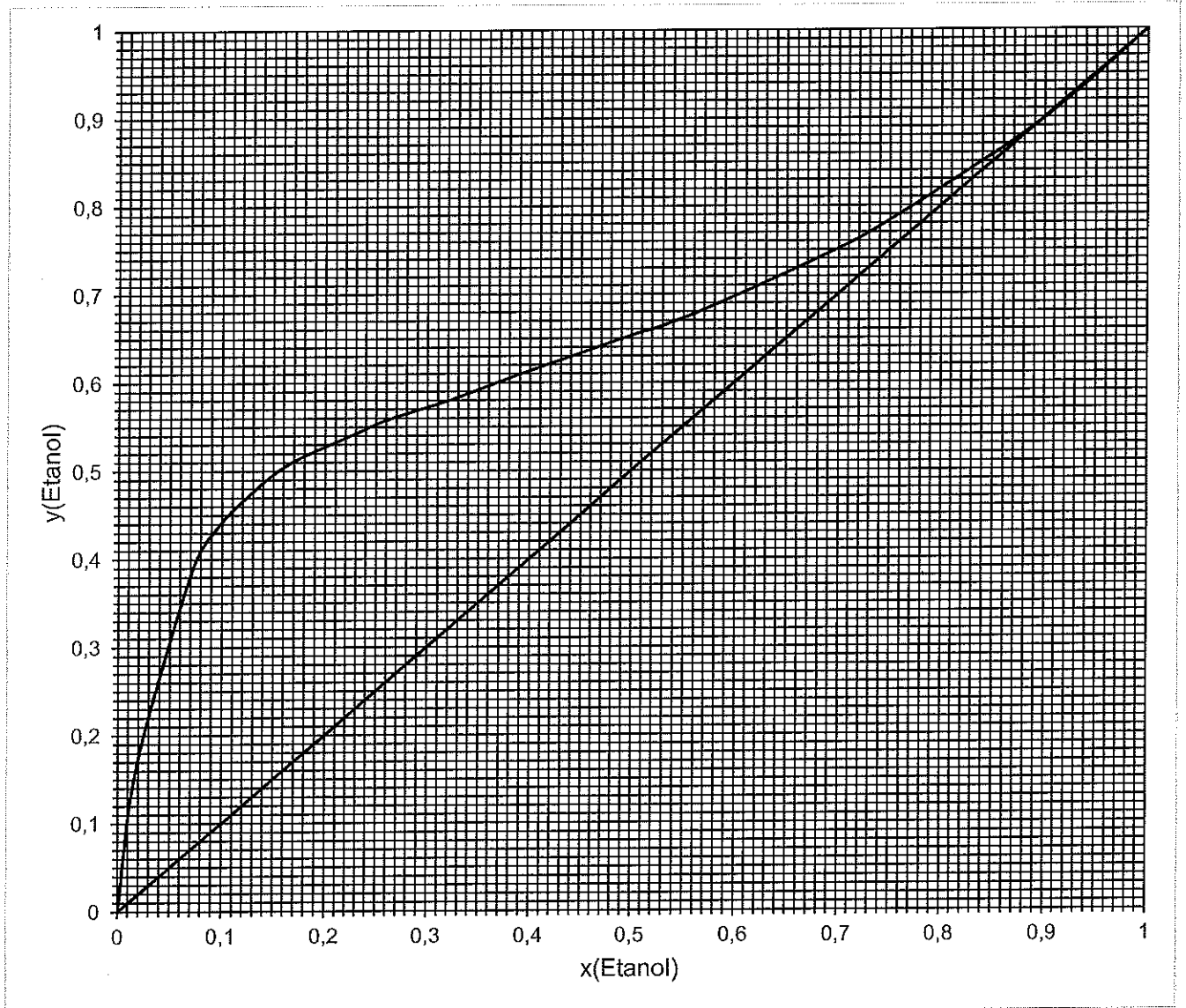
Jämviktsdiagram etanol/vatten vid 760 mmHg.



Anonymkod: \_\_\_\_\_

## Jämviktsdiagram till uppgift 2.

Jämviktsdiagram etanol/vatten vid 760 mmHg.



Anonymkod: \_\_\_\_\_

B1

DATA:  $x_B = 0.10$

$x_F = 0.50$

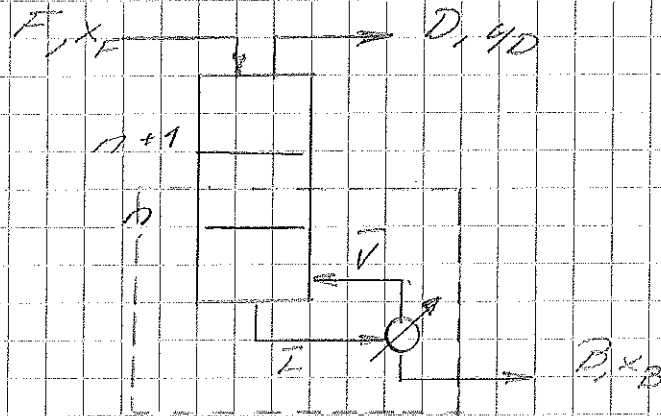
$F = 100 \text{ kmol/h}$

$B = 50 \text{ kmol/h}$

$y = 2x$

SÖKT:  $D, y_D, R$

LÖSNING:



TOTALBALANS:  $F = D + B \Rightarrow \underline{D = 50 \text{ kmol/h}}$

KOMP. BALANS:  $F x_F = D y_D + B x_B \quad \underline{y_D = 0.90}$

ANTAL BOTTNAR BESTÄMS MED SOBELL METOD.

