



CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Institutionen för kemi- och bioteknik

Avdelningen för kemiteknik

KURSNAMN	Separations- och apparatteknik, KAA095	<i>Med förslag till lösningar av beräkningsuppgifter.</i>
PROGRAM: namn åk / läsperiod	Civilingenjörsprogram kemiteknik Civilingenjörsprogram med fysik årskurs 3 läsperiod 1	
EXAMINATOR	Krister Ström	
TID FÖR TENTAMEN LOKAL	Måndag 10 januari 2011, kl 08.30-13.30 V	
HJÄLPMEDEL	Valfri räknedosa/kalkylator med tömt minne. Egna anteckningar och kursmaterial är ej godkänt hjälpmedel "Data och Diagram" av Sven-Erik Mörtstedt/Gunnar Hellsten "Physics Handbook" av Carl Nordling/Jonny Österman "BETA β " av Lennart Råde/Bertil Westergren Formelblad (vilket bifogats tentamentesen)	
ANSV LÄRARE: namn telnr besöker tentamen	Krister Ström 772 5708 Kl. 09.30 resp kl 11.00	
DATUM FÖR ANSLAG av resultat samt av tid och plats för granskning	Svar till beräkningsuppgifter anslås 11 januari på kurshemsidan, studieportalen. Resultat på tentamen meddelas tidigast 20 januari efter kl 12.00 via e-post. Granskning 21 januari kl 12.30-13.00 samt 25 januari kl. 12.30-13.00 i seminarierummet, forskarhus II plan 2.	
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 40% 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. Betygränser: 20-29 poäng betyg 3, 30-39 poäng betyg 4 och 40-50 poäng ger betyg 5.	

Del A. Teoridel

- A1.**
- Ge förslag till en lämplig indunstartyp för indunstning av en vattenlösning av en lågviskös, temperaturstabil produkt!
 - Beskriv också den principiella uppbyggnaden och funktionen hos denna indunstare!
- (2p)

A2. I anslutning till indunstning diskuteras begreppet kokpunktsförhöjning!

- a) Vad innebär begreppet och vilken effekt ger kokpunktsförhöjningen?
- b) Varför uppkommer kokpunktsförhöjning?
- c) Är kokpunktsförhöjning till nytta för indunstningsprocessen eller en nackdel? Motivera svaret!

(4p)

- A3.**
- a) Vad händer med temperaturen och entalpin i en luftmassa om en liten mängd vätska sprutas in i den? Motivera!
 - b) Du ska torka ett temperaturkänsligt, partikelformat material. Ange en passande tork. Motivera svaret!
 - c) Beskriv i ett schematiskt Mollierdiagram hur torkluftens tillstånd förändras, från färskluft till utgående torkluft, i en ideal enstegstork med recirkulation. Vilka krav ska vara uppfyllda för att torksteget ska vara idealt?

(4p)

- A4.**
- a) Hur ändras filtreringsmotståndet vid filtrering av ett finkornigt material om stora partiklar blandas in i suspensionen? Motivera.
 - b) Namnge ett valfritt filter och beskriv kortfattat dess funktion. Ange om filtret är kontinuerligt eller satsvis arbetande.

(2p)

A5. Beskriv en valfri lakningsutrustning för industriella ändamål och som är kommersiellt tillgänglig!

(1p)

A6. Ge förslag på vätska-vätskaextraktionsutrustning lämplig för

- a) fall där separationskraven är mycket höga och golvutrymmet begränsat.
- b) fall där separationskraven är mycket höga och där ej alltför hög utrustning kan installeras.
- c) fall där separationskraven är låga.

Visa med figur och text utrustningarnas funktionssätt och utformning!

(3p)

A7. Den fördelningsplatta för gasen man använder i en fluidiserad bädd kan ha olika utseende.

- a) Vilken skillnad i karaktär hos den fluidiserade bädden erhålls om man har en fördelningsplatta med enbart ett hål jämfört med ett stort antal hål?
- b) Vilken är fördelarna (nackdelarna) med respektive utformning?

(2p)

A8. Sedimentering kan anses som ett komplement eller alternativ till filtrering! Hur och när?

