



# CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

## Institutionen för kemi- och bioteknik

### Avdelningen för kemiteknik

KURSNAMN	Bisoseparationsteknik, KAA150	<i>Medförslag till lösningar av beräkningsuppgifter.</i>
PROGRAM: namn åk / läsperiod	Civilingenjörsprogram bioteknik årskurs 3 läsperiod 3	
EXAMINATOR	Krister Ström	
TID FÖR TENTAMEN	Onsdag 11 april 2012, kl 14.00-18.00	
LOKAL	V-salar	
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 tentamensesen)	
ANSV LÄRARE: namn telnr besöker tentamen	Krister Ström 772 5708 ca. kl. 15.00 och 16.30.	
DATUM FÖR ANSLAG av resultat samt av tid och plats för granskning	Svar till beräkningsuppgifter anslås 12 april på kurshemsidan, studieportalen. Resultat på tentamen meddelas tidigast 26 april efter kl 12.00 via e-post. Granskning 3 maj kl 12.30-13.00 samt 4 maj kl. 12.30-13.00 i seminarierummet, forskarhus II plan 2.	
ÖVRIG INFORM.	Tentamen består av en teoridel med sju teorifrågor samt en räknedel med fyra räkneuppgifter. Poäng på respektive uppgift finns noterat i tentamensesen. För godkänd tentamen fordras 50% av tentamens totalpoäng. Samtliga diagram och bilagor skall bifogas lösningen av tentamensuppgiften. Diagram och bilagor kan <u>ej</u> 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.  Betyg 3 motsvarar 30-39p, betyg 4 motsvarar 40-49p och betyg 5 50-60p.	

---

## Del A: Teori

**A1.** Vid separationer diskuteras begreppen *separating agent* respektive *drivande kraft* för en separation. Vad är dessa för separationsmetoderna

- Destillation?
- Filtrering?
- Vätska-vätskaextraktion?

(3p)

**A2.** Du ska välja utrustning till en destillationsprocess där separationen ska ske nära vakuum. Vilken typ av stegvis kontaktanordning respektive återkokare ska du välja? Motivera svaret!

(3p)

**A3.** Beskriv hur en packad kolonn är konstruerad för att åstadkomma så god kontakt som möjligt mellan ånga och vätska!

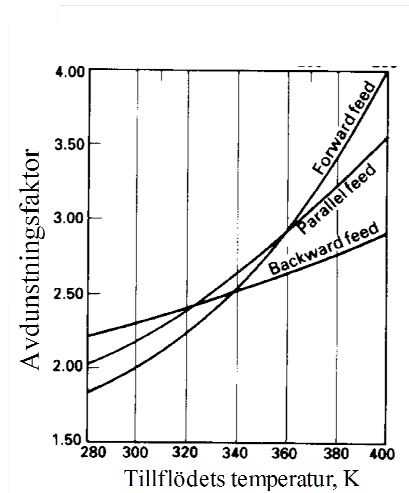
(3p)

**A4.**

- När bör man använda spray- respektive bubbelkolonn ur masstransportaspekt då man ska genomföra en absorptionsprocess?
- Förklara funktionen hos spray- respektive bubbelkolonn!

(5p)

**A5.** Studerar man avdunstningsfaktor som funktion av tillflödets temperatur för en indunstningsanläggning bestående av tre effekter erhålls kurvor för med-, mot, och tvärströmskoppling enligt figuren nedan.



- Varför är medströmskoppling lämplig vid hög temperatur hos tillflödet då man önskar en hög avdunstningsfaktor? Motivera svaret!
- Varför är motströmskoppling lämpligt vid låg temperatur hos tillflödet? Motivera svaret!

(4p)

---

**A6.** Namnge ett valfritt filter och beskriv kortfattat dess funktion! Ange om filtret är kontinuerligt eller satsvis arbetande.