KOMPONENTBALANS ENNET SYSTEMGRÄNS OVAN.

$$\bar{L} x_{n+1} = \bar{V} y_n + B x_B \quad x_{n+1} = \frac{\bar{V}}{\bar{L}} y_n + \frac{B}{\bar{L}} x_B$$

$\bar{V} = \{D\} = 50 \text{ kmol/h} \quad \bar{L} = \{F\} = 100 \text{ kmol/h}$

LÖS KOMPONENTBALANS (1) OCH JMV. SAMBAND

$y = 2x$  TILL AVBROTTSKRITERIET  $y_D = 0.90$  UPPNÅS.

DATA SAMMAN I TABELL!

$n$	$x_n$	$y_n$	AVBOTTKRITERIUM
0	0,10 (= $x_B$ )	0,20	
1	0,15	0,30	
2	0,20	0,40	
3	0,25	0,50	
4	0,30	0,60	
5	0,35	0,70	
6	0,40	0,80	
7	0,45	0,90	TOPPEN NÄRD!
8	0,50		TILLFLÖDET FRÅN EN TÄNKT BOTTEN NR 8

SVAR:  $D = 50 \text{ kmol/h}$ ,  $y_D = 0,90$ ,  $n = 8$

B2

DATA:  $R = 3.0$

$$F = 150 \text{ kmol/h}$$

$$x_F = 0.35$$

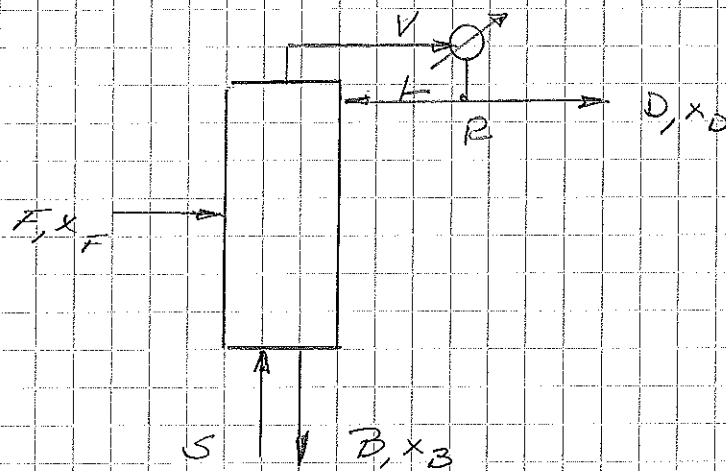
$$x_D = 0.80$$

$$x_B = 0.10$$

SOKT:

a)  $S$     b)  $B$     c)  $n$      $DA^{\circ}$      $\eta = 0.80$

LÖSUNG:



a) BEST.  $S!$

T.B.:  $F + S = D + B$

K.B.:  $F x_F + S y_S = D x_D + B x_B$

$y_S = 0.0$  DA  $S$  INTE INNEHÄLLER ETOM.

$$\left. \begin{aligned} V = \bar{V} = S &\Rightarrow \left. \begin{aligned} \delta = L + D \\ R = L/D \end{aligned} \right\} \begin{aligned} S &= D(R + 1) \\ S &= 4D \end{aligned} \end{aligned} \right\}$$

T.B.:  $F + 4D = D + B \Rightarrow B = F + 3D$

K.B.:  $F x_F = D x_D + (F + 3D) x_B$

$$D = \frac{F(x_F - x_B)}{x_D - 3x_B} \Rightarrow D =$$



Komp

$$F x_F = D x_D + (F + 3D) x_B$$

$$F x_F = D x_D + F x_B + 3D x_B$$

$$F x_F - F x_B = D x_D + 3D x_B$$

$$F(x_F - x_B) = D(x_D + 3x_B)$$

$$D = \frac{F(x_F - x_B)}{x_D + 3x_B} \Rightarrow D = 34,1 \text{ kmol/h}$$

$$\underline{D = 136,4 \text{ kmol/h}}$$

b/ BEST. B!

$$B = F + 3D \Rightarrow \underline{B = 252,3 \text{ kmol/h}}$$

c/ ÖVRE DRIFTLINJEN  $y_n = \frac{p}{p+1} x_{n+1} + \frac{x_D}{p+1}$  KONSTRUERAS

