



CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Institutionen för kemi- och bioteknik

KURSNAMN	Bisoseparationsteknik, KAA150	<i>Med förslag till lösningar av beräkningsuppgifter.</i>
PROGRAM: namn åk / läsperiod	Civilingenjörsprogram bioteknik årskurs 3 läsperiod 3	
EXAMINATOR	Krister Ström	
TID FÖR TENTAMEN LOKAL	Onsdag 15 april, kl 14.00-18.00 V-salar	
HJÄLPMEDEL	Valfri räknedosa/kalkylator med tömt minne. Egna anteckningar och kursmaterial är ej 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 β " av Lennart Råde/Bertil Westergren Formelblad (vilket bifogats tentamenstesesen)	
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	Lösningar till tentamens räknedel anslås på kurshemsidan 15 april. Resultat på tentamen anslås 22 april. Granskning torsdag 23 april samt 28 april kl. 12.30-13.00 i seminarierummet, forskarhus II plan 2 eller efter överenskommelse med examinator.	
ÖVRIG INFORM.	Tentamen består av en teoridel med åtta teorifrågor samt en räknedel med fyra räkneuppgifter. Poäng på respektive uppgift finns noterat i tentamentesen. 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.	

Del A: Teoridel

- A1.** Vad är det som gör att det ibland går att skilja två ämnen i en blandning med hjälp av destillation?
(2p)
- A2.** Förklara vad som menas med yttre återflödesförhållandet i en destillationsanläggning, samt visa med hjälp av ett diagram hur destillatets halt av lättflyktig komponent varierar med återflödesförhållandet för en given kolonn.
(3p)
- A3.** Skissa bubbel-daggpunktskurvan samt jämviktskurvan för en binär blandning som har minimiäzeotrop!
(1p)
- A4.** Varför är en destillationskolonn försedd med återkokare och kondensor?
(3p)
- A5.** Vilka egenskaper ska absorptionsvätskan, vid en absorptionsprocess, ha i fråga om löslighet, flyktighet och viskositet? Motivera svaren kortfattat!
(3p)
- A6.**
- På vad sätt skiljer sig strukturerad packning från en så kallad slumpvis ordnad packning av tex Pallringar?
 - Ange några fördelar med strukturerad packning!
- (4p)
- A7.** Nämn minst tre faktorer som påverkar extraktionshastigheten vid fast fas-vätskeextraktion. Förklara också på vilket sätt dessa tre faktorer påverkar extraktionshastigheten.
(5p)
- A8.** Nämn och diskutera minst tre faktorer som man särskilt skall beakta, när det gäller att åstadkomma effektiv vätska-vätskaextraktion!
(4p)

Del B: Problemdel.

B1. En blandning av etanol och n-propanol separeras i en kontinuerlig arbetande avdrivar-kolonn, till en hög renhet av n-propanol 99.5 mol-%. Det inre återflödesförhållandet (L/V) är 3.0.

- Bestäm med Sorels metod sammansättningen hos utgående topprodukt när avdrivarkolonnen har tre ideala ventilbottnar!

Separationen genomförs vid 760 mmHg och den relativa flyktigheten kan anses konstant.

Givna data:

$$\text{Antoines ekvation: } \ln P_i^0(\text{mmHg}) = A_i - \frac{B_i}{T(\text{K}) + C_i}$$

	A_i	B_i	C_i
Etanol	18.9119	3803.98	-41.68
n-Propanol	17.5439	3166.38	-80.15

(9p)

B2. I en processanläggning används ett packat torn för motströms absorption av en gaskomponent i en vätska. Tornets packningshöjd är 4.0 m och diametern 80 cm. I dagsläget är tornet fyllt med 1 1/2" keramiska Raschigringar ($S_B = 120 \text{ m}^2/\text{m}^3$, $e = 0.73$). Till tornet förs ett vätskeflöde på 2.0 kg/s, och gashastigheten genom tornet är 1.75 m/s. (Flödena kan anses vara konstanta genom tornet.)

På grund av en ändring i ett tidigare processteg så kommer gasflödet till kolonnen att öka till det dubbla.

- Kan man fortsätta att använda det befintliga packningsmaterialet, utan att man riskerar att kolonnen flödar?
- Man har funderat på att byta ut packningsmaterialet till 4" keramiska Raschigringar ($S_B = 46 \text{ m}^2/\text{m}^3$, $e = 0.80$). Skulle det gå att använda detta packningsmaterial vid det nya flödet? Beakta gashastighet vid flödning och vätningshastighet!