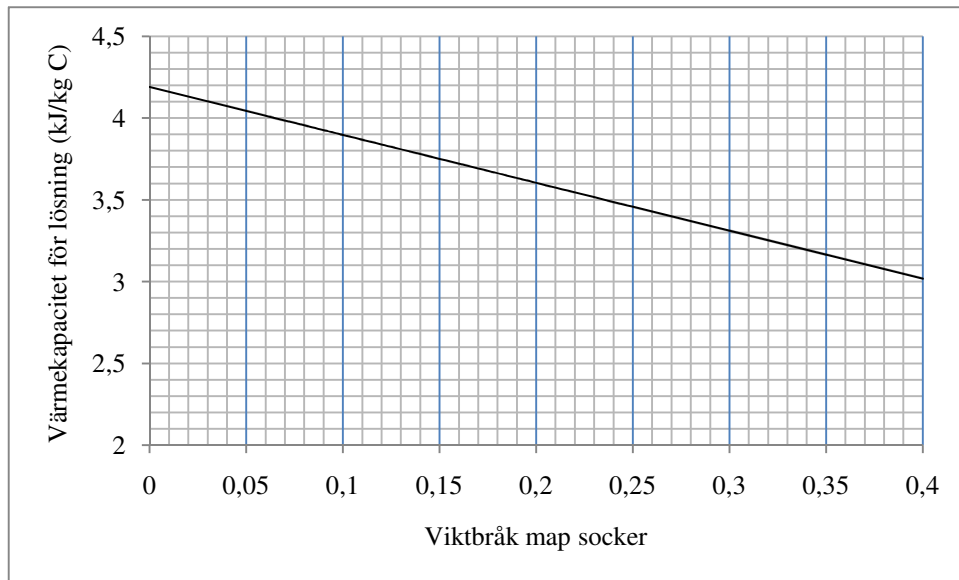
(2p)

Del B. Problemdel

B1. I en enkeffektindunstare ska en sockerlösning (6 vikt-% socker, resten vatten) indunstas till sirap med 40 vikt-% socker. Indunstaren, som arbetar vid 25 kPa, drivs med mättad ånga av 0.4 MPa och kondensatet avgår kokvarmt från indunstaren. Ångförbrukningen är 1.2 kg/kg avdriven ånga. Kokpunktsförhöjningen kan försummas.

- Beräkna temperaturen på tillförd sockerlösning!

Värmekapacitet för sockerlösningen varierar med sammansättningen enligt diagram nedan.



(7p)

B2. I en planerad process ska en suspension av ett partikelformigt material filtreras och tvättas i en platt- och ramfilterpress. Den planerade kapaciteten är 50 ton filtrat/h. Av transporttekniska skäl kommer suspensionen att hålla en torrhalt på 4 vikt-%. Varje ram i filterpressen har en volym på 0,036 m³ och en filteryta på 1,2 m².

En filtreringscykel är planerad enligt följande: Det första skedet sker filtreringen med konstant filtratflöde på 27,5 liter/min genom varje ram, tills en tryckskillnad på 3,5 bar är uppnådd. Därefter sker filtreringen med konstant tryckskillnad på 3,5 bar tills ramarna är fulla. Hela cykeln antas ske vid 50°C.

I laborieförsök har specifika filtrermotståndet, α , bestämts till $4,5 \cdot 10^{10}$ m/kg, kakans porositet till 0,52 och partiklarnas densitet till 2750 kg/m³. Samma kan antas gälla i fullskalefiltreringen. Det planerade filtermediet antas ha ett försumbart motstånd.

- a) Hur lång tid tar själva filtreringen?
- b) Efter själva filtrering sker tvättning av kakan vid konstant tryckskillnad på 2,5 bar tills en tvättkvot på 4 uppnåts, d.v.s. tills filterkakans vätska är ”bytt” 4 gånger. Tvättningen sker genom s.k. enkel tvättning, där tvättvätskan leds in samma väg som suspensionen och ut samma väg som filtratet. Den sker vid samma temperatur som filtreringen.
Om omställningstiden (tiden för filtertömning, preparering för nästa filtercykel, m.m.) uppskattas till 5 min, hur många ramar måste man då minst använda för att uppnå önskad kapacitet?