(3p)

**A7.** Vilka faktorer bör man särskilt ta i beaktande, när det gäller att åstadkomma effektiv vätska-vätskaextraktion?

(3p)

---

## **Del B: Problemdel.**

**B1.** I ett destillationstorn, utrustad med återkokare och totalkondensor, ska en kokvarm vätskeformig ström på 300 kmol/h hållande 45 mol-% bensen och resten toluen separeras till två produkter som håller 90 mol-% bensen respektive 95 mol-% toluen. Separationen sker vid 760 mmHg (100 kPa) och kolonnen arbetar vid ett yttre återflödesförhållande som är 1.5 gånger det minimala. Återflödet är kokvarmt då det påförs till destillations-kolonnen.

- Vilka produktflöden kan förväntas från kolonnen?
- Hur många verkliga bottenar fordras för separationen då totalverkningsgraden är 75%?
- Vilken temperatur har återflödet då det påförs kolonnen?

### Givna data

Jämviktsdiagram för systemet bensen-toluen bifogas.

Ångtryck

$$\log P_i^0(\text{mmHg}) = A_i - \frac{B_i}{T(^{\circ}\text{C}) + C_i}$$

Komponent i	A	B	C
Bensen	6.90565	1211.033	220.790
Toluen	6.95464	1344.800	219.482

(11p)

**B2.** En en-effektsindunstare används för att indunsta en natriumhydroxidlösning från 15 till 40 vikts-%. För detta fall är ångförbrukningen 2 kg/s (10 bar mättad ånga). Trycket i effekten är 1 bar och temperaturen på tillflödet är 60°C.

- Beräkna hur stort flöde som kan indunstas då utgående koncentration är 40 vikts-%.

Dürring- och entalpidiagram för NaOH bifogas.

(6p)

**B3.** En fällningsanläggning producerar 100 ton/dag av ett titandioxidpigment, vilket måste lakas för att hålla en renhet av minst 98% i torrt tillstånd. Pigmentet framställs genom fällning. Materialet är efter fällningen förorenat med 1 ton saltlösning per ton pigment. Saltlösningen håller 0.55 ton salt per ton saltlösning. Materialet lakas i motström med rent vatten och det har visat sig att underströmmen håller kvar 0.5 kg lösningsmedel per kg inert material. Verkningsgraden för anläggningen är 80%.

- Hur många verkliga laksteg erfordras, om rent vatten tillförs som lakemedel i en mängd av 200 ton/dag

(10p)

---

**B4.** För att bestämma medelvärdet för det specifika filtrermotståndet kan mätningar göras i ett laboratoriefilter, varvid erhållen filtratvolym bestäms för olika tider. Resultatet från ett försök då trycket var konstant ges i tabellen nedan.

- Beräkna medelvärdet för det specifika filtrermotståndet samt filtermediets motstånd då följande data gäller för försöket;

Filtreringstryck	$0.8 \cdot 10^5$ Pa
Filterarea	$0.002$ m <sup>2</sup>
Filterkakans porositet	0.69
Andel fast fas i suspensionen	5 vikts-%
Filtratets densitet	$1000$ kg/m <sup>3</sup>
Filtratets viskositet	$0.8 \cdot 10^{-3}$ Pas
Fasta fasens densitet	$2600$ kg/m <sup>3</sup>

$V \cdot 10^4$ [m <sup>3</sup> ]	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
t [s]	5.3	9.9	16.2	23.5	32.4	42.7	54.0	67.1	81.0

(9p)

Göteborg 2012-03-30  
Krister Ström

---

# Bioseparationsteknik

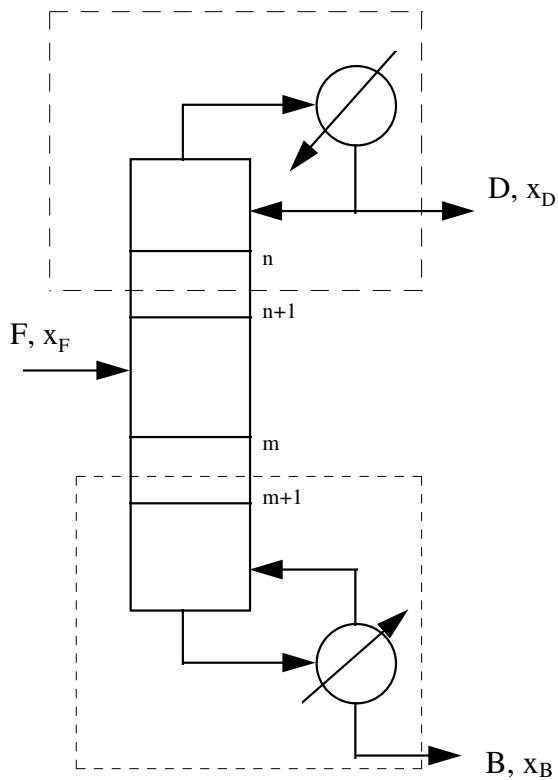
## Formelsamling

## 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:

$$Vy_{n+1} = Lx_n + Dx_D$$

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

q-linje:

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

Beräkning av diameter för bottenkolonner

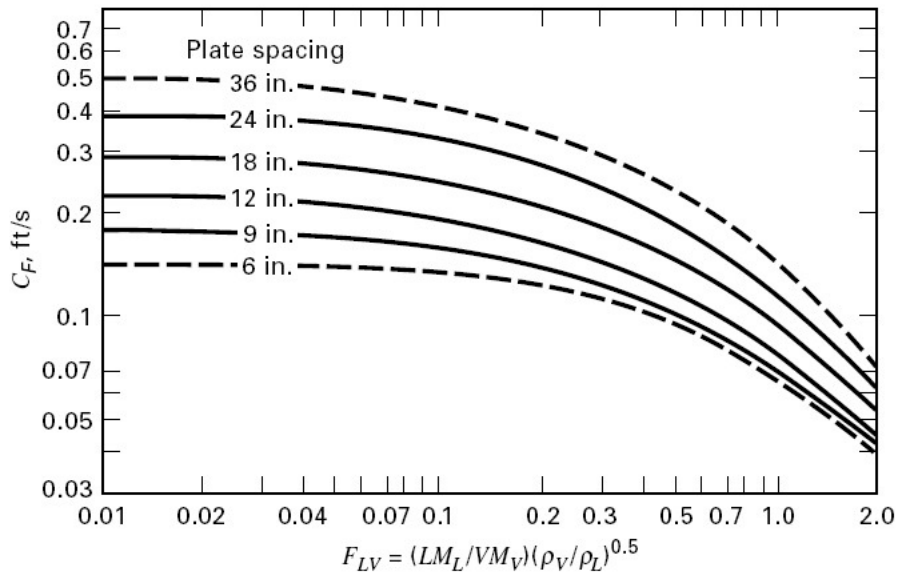


Figure 6.24 Entrainment flooding capacity in a trayed tower.

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

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

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

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

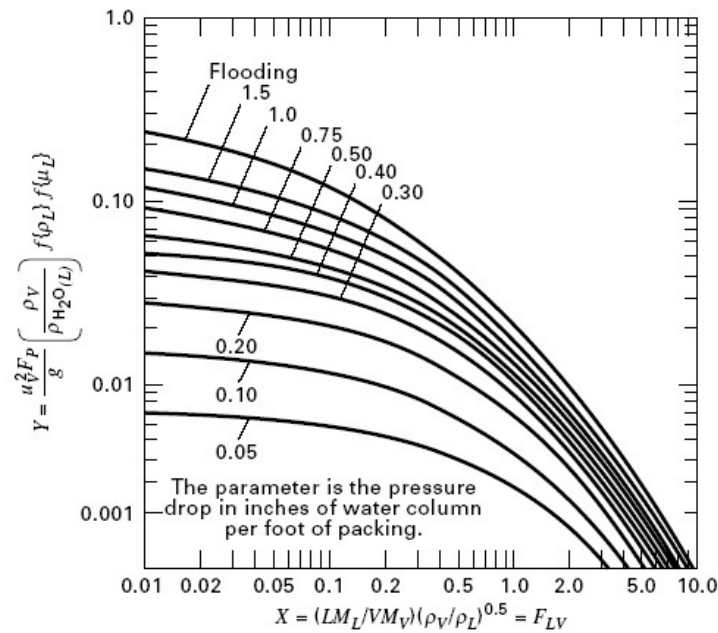
$A_h$  is the area open to vapour as it penetrates into the liquid on a tray.

$A_a$  is the active area for the tray.