Givna data:

Tryck	1 atm
Temperatur	20°C
Vätskans densitet	1200 kg/m ³

Vätskans dynamiska viskositet kan antas vara försumbart skild ifrån dynamiska viskositeten för vatten vid samma temperatur. Molmassan för gasfasen kan sättas till molmassan för luft.

(14p)

B3. En natriumhydroxidlösning skall koncentreras i en indunstare. Tillflödet, 4536 kg/h, håller 20 vikt-% NaOH och har temperaturen 60°C. Man önskar att den koncentrerade lösningen som lämnar indunstareffekten skall hålla 50 vikt-% NaOH.

Färskången håller trycket 1.7 bar och trycket i ångrummet är 0.11 bar. Det skenbara värmeegenomgångstalet är 1560 W/m²·K.

- Beräkna erforderligt behov av färskånga samt erforderlig värmeöverförande yta.

Dürringdiagram för kokpunktsförhöjning och entalpidiagram för vattenlösningar med NaOH bifogas.

(6p)

B4. I en tvärströms extraktionsanläggning med två steg renas en vattenström, 100 kg/h, från pyridin genom extraktion med ren klorbensen. Ingående underström till anläggningen håller 20 vikt-% pyridin och resten vatten. Till varje steg förs 25 kg/h ren klorbensen.

- Hur stor andel av pyridin i ingående vattenström extraheras bort?

Triangeldiagram med lösningskurva samt jämviktsdiagram bifogas tentamentesen

(6p)

Göteborg 2009-04-05
Krister Ström

Bioseparationsteknik

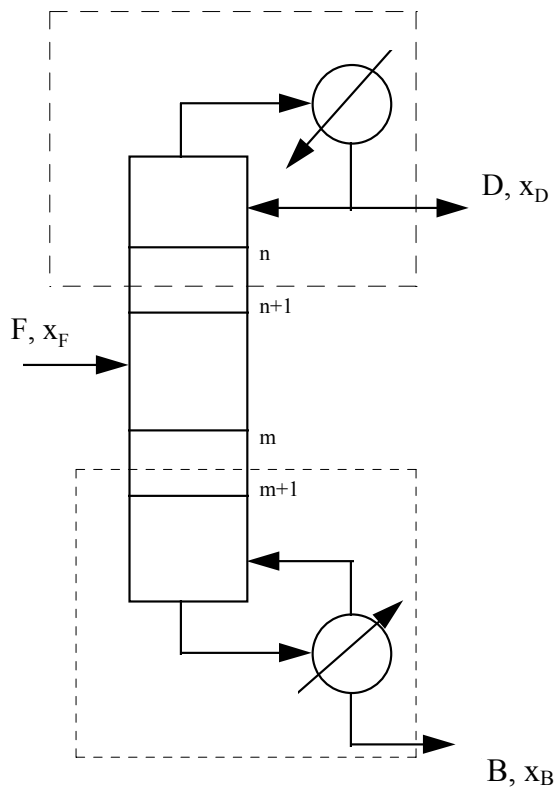
Formelsamling

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:

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

$$Vy_{m+1} = Lx_m - Bx_B$$

q-linje:

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

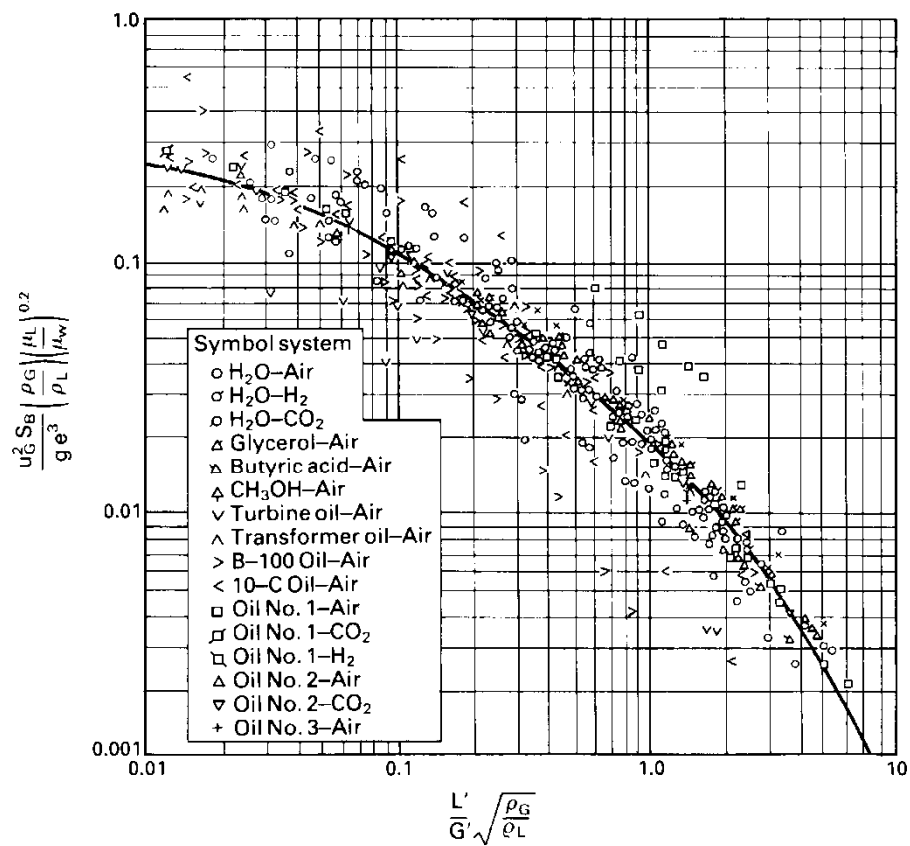


FIG. 4.21. Generalised correlation for flooding rates in packed towers

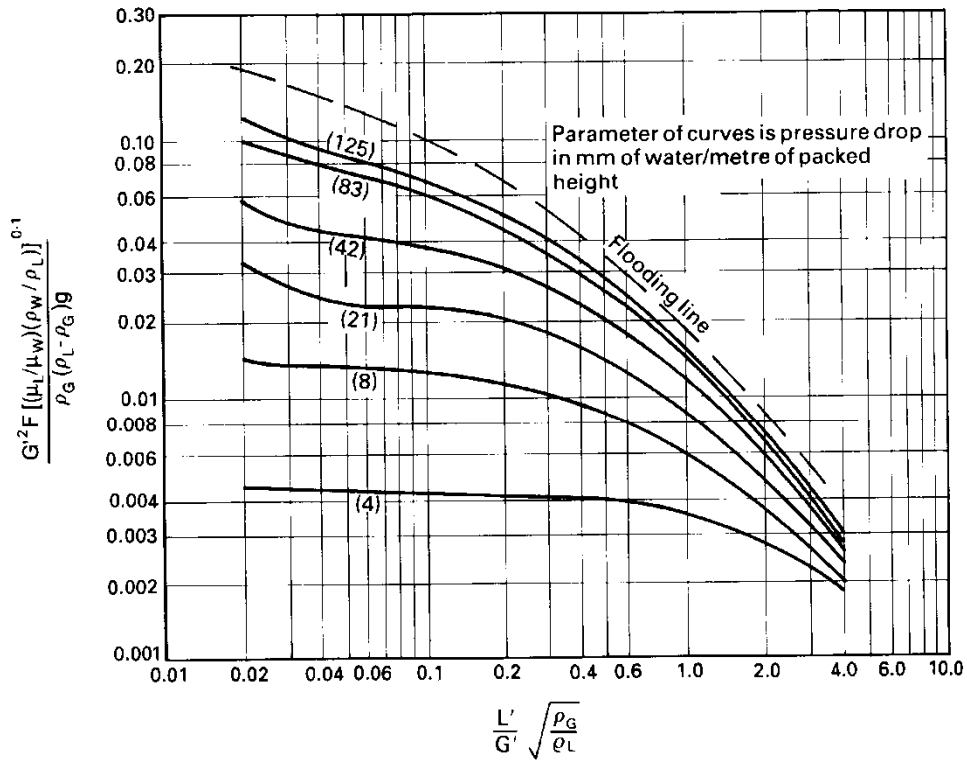


FIG. 4.22. Generalised pressure drop correlation (adapted from a figure by the Norton Co. with permission)