(11p)

B3. Aceton ska extraheras ur etylacetat hållande 35 vikt-% aceton, 60 vikt-% etylacetat och 5 vikt-% vatten genom flerstegsextraktion i motström med rent vatten vid 25°C. Ingående ström av raffinatfas är 2500 kg/h och extraktfas 2000 kg/h.

- Bestäm erforderligt antal ideala extraktionssteg om utgående raffinatfas ska hålla maximalt 2.5 vikt-% aceton!

Triangeldiagram med lösningskurva och jämviktskurva bifogas tentamen.

(5p)

B4. En uppslamning som håller 5 kg vatten per kg fast material, $\rho_s=2500 \text{ kg/m}^3$, skall kontinuerligt förtjockas så att ett slam erhålles, hållande 1.5 kg vatten per kg fast material.

Laboratorieundersökningar, där sedimentationshastigheten för uppslamningar hållande fem olika koncentrationer fast material har bestämts, gav följande resultat

Koncentration kg vatten/kg fast material	5.0	4.2	3.7	3.1	2.5
Sedimentationshastighet m/h	0.6	0.36	0.282	0.21	0.15

- Beräkna den minsta förtjockararea som erfordras för att separera ett tillflöde som är 14400 kg/h där den fasta fasens andel är 2400 kg!

(7p)

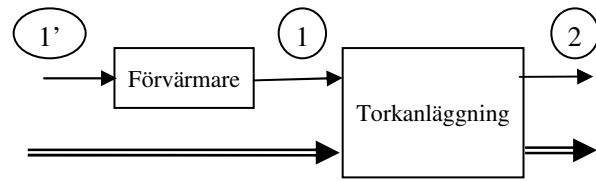
Göteborg 2011-01-03
Krister Ström

Formelblad – Separations- och apparatteknik

TORKNING

$$\frac{dH}{dY} = \frac{H_1 - H_2}{Y_1 - Y_2} = c_{pl} T_{S_1} - q_S - q_{X_1} - q_F$$

$$q_D = \Delta H_{vap, T_0} + c_{pV} T_{G_2} - c_{pl} T_{S_1}$$



FILTRERING

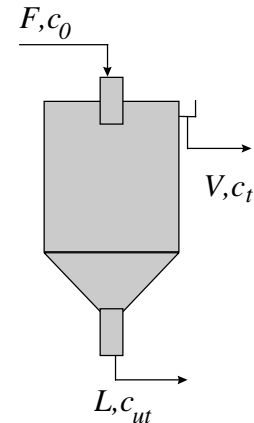
$$\frac{dV}{dt} = \frac{A^2 \Delta P}{\mu(c\alpha_{av} V + AR_m)}$$

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

SEDIMENTERING

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

Hindrad sedimentering: Nedre driftlinjen $cv = \frac{L}{A} (c_{ut} - c)$
 Övre driftlinjen $cv = \frac{V}{A} (c - c_t)$



STRÖMNING I PORÖS BÄDD

Kozeny-Carman baserad: $v_{mf} = \frac{1}{K''} \frac{\epsilon_{mf}^3}{S^2 (1 - \epsilon_{mf})} \frac{(\rho_s - \rho) g}{\mu}$

Ergun baserad: $v_{mf} = -\frac{150(1 - \epsilon_{mf})\mu}{3.5D_p\rho} + \sqrt{\left(-\frac{50(1 - \epsilon_{mf})\mu}{3.5D_p\rho}\right)^2 + \frac{(\rho_s - \rho)g\epsilon_{mf}^3 D_p}{1.75\rho}}$

SYMBOLFÖRTECKNING:

TORKNING

c_{pl}	vattnets värmekapacitet, kJ/kg,K
T_{S_1}	torkgodsets temperatur, °C
q_S	värme för uppvärmning av torra godset, kJ/kg avd.
q_{X_1}	värmemängd för uppvärmning av vatten i torkgods, kJ/kg avd.
q_F	värmeförluster, kJ/kg avd.
q_D	värme genom torkluft
$\Delta H_{vap,T_0}$	vattnets ångbildningsvärme vid 0°C, kJ/kg
c_{pV}	vattenångas värmekapacitet, kJ/kg,K
T_{G_2}	luftens temperatur, °C
T_{S_1}	torkgodsets temperatur, °C
H	luftens entalpi, kJ/kg torr luft
Y	luftens vatteninnehåll, kg vattenånga/kg torr luft