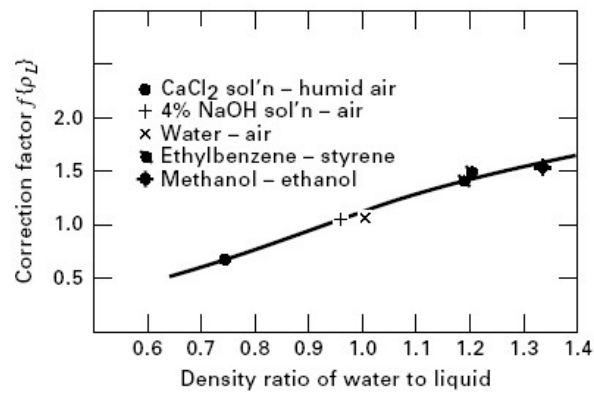
$$U_f = C \left( \frac{\rho_L - \rho_V}{\rho_V} \right)^{1/2} \quad U_f \text{ är gashastigheten vid flödning}$$



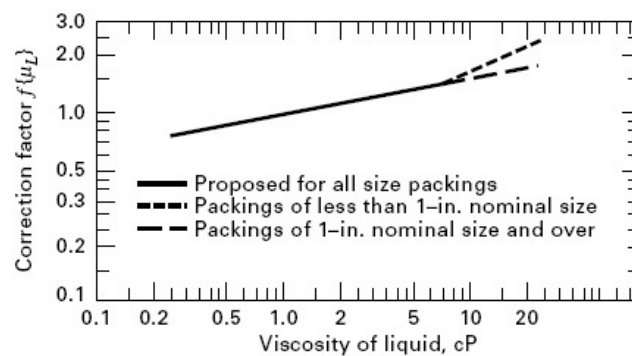
## Beräkning av diameter för packade kolonner



(a)



(b)



(c)

**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

Vättningshastigheten: 
$$L_w = \frac{L'}{\rho_L \cdot S_B}$$

$L_w > 2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  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:

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

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

## FILTRERING

$$\frac{dV}{dt} = \frac{A^2 \Delta P}{\mu(c \alpha_{av} V + AR_m)}$$

$$c = \frac{\rho J}{(1-J) - \frac{\varepsilon_{av}}{1-\varepsilon_{av}} J \frac{\rho}{\rho_s}}$$

## SEDIMENTERING

Fri sedimentering:

$$v = \frac{D_p^2 (\rho_s - \rho) g}{18\mu}$$

---

## 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, $kg/m^3$
$\rho_L$	vätskans densitet, $kg/m^3$
$\rho_W$	densiteten för vatten vid 20°C, $kg/m^3$