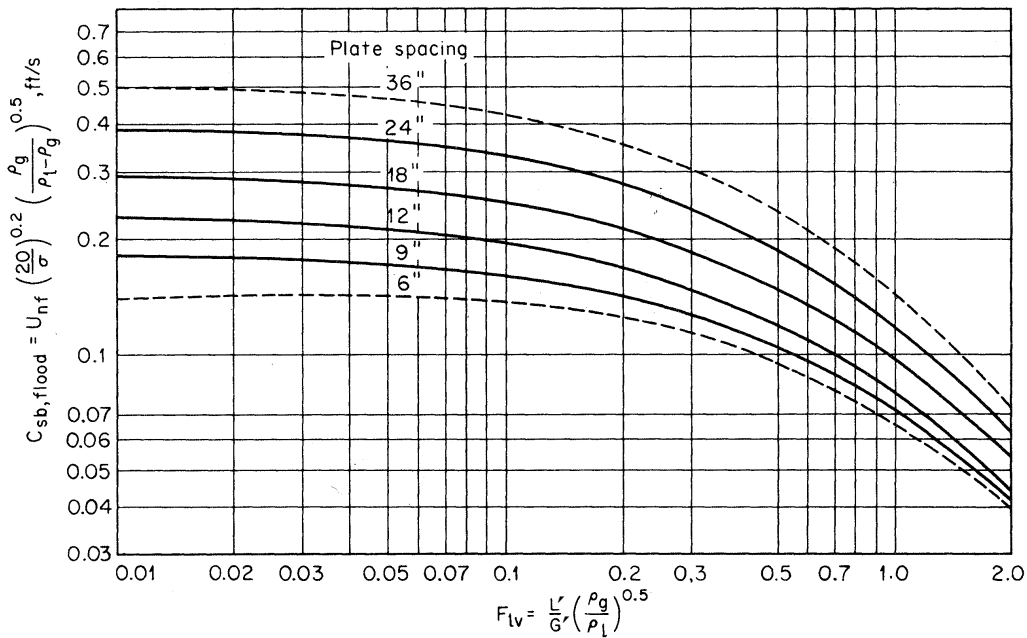


FIG. 18-10 Flooding limits for bubble-cap and perforated plates. L'/G' = liquid-gas mass ratio at point of consideration. To convert feet per second to meters per second, multiply by 0.3048; to convert inches (symbol ") to meters, multiply by 0.0254. [Fair, Pet./Chem. Eng., 33(10), 45 (September 1969).]

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

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

FILTRERING

$$\frac{dV}{dt} = \frac{A^2 \Delta P}{\mu(c \alpha_{av} V + AR_m)} \quad c = \frac{\rho J}{(1-J) - \frac{\varepsilon_{av}}{1-\varepsilon_{av}} J \frac{\rho}{\rho_s}}$$

SEDIMENTERING

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

SYMBOLFÖRTECKNING:

ABSORPTION

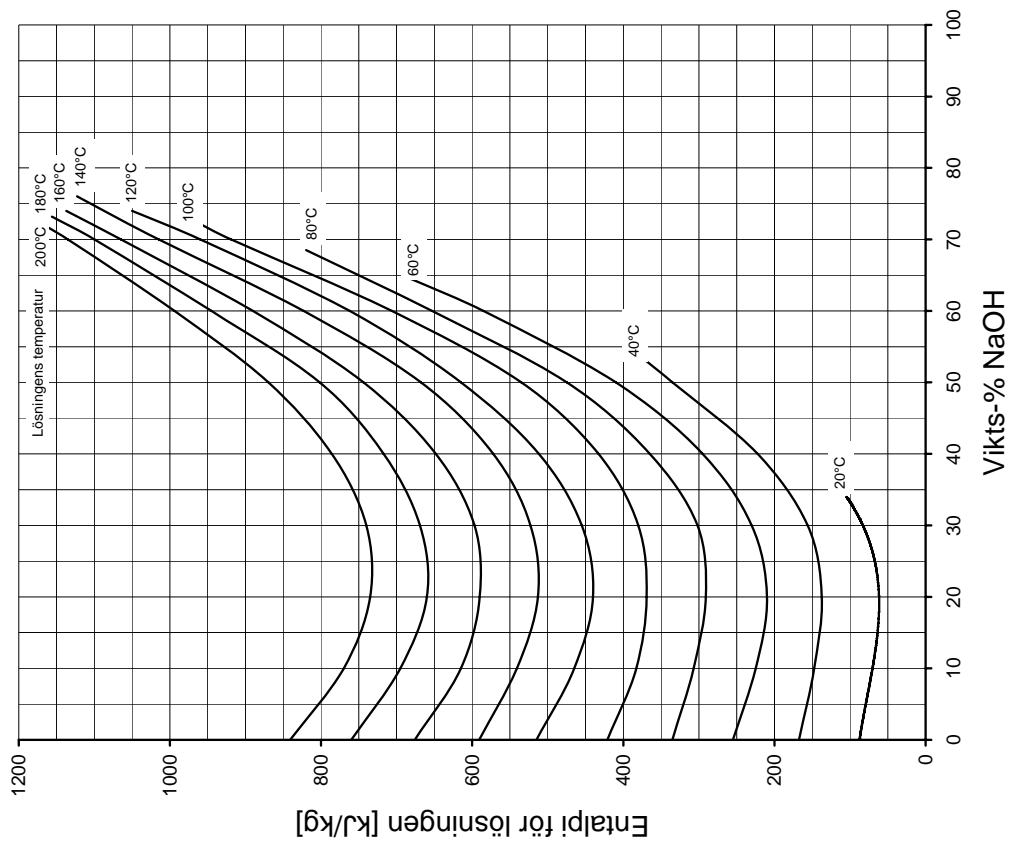
a	massöverförande yta per tornvolym, m^2/m^3
$C_{sb, flood}$	kapacitetsparameter, ft/s
C_T	vätskans totalkoncentration, $kmol/m^3$
e	packningens porositet, -
F	packningsfaktor, m^{-1}
F_{lv}	flödesparameter, -
g	tyngdaccelerationen, m/s^2
V	gasflöde, $kmol/(m^2 \cdot s)$
G'	gasflöde, $kg/(m^2 \cdot s)$
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
μ_L	vätskans dynamiska viskositet, Pa·s
μ_W	dynamiska viskositeten för vatten vid 20°C, Pa·s
ρ_G	gasens densitet, kg/m^3
ρ_L	vätskans densitet, kg/m^3
ρ_W	densiteten för vatten vid 20°C, kg/m^3
σ	ytpänning, dyn/cm (=mN/m)