I JMV. KURVAN SOM BIFOGATS TEMA MEN

Ö.D. KONSTRUERAS FRÅN  $(x_D; x_D)$   $(0,80; 0,80)$

TILL  $(0; \frac{x_D}{p+1})$   $(0; 0,20)$ . NEDRE DRIFTLINJEN

KONSTRUERAS FRÅN 9:NINGENS SKÄRNING MED

Ö.D. OCH PUNKTEN  $(x_B; 0)$   $(0,10; 0)$

GRAFISK LÖSNING AV KOMPONENTBALANS OCH

JMV. SAMBAND GER 8 IDEALA BOTTNAR

ME D  $\eta = 0,80$  ERHÅLLS 10 VERKLIGA BOTTNAR

SVAR: a/ 136,4 kmol/h b/ 252,3 kmol/h  
c/ 10 BOTTNAR

B3

DATA:  $V = 1.5 \text{ kg/s}$

$$L = 3.0 \text{ kg/s}$$

$$S_V = 1.2 \text{ kg/m}^3 \quad S_L = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = 1.0 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$$

$$\sigma = 72$$

SÖKT: KOLONNENS DIAMETER

LÖSNING:

MASSFLÖDEN OCH DENSITETER GIVNA.

BELASTNINGSPARAMETERN KAN BERÄKNAS

$$F_{LV} = \frac{L}{V} \sqrt{\frac{S_V}{S_L}} \Rightarrow F_{LV} = 0.07$$

DIAG 1 FORMELSAMLING GER FLÖDNINGSPARAMETERN

$$C_F = 0.35 \text{ ft/s} \Rightarrow C_F = 0.107 \text{ m/s}$$

UTVECKLAD FLÖDN. PARAM  $C = F_{ST} F_F F_{HA} C_F$

$$F_{ST} = \left(\frac{\sigma}{20}\right)^{0.2} \quad F_F = F_{HA} = 1.0 \Rightarrow C = 0.138 \text{ m/s}$$

GASSHASTIGHETEN VID FLÖDNING BERÄKNAS  $u_p = C \left(\frac{S_L - S_V}{S_V}\right)^{1/2}$

$$u_p = 3.98 \text{ m/s} \text{ OCH MED KOMPRESSION PÅ 30\%}$$

$$\text{ERHÅLLS } u = 3.19 \text{ m/s.}$$

$$\text{AKTIVA AREAN ÄR } A_{\text{AKTIV}} = \frac{V/S_V}{u} \Rightarrow A_{\text{AKTIV}} = 0.89 \text{ m}^2$$

$$\text{AKTIVA AREAN ÄR 75\% AV TVÄRSNITTSAREAN} \Rightarrow A = 0.52 \text{ m}^2$$

$$\Rightarrow \text{DIAMETERN ÄR } \underline{\underline{0.82 \text{ m}}}$$

$$\text{SVAR: } \underline{\underline{0.82 \text{ m}}}$$

B4

DATA:  $L_0 = 100 \text{ kg/h}$

$$x_A^0 = 0.40$$

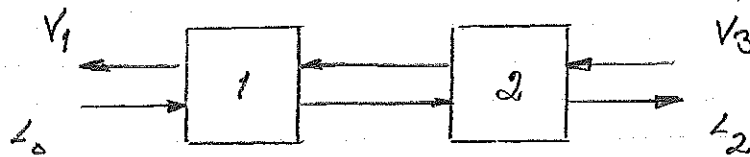
$$V_1 = 170 \text{ kg/h}$$

$$y_A^1 = 0.40$$

$$\frac{S+A}{C} = 1.0$$

SÖKT:  $L_2$  TILL SAMMANSÄTTNING OCH  $V_3$  TILL STÖRLEK.

LÖSNING:



BERÄKNA FIKTIVA STRÖMMEN R TILL STÖRLEK OCH SAMMANSÄTTNING.

$$\leftarrow : R = V_1 - L_0 \Rightarrow R = 70 \text{ kg/h}$$

$$R x_A^R = V_1 y_A^1 - L_0 x_A^0 \Rightarrow x_A^R = 0.40$$

$$R x_S^R = V_1 y_S^1 \Rightarrow x_S^R = 1.46$$

GEOMETRISK ORT FÖR UNDERSTRÖMMAR

$$\frac{S+A}{C} = 1 \Rightarrow x_S = \frac{1}{2} - x_A$$

TRIANGELDIAGRAM KONSTRUERAS GOFU OCH KÄNDA STRÖMMAR LÄGS IN I DIAGRAM. GRAFISK LÖSNING FÖR TVÅ STEG!

AVLÄSNING I DIAG GER  $x_A^2 = 0.13$

$$x_S^2 = 0.37$$

$$x_C^2 = 0.50$$

SOM SAMMANSÄTTNING I  $L_2$ .

HÄKTINGSREGENN RUNT M GER  $V_3$  UTIFRÅN KÄNT  $L_0$

$$L_0 a = V_3 b$$

$$a = 76$$

$$b = 37$$

$$\underline{V_3 = 195 \text{ kg/h}}$$

SVAR: EXTRAKTIONSVÄTTKA 195 kg/h. SAMMAN-

STÄTTNING HOS  $L_2$ ,  $x_A^2 = 0.13$ ,  $x_C^2 = 0.37$  OCH

$$\underline{\underline{x_C = 0.50}}$$