---

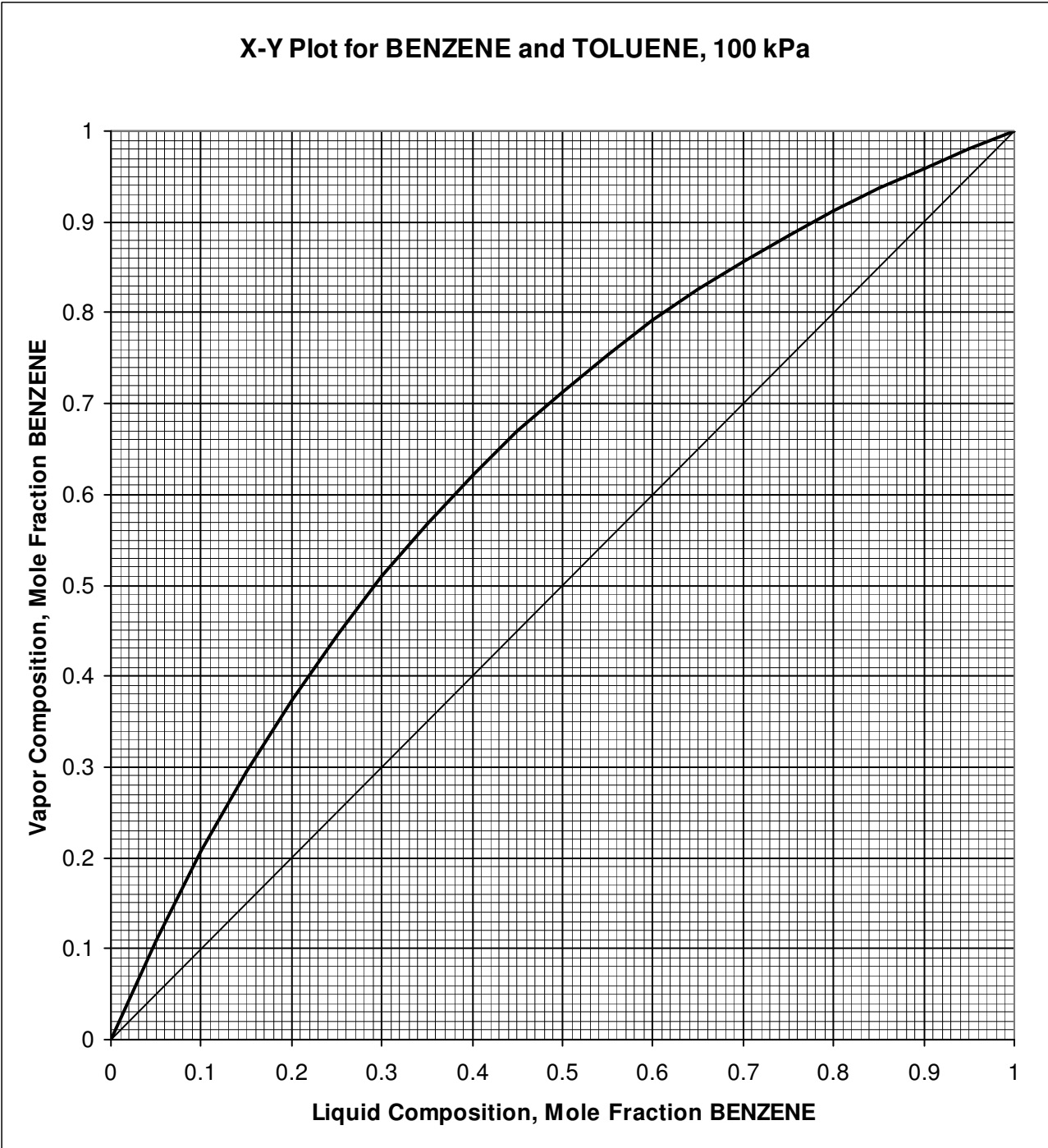
$\sigma$  ytspänning, dyn/cm (=mN/m)