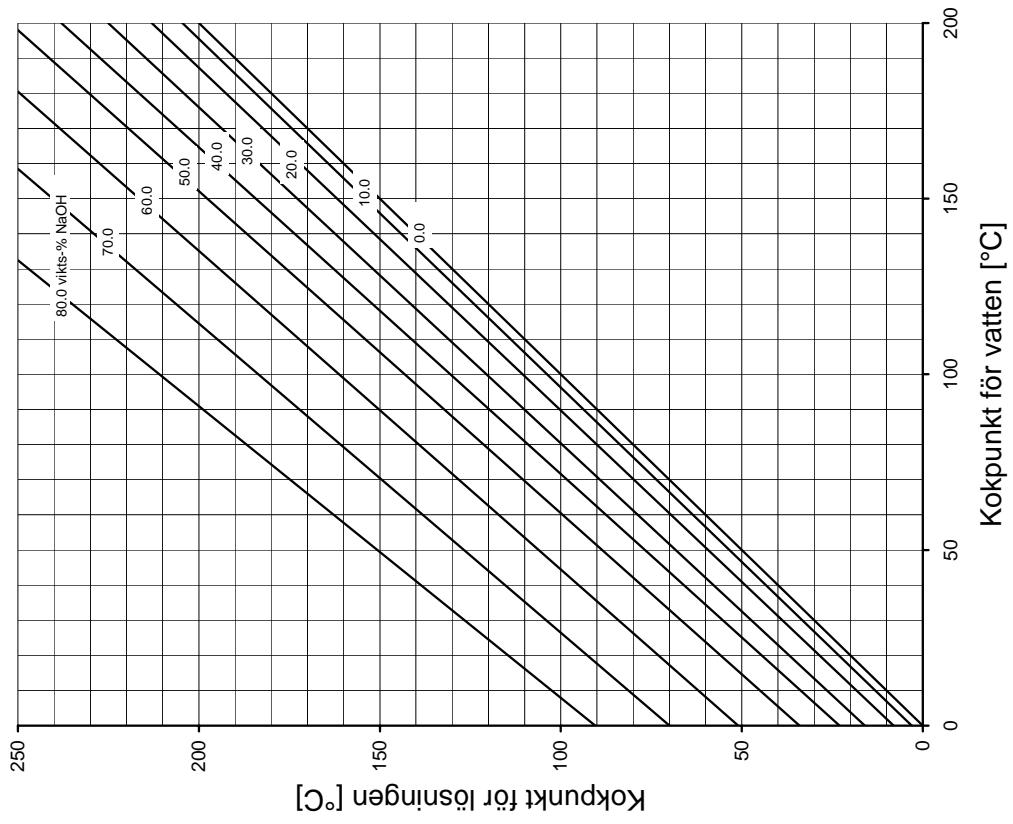
FILTRERING

A	filtreringsarea, m^2
c	förhållandet mellan vikten av det fasta materialet i filterkakan och filtratvolymen, kg/m^3
J	massbråk av fast material i suspensionen, -
ΔP	tryckfall över filterkakan, Pa
R_m	filtermediets motstånd, m^{-1}
t	filtreringstid, s
V	erhållen filtratvolym under tiden t , m^3
α_{av}	specifikt filtreringsmotstånd, m/kg
ε_{av}	filterkakans porositet, -
μ	fluidens viskositet, Pa·s
ρ	fluidens densitet, kg/m^3
ρ_s	fasta fasens densitet, kg/m^3

SEDIMENTERING

D_p	partikelstorlek, m
g	tyngdaccelerationen, m/s^2
v	partikelns sedimentationshastighet, m/s
μ	fluidens viskositet, Pa·s
ρ	fluidens densitet, kg/m^3
ρ_s	fasta fasens densitet, kg/m^3



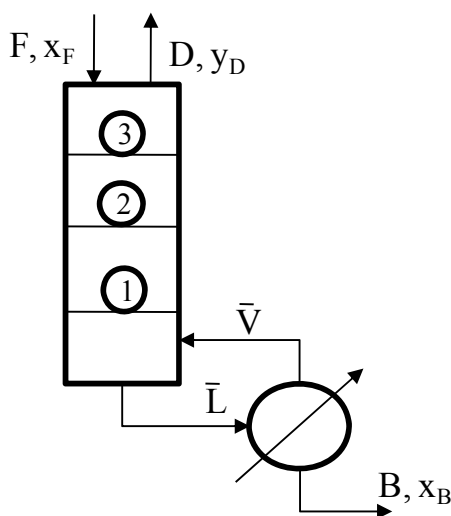


B1.

Data: $n = 3$
 $\bar{L} = 3.0$
 \bar{V}
 $x_B = 1.0 - 0.995 = 0.005$
 $P = 760 \text{ mmHg}$

Sökt: y_D

Lösning:



Sorels metod: Komponentbalans och jämviktsvillkor löses till dess tre ideala bottnar har uppnåtts.

Jämviktsvillkor: $\alpha_{1,2} = \text{konst.}$

$$\alpha_{1,2} = \frac{y_1/x_1}{y_2/x_2} \Rightarrow y_1 = \frac{\alpha x_1}{1 + (\alpha - 1)x_1}$$