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

A	sedimentationsarea, m ²
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

STRÖMNING I PORÖS BÄDD

ρ_s	fasta fasens densitet, kg/m ³
D_p	partikelstorlek, m
g	Acceleration i gravitationsfält, m/s ²
K''	Kozenys konstant
S	Partikelns specifika yta, m ² /m ³
v_{mf}	Minsta hastighet för fluidisation, m/s
μ	fluidens viskositet, Pa·s
ρ	fluidens densitet, kg/m ³
ϵ_{mf}	Bäddens porositet vid minsta hastighet för fluidisation, -

B1.

Data:

$$x_F = 0.06$$

$$x_L = 0.40$$

$$P = 25 \text{ kPa}$$

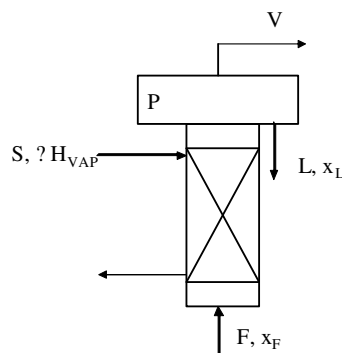
$$P_S = 0.40 \text{ MPa}$$

$$S = 1.2V$$

Kokpunktsförhöjningen kan försummas.

Sökt: T_F

Lösning:



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

$$\text{Komp.balans:} \quad Fx_F = Lx_L \quad (2)$$

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

Entalpier:

$$\Delta H_{VAP} = 2133.94 \text{ kJ/kg}$$

$$h_F = c_{P,F} (T_F - T_{REF}) = \{c_{P,F} = 4.0 \text{ kJ/kgC}, T_{REF} = 0^\circ\text{C}\} = 4.0T_F \text{ kJ/kg}$$

$$h_L = c_{P,L} (T_L - T_{REF}) = \{c_{P,L} = 3.0 \text{ kJ/kgC}, T_L = 64.99^\circ\text{C}, T_{REF} = 0^\circ\text{C}\} = 194.97 \text{ kJ/kg}$$

$$H_V = 2617.69 \text{ kJ/kg}$$

$$(2) \Rightarrow L = F \frac{x_F}{x_L} \quad \Rightarrow \quad L = 0.15F$$

$$(1) \Rightarrow F = V + 0.15F \quad \Rightarrow \quad V = 0.85F$$

$$\Rightarrow \quad S = 1.02F$$

$$(3) \quad 1.02F \cdot 2133.94 + 4.0FT_F = 0.15F \cdot 194.97 + 0.85F \cdot 2617.69$$

$$T_F = 19.4^\circ\text{C}$$

Svar: Ca 20°C

B3.

Data:

$$x_A^0 = 0.35$$

$$x_C^0 = 0.05$$

$$x_S^0 = 0.05$$

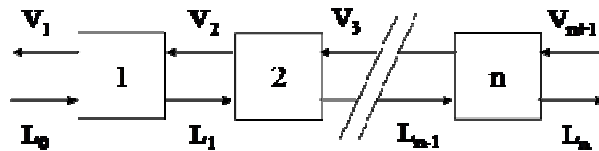
$$x_A^n = 0.025$$

$$L_0 = 2500 \text{ kg/h}$$

$$V_{n+1} = 2000 \text{ kg/h}$$

Sökt: Erforderligt antal ideala extraktionssteg för processen!

Lösning:



Kända strömmars sammanställningar plottas i triangelkdiagram med lösningskurva. Utifrån de kända strömmarna L_0 och V_{n+1} bestäms blandningspunkten M . V_1 och L_n ligger på lösningskurvan. Med kännedom om L_n 's läge kan V_1 's läge skapas. Polen konstrueras utifrån de kända strömmar som kommer till och lämnar anläggningen.

"Stegning" ger att det fordras 12 ideala extraktionssteg!

Svar: 12 st.

B4.