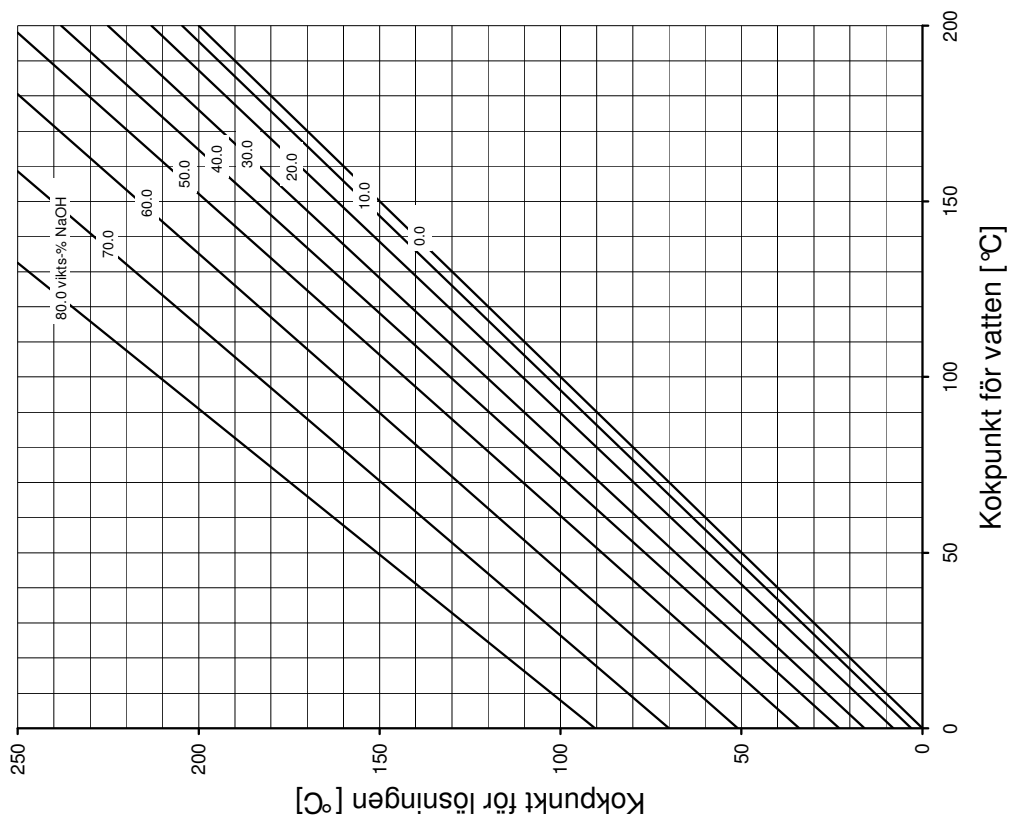
## FILTRERING

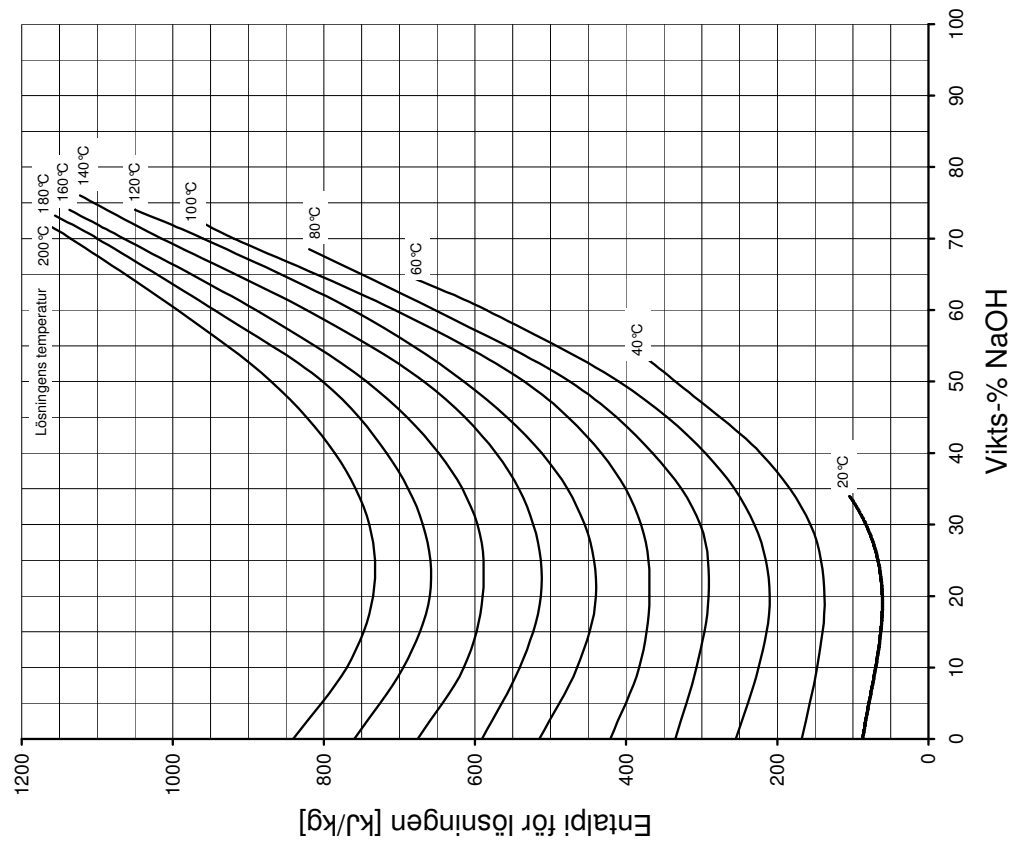
$A$  filtreringsarea, m<sup>2</sup>  
 $c$  förhållandet mellan vikten av det fasta materialet i filterkakan och filtratvolymen, kg/m<sup>3</sup>  
 $J$  massbråk av fast material i suspensionen, -  
 $\Delta P$  tryckfall över filterkakan, Pa  
 $R_m$  filtermediets motstånd, m<sup>-1</sup>  
 $t$  filtreringstid, s  
 $V$  erhållen filtratvolym under tiden  $t$ , m<sup>3</sup>  
 $\alpha_{av}$  specifikt filtreringsmotstånd, m/kg  
 $\varepsilon_{av}$  filterkakans porositet, -  
 $\mu$  fluidens viskositet, Pa·s  
 $\rho$  fluidens densitet, kg/m<sup>3</sup>  
 $\rho_s$  fasta fasens densitet, kg/m<sup>3</sup>