$\alpha_{1,2} = \frac{P_1^0}{P_2^0}$ Ångtrycken P_1^0 och P_2^0 bestäms vid en rimlig temperatur. Vilken?

Temperaturen i återkokaren ty sammansättningen känd ut från återkokaren. Bottenprodukten håller 99.5 mol-% n-propanol varför temperaturen är nära kokpunkten för ren n-propanol \Rightarrow vid 760 mmHg är kokpunkten för n-propanol 370.36 K eller 97.2 °C. Etanol har vid motsvarande temperatur ångtrycket

$$P_1^0 = 1538.34 \text{ mmHg} \Rightarrow \left\{ \alpha_{1,2} = \frac{P_1^0}{P_2^0} \right\} \alpha = 2.024$$

Jämviktsvillkoret kan då tecknas: $y_n = \frac{2.024x_n}{1 + (2.024 - 1)x_n}$ där n anger bottennummer och inte komponentnummer som tidigare.

Komponentbalans:

Komponentbalansen kan på allmän form tecknas

$$\bar{L}x_n = \bar{V}y_{n-1} + Bx_B$$
$$B = \bar{L} - \bar{V}$$

Detta ger $x_n = \frac{\bar{V}}{\bar{L}}y_{n-1} + \left(1 - \frac{\bar{V}}{\bar{L}}\right)x_B \Rightarrow x_n = \frac{1}{3}y_{n-1} + \frac{2}{3}x_B$

Beräkning:

n	x_n	y_n
0	0.005	0.0101
1	0.0067	0.0134
2	0.0078	0.0157
3	0.0086	0.0172

Toppen nådd då $y_D = y_3 \Rightarrow$ Topprodukt håller 1.7 mol-% etanol!

Svar: 1.7 mol-% etanol

B2.