Data:

$$\begin{aligned}c_o' &= 5 \text{ kg H}_2\text{O/ kg fast} \\ \rho_S &= 2500 \text{ kg/m}^3 \\ c_{ut}' &= 1.5 \text{ kg H}_2\text{O/ kg fast} \\ F &= 14400 \text{ kg/h}\end{aligned}$$

Sökt: Minsta erforderliga förtjockararea.

Lösning:

- Strategi:
- Beräkna sammansättningarna till kg/m^3 .
 - Räkna om F till m^3/h .
 - Skapa cv - c -kurva.
 - Bestäm erforderlig area.

$$\bullet \quad c = \frac{M_S}{\frac{M_S}{\rho_S} + \frac{M}{\rho}} \quad c_o = 185.2 \text{ kg/m}^3 \quad ; \quad c_{ut} = 526.3 \text{ kg/m}^3$$

$$\begin{aligned}\bullet \quad F &= 14400 \text{ kg/h} & ; & \quad M_S \text{ 2400 kg} \quad ; \quad M = 12000 \text{ kg/h} \\ F &= \frac{M_S}{\rho_S} + \frac{M}{\rho} & ; & \quad F = 12.96 \text{ m}^3/\text{h}\end{aligned}$$

- cv - c -kurva

Konc. kg/kg	5.0	4.2	3.7	3.1	2.5
$c \text{ kg/m}^3$	185.2	217.4	243.9	285.7	344.8
$v \text{ m/h}$	0.6	0.36	0.282	0.21	0.15
$cv \text{ kg/m}^2\text{h}$	111.11	78.3	68.8	60.0	51.7

$$\bullet \quad \left. \begin{aligned} \frac{F}{A} c_o &= \frac{L}{A} c_{ut} + \frac{V}{A} c_t \\ c_t &= 0 \\ \frac{L}{A} c_{ut} &= 129 \end{aligned} \right\} \quad \frac{F}{A} c_o = 129 \quad \quad A = 18.6 \text{ m}^2$$

Svar: 18.6 m^2

B2

Givna data

$$\begin{aligned} \dot{m}_{filtr} &= 50 \text{ ton/h} & WR &= 4,0 \frac{\text{m}^3 \text{ tvättvätska}}{\text{m}^3 \text{ vätska i kakan}} \\ J &= 0,040 \text{ kg fast/kg suspension} & T &= 50^\circ\text{C} \\ V_{ram} &= 0,036 \text{ m}^3 & \alpha_{av} &= 4,5 \cdot 10^{10} \text{ (m/kg)} \\ A_{ram} &= 1,2 \text{ m}^2 & R_m &= 0 \text{ (Försumbar)} \\ \dot{V}_{1,ram} &= 27,51/\text{min} \cdot \text{ram} & \varepsilon_{av} &= 0,52 \\ \Delta P_1 &= 3,5 \cdot 10^5 \text{ Pa} & \rho_S &= 2750 \text{ kg fast/m}^3 \\ \Delta P_{tv} &= 2,5 \cdot 10^5 \text{ Pa} & & \\ t_{omst} &= 5 \text{ min} & &= 300 \text{ s} \end{aligned}$$

Sökt

- a) t_{slut}
- b) n_{ram}

Lösning

a)

Filtreringen sker först vid konstant flöde. Då gäller:

$$\dot{V} = \frac{dV}{dt} = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{V_1}{t_1} = \frac{A^2 \Delta P_1}{\mu \alpha_{av} c V_1 + \mu R_m A} \quad (1)$$

Eftersom filtreringen sker parallellt genom alla ramarna, kan man även studera detta förlopp i bara en ram. Filtrerekvationen kan då skrivas för det konstanta flödet, med försumbart filtermediemotstånd:

$$\dot{V}_{1,ram} = \frac{\Delta P_1 \cdot A_{ram}^2}{\mu \cdot \alpha_{av} \cdot c \cdot V_1} \quad (2)$$

vilket med känt sluttryck och flöde ger filtratvolymen $V_{1,ram}$:

$$V_{1,ram} = \frac{\Delta P_1 \cdot A_{ram}^2}{\mu \cdot \alpha_{av} \cdot c \cdot \dot{V}_{1,ram}} \quad (3)$$