## SEDIMENTERING

$D_p$  partikelstorlek, m  
 $g$  tyngdaccelerationen, m/s<sup>2</sup>  
 $v$  partikelns sedimentationshastighet, m/s  
 $\mu$  fluidens viskositet, Pa·s  
 $\rho$  fluidens densitet, kg/m<sup>3</sup>  
 $\rho_s$  fasta fasens densitet, kg/m<sup>3</sup>









---

## Uppgift B1.

**Data:**  $F = 300 \text{ kmol/h}$   
 $x_F = 0.45$   
 $x_B = 0.05$   
 $x_D = 0.90$   
 $P = 13 \text{ bar}$   
 $R = 1.5 \cdot R_{\min}$

**Sökt:** D och B.  
Antalet ideala bottnar.  
Antalet verkliga bottnar då  $\eta$  är 65%  
Återflödets temperatur.

### Lösning:

- Produktflöden

$$\left. \begin{array}{l} \text{Totalbalans:} \quad F = D + B \\ \text{Komponentbalans:} \quad Fx_F = Dx_D + Bx_B \end{array} \right\} \begin{array}{l} \underline{D = 141.2 \text{ kmol/h}} \\ \underline{B = 158.2 \text{ kmol/h}} \end{array}$$

- Antalet ideala bottnar

Övre driftlinjen vid  $R_{\min}$  konstrueras i jämviktsdiagram. Driftlinjen skär y-axeln i punkten  $\phi_{\min} = 0.44$ .

$$\left. \begin{array}{l} \phi_{\min} = \frac{x_D}{R_{\min} + 1} \\ x_D = 0.95 \end{array} \right\} R_{\min} = 1.045 \Rightarrow R = 1.57$$

Övre driftlinje för separation konstrueras från punkten  $(x_D; x_D)$  på jämviktskurvans diagonal till punkten  $\phi = \frac{x_D}{R+1}$  ( $= 0.35$ ) på y-axeln. Nedre driftlinjen konstrueras från skärningspunkten mellan övre driftlinjen och den lodräta q-linjen till punkte  $(x_B; x_B)$  på diagonalen.

Grafisk lösning av komponentbalans och jämviktsamband ger 11 ideala bottnar.

- Antalet verkliga bottnar

$$\eta = \frac{n_{\text{Ideala}}}{n_{\text{Verkliga}}} \Rightarrow \underline{15 \text{ verkliga bottnar}}$$

- Återflödets temperatur

$x_D = 0.90$  ger ångans jämviktssammansättning ( $y =$ )  $0.96$  från jämviktskurvan. Systemet är idealt varför jämviktssambandet kan tecknas  $y^P = x_D P_i^0$  där komponenten som studeras är propan.  $P_i^0 = 810.67 \text{ mmHg}$  vilket med Antoines ekvation ger  $T = 82.2^\circ$

---

## Uppgift B2.

**Data:**  $S = 2 \text{ kg/s}$   
 $X_F = 0.15$   
 $x_L = 0.40$   
 $P_S = 10 \text{ bar}$   
 $P = 1 \text{ bar}$   
 $T_F = 60^\circ\text{C}$

**Sökt:**  $F$

### Lösning:

Totalbalans:  $F = V + L$  (1)

Komponentbalans:  $Fx_F = Lx_L$  (2)