Data: $l_T = 4.0$ m
 $\Phi = 0.80$ m
I dag: 1½" keramiska Raschig ringar: $S_B = 120 \text{ m}^2/\text{m}^3$, $e = 0.73$
 $L \cdot A = 2.0$ kg/s
 $u_G = 1.75$ m/s
Nytt material: 4" keramiska Rashig ringar: $S_B = 46 \text{ m}^2/\text{m}^3$, $e = 0.80$
 $P = 1$ atm
 $T = 20$ °C
 $\rho_L = 1200$ kg/m³
 $\mu_L \approx \mu_W$
 $M_G = M_{\text{Luft}} = 28.96$ kg/kmol

Sökt:

- Om gasflödet ökas till det dubbla, kommer då kolonnen att flöda?
- Kan man använda 4" packnings material?

Lösning:

Gammalt flöde:

$$V^{\text{VOL}} = u_G \cdot A \quad \text{där} \quad A = \frac{\pi \Phi^2}{4} = 0.5027 \text{ m}^2 \Rightarrow V^{\text{VOL}} = 1.75 \cdot 0.5027 = 0.8797 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$V \cdot A = V^{\text{VOL}} \cdot \rho_G$$

$$\rho_G = \frac{P M_G}{R T} = 1.204 \text{ kg/m}^3$$

$$V \cdot A = 0.8797 \cdot 1.204 = 1.059 \text{ kg/s}$$

Nytt flöde:

$$V \cdot A = 1.059 \cdot 2 = 1.118 \text{ kg/s}$$

Flödningskorrelation, fig 4.21 i bifogad formelsamling används

$$\text{Abskissa: } \frac{L}{V} \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L}} = \frac{2.0}{2.118} \sqrt{\frac{1.204}{1200}} = 0.0299$$

$$\text{Ordinata: } \frac{u_{G,fl}^2 \cdot S_B}{g e^3} \left(\frac{\rho_G}{\rho_L} \right) \left(\frac{\mu_L}{\mu_W} \right)^{0.2} = 0.192$$

Gammalt packningsmaterial:

$$\frac{u_{G,fl}^2 \cdot 120}{9.81 \cdot 0.73^3} \cdot \frac{1.204}{1200} \cdot 1^{0.2} = 0.192 \Rightarrow u_{G,fl} = 2.47 \text{ m/s}$$

$$u_G = \frac{V \cdot A}{\rho_G \cdot A} = \frac{2.118}{1.207 \cdot 0.5027} = 3.50 \text{ m/s}$$

$u_G > u_{G,fl}$ **Fungerar inte!**

Nytt packningsmaterial:

$$\frac{u_{G,\text{fl}}^2 \cdot 46}{9.81 \cdot 0.80^3} \cdot \frac{1.204}{1200} \cdot 1^{0.2} = 0.192 \Rightarrow u_{G,\text{fl}} = 4.57 \text{ m/s}$$

$$\frac{u_G}{u_{G,\text{fl}}} = \frac{3.50}{4.57} = 0.77 \quad \text{OK!}$$

Vätningshastighet:

$$L_W = \frac{L'}{\rho_L \cdot S_B} = \frac{2.0 / 0.5027}{1200 \cdot 46} = 7.2 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$$

$$L_W > 3.3 \cdot 10^{-5} \text{ m/s} \quad \text{OK!}$$

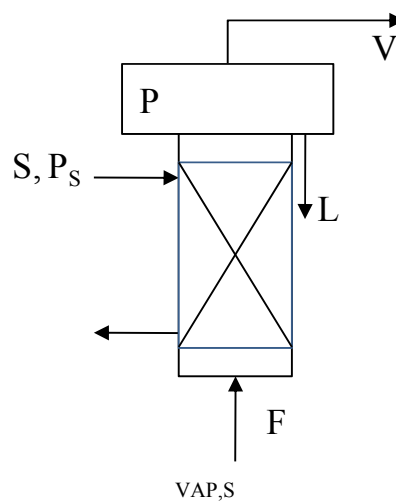
Svar: Man kan inte använda 1½” keramiska Raschigringar. Man kan använda 4” keramiska Raschigringar.

B3.