Tiden t_1 för den första fasen fås nu ur:

$$t_1 = \frac{V_{1,ram}}{\dot{V}_{1,ram}} \quad (4)$$

Efter den första fasen sker filtreringen vid konstant tryckfall. En integrering av filtreringsekvationen ger:

$$t_{slut} = \frac{\mu \alpha_{av} c}{2A^2 \Delta P} \cdot (V_{tot}^2 - V_1^2) + \frac{\mu R_m}{A \Delta P} \cdot (V_{tot} - V_1) + t_1 \quad (5)$$

Med försumbart filtermediemotstånd blir det för en ram i detta fall:

$$t_{slut} = \frac{\mu \cdot \alpha_{av} \cdot c}{2 \cdot A_{ram}^2 \cdot \Delta P_1} \cdot (V_{tot,ram}^2 - V_{1,ram}^2) + t_1 \quad (6)$$

Det saknas vissa data i ovanstående ekvationer. Vätskans egenskaper bestäms med hjälp av D & D s. 76:

$$\rho = 988,1 \text{ kg/m}^3 \quad \mu = 0,000549 \text{ Pa s}$$

Filterkvoten c fås ur:

$$c = \frac{J\rho}{1 - J - \frac{\epsilon_{av} J \rho}{1 - \epsilon_{av} \rho_s}} \quad (7)$$

$$c = 41,8 \text{ kg/m}^3$$

Instättning i ekvation (3) och (4) ger nu:

$$\begin{aligned} V_{1,ram} &= 1,064 \text{ m}^3 \\ t_1 &= 2321 \text{ s} \quad = 38,7 \text{ min} \end{aligned}$$

För att bestämma sluttiden, behöver vi bestämma den filtratmängd som producerats när en ram är full. Denna kan fås med hjälp av filterkvoten och data för kakan, eftersom:

$$c = \frac{m_s}{V} \quad (8)$$

$$V_{tot,ram} = \frac{m_{s,ram}}{c} = \frac{\rho_s(1 - \epsilon_{av})V_{ram}}{c} \quad (9)$$

$$V_{tot,ram} = 1,135 \text{ m}^3$$

Nu fås t_{slut} genom insättning i ekvation (6):

$$t_{slut} = 2483 \text{ s} \quad = 41,4 \text{ min}$$

b)

För att beräkna hur många ramar som krävs för att ta hand om en viss mängd filtrat, måste den totala tiden för en filtercykel, med tvättning och omställning, beräknas. Därefter kan det nödvändiga antalet bestämmas med hjälp av filtratbalansen:

$$\dot{V}_{filtrat} \cdot t_{cykel} = n_{ram} \cdot V_{tot,ram} \quad (10)$$

$$n_{ram} = \frac{\dot{V}_{filtrat} \cdot t_{cykel}}{V_{tot,ram}} = \frac{\dot{m}_{filtrat} \cdot t_{cykel}}{\rho \cdot V_{tot,ram}} \quad (11)$$

med

$$t_{cykel} = t_{slut} + t_{tv} + t_{omst} \quad (12)$$

Först måste tvätttiden beräknas. Tvättningen är ett specialfall med både konstant flöde och tryckfall, och integrering av filterekvationen ger då för en ram vid enkel tvättning:

$$\dot{V}_{tv,ram} = \frac{\Delta P_{tv} \cdot A_{ram}^2}{\mu \cdot \alpha_{av} \cdot c \cdot V_{tot,ram}} \quad (13)$$

(Produkten $\alpha_{av} \cdot c \cdot V_{tot,ram}$ motsvarar motståndet i den bildade filterkakan.)

Instättning i ekvation (13) ger:

$$\dot{V}_{tv,ram} = 4,58 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{ram}$$

Den totala volymen tvättvätska som ska strömma igenom fås ur tvättvätskekvoten WR :

$$WR = \frac{V_{tv,ram}}{\epsilon_{av} \cdot V_{ram}} \quad (14)$$

$$V_{tv,ram} = WR \cdot \epsilon_{av} \cdot V_{ram} \quad (15)$$

$$V_{tv,ram} = 0,075 \text{ m}^3$$

Tvätttiden fås nu ur:

$$t_{tv} = \frac{V_{tv,ram}}{\dot{V}_{tv,ram}} \quad (16)$$

$$t_{tv} = 244 \text{ s}$$

vilket insatt