Värmebalans:  $Fh_F + S\Delta H_{VAP} = VH_V + Lh_L$  (3)

$$\left. \begin{array}{l} (1) \quad V = F - L \\ (2) \quad L = F \frac{x_F}{x_L} \end{array} \right\} V = F \left(1 - \frac{x_F}{x_L}\right)$$

$$(3) \quad Fh_F + S\Delta H_{VAP} = F \left(1 - \frac{x_F}{x_L}\right)H_V + F \frac{x_F}{x_L}h_L$$

$$\therefore F = \frac{S\Delta H_{VAP}}{\left(1 - \frac{x_F}{x_L}\right)H_V + \frac{x_F}{x_L}h_L - h_F}$$

Entalpier:

$$h_F = \{x_F = 0.15, T_F = 60^\circ\text{C}\} = 220 \text{ kJ/kg}$$

$$H_V = \{P=1 \text{ bar}, T_V=130^\circ\text{C}\} = 2737 \text{ kJ/kg}$$

$$h_L = \{x_L = 0.40, T_L = 130^\circ\text{C}\} = 640 \text{ kJ/kg}$$

$$\Delta H_{VAP} = \{P_S = 10 \text{ bar}\} = 2015.35 \text{ kJ/kg}$$

$$F = 2.38 \text{ kg/s}$$

Svar: 2.38 kg/s

---

### Uppgift B3.

**Data:**  $L_0 = 200$  ton/dag  
 $x_A^0 = 0.275$   
 $x_C^0 = 0.50$   
 $x_S^0 = 0.225$   
 $V_{n+1} = 200$  ton/dag  
 $y_S^{n+1} = 1.0$   
 $x_C^{n'} = 0.98$   
 $S/C = 0.5$   
 $H = 0.80$

**Sökt:** Antal verkliga

**Lösning:** Geometrisk orten för underströmmarna, GOFU,

$$\frac{S}{C} = 0.5 \quad ; \quad \frac{x_S}{1-x_A-x_S} = 0.5 \quad ; \quad x_S = \frac{1}{3}(1-x_A)$$

Geometrisk orten samt kända strömmar dvs  $L_0$ ,  $V_{n+1}$  samt  $L_n'$  läggs in i triangeldiagram.  $L_n$  konstrueras från  $L_n'$  och rent lösningsmedel och placeras på GOFU. Genom hävstångsregeln fås läget av  $V_1$ . Polen konstrueras från  $L_n$ ,  $V_{n+1}$  till R och  $L_0$ ,  $V_1$  till R. "Stegning" ger 2.4 ideala steg vilket ger  $\frac{2.4}{0.8} = 3$  verkliga steg.

Svar: 3 verkliga steg.

### Uppgift B4.

**Data:**  $\Delta P = 0.8 \cdot 10^5$  Pa  
 $A = 0.002$  m<sup>2</sup>  
 $\varepsilon = 0.50$   
 $J = 0.05$   
 $\rho = 1000$  kg/m<sup>3</sup>  
 $\mu = 0.8 \cdot 10^{-3}$  Pas  
 $\rho_S = 2600$  kg/m<sup>3</sup>  
 $V = f(t)$  givet

**Sökt:**  $\alpha_{AV}$  samt  $R_m$ .

**Lösning:** Allmänna filterekv.  $\frac{dV}{dt} = \frac{A^2 \Delta P}{\mu(c\alpha_{av} V + AR_m)}$

Integrerad form av filterekv. ger  $\frac{t}{V} = \frac{\mu\alpha_{AV} c}{2A^2 \Delta P} V + \frac{\mu R_m}{A \Delta P}$

---

Plottas  $t/V$  mot  $V$  kan  $\alpha_{AV}$  samt  $R_m$  bestämmas ur lutning respektive avskärning.  
Koncentrationen  $c$  beräknas till  $55.11 \text{ kg/m}^3$ .

Linjär regression ger  $k = 696947421.2$   
 $m = 11877.3316$

Detta ger  $\alpha_{AV} = 1.01 \cdot 10^9 \text{ m/kg}$   
samt  $R_m = 2.38 \cdot 10^9 \text{ 1/m}$

Svar:  $\alpha_{AV} = 1.01 \cdot 10^9 \text{ m/kg}$  och  $R_m = 2.38 \cdot 10^9 \text{ 1/m}$