Data: $F = 4536 \text{ kg/h}$
 $x_F = 0.20$
 $X_L = 0.50$
 $T_F = 60^\circ\text{C}$
 $P_S = 1.7 \text{ bar}$
 $P = 0.11 \text{ bar}$
 $U_{SKB} = 1560 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$

Sökt: S, A

Lösning:



$$\text{Totalbalans: } F = V + L \quad (1)$$

$$\text{Komponentbalans: } Fx_F = Lx_L \quad (2)$$

$$(2) \Rightarrow L = \frac{x_F}{x_L} F \quad L = 1814.4 \text{ kg/h}$$

$$(1) \Rightarrow V = 2721.6 \text{ kg/h}$$

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

$$S = \frac{VH_V + Lh_L - Fh_F}{\Delta H_{VAP,S}}$$

Entalpier söks för att kunna bestämma S!

$$P_S = 1.7 \text{ bar} \Rightarrow T_S = 115.17^\circ\text{C} \text{ (Data \& Diagram)}$$

Duringdiagram ger att $\beta = 37.3^\circ\text{C}$ samt att den 50%-iga lösningens temperature är 85°C .

$$\Delta H_{VAP,S} = \{1.7 \text{ bar}\} = 2215.92 \text{ kJ/kg}$$

$$h_F = \{T = 60^\circ\text{C}, x_f = 0.20\} = 210 \text{ kJ/kg}$$
$$H_V = \{P=0.11 \text{ bar}, T=85^\circ\text{C}\} = 2659.5 \text{ kJ/kg}$$
$$h_L = \{T = 685^\circ\text{C}, x_L = 0.50\} = 490 \text{ kJ/kg}$$

Värmebalansen ger $S = 3237 \text{ kg/h}$

Erforderlig värmeöverförande yta ges av kapacitetsekvationen

$$S \cdot \Delta H_{\text{VAP},S} = U_{\text{SKB}} \cdot A \cdot \Delta T \quad (4)$$
$$\Delta T = 115.17 - 85$$

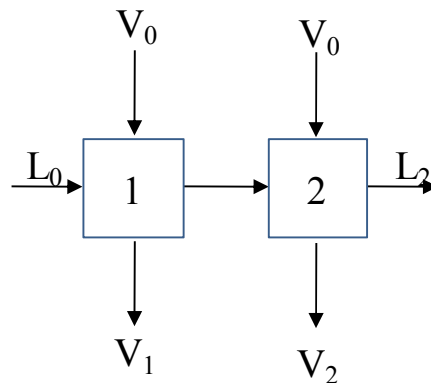
Kapacitetsekvationen ger $A = 42.3 \text{ m}^2$

Svar: 3237 kg/h, 42.3 m²

B4.

Data: $x_A^0 = 0.20$
 $x_C^0 = 0.80$
 $V_0 = 25 \text{ kg/h}$
 $L_0 = 100 \text{ kg/h}$

Sökt: Hur stor andel av inkommande pyridin extraheras bort?

Lösning:Steg 1 Blandningspunkt

$$\left. \begin{array}{l} L_0 a = V_0 b \\ a + b = 108 \end{array} \right\} \quad \left. \begin{array}{l} a = 21.6 \text{ mm} \\ b = 86.4 \text{ mm} \end{array} \right\} \quad \begin{array}{l} x_A^1 = 0.135 \\ y_A^1 = 0.225 \end{array}$$

$$L_0 + V_0 = L_1 + V_1 \quad \Rightarrow \quad L_1 + V_1 = 125 \text{ kg/h}$$

$$\frac{L_1}{V_1} = \frac{56}{21} \quad \Rightarrow \quad L_1 = 90.9 \text{ kg/h} \quad ; \quad V_1 = 34.1 \text{ kg/h}$$

Steg 2 Blandningspunkt

$$\left. \begin{array}{l} L_0 \alpha = V_0 \beta \\ \alpha + \beta = 108 \end{array} \right\} \quad \left. \begin{array}{l} \alpha = 21.6 \text{ mm} \\ \beta = 86.4 \text{ mm} \end{array} \right\} \quad \begin{array}{l} x_A^2 = 0.085 \\ y_A^2 = 0.17 \end{array}$$

$$L_1 + V_0 = L_2 + V_2 \quad \Rightarrow \quad L_2 + V_2 = 115.9 \text{ kg/h}$$

$$\frac{L_2}{V_2} = \frac{61}{22} \quad \Rightarrow \quad L_2 = 85.2 \text{ kg/h} \quad ; \quad V_2 = 30.7 \text{ kg/h}$$

Andel som extraherats bort:

$$\frac{L_0 x_A^0 - L_2 x_A^2}{L_0 x_A^0} \cdot 100 \approx 64\%$$

Svar: 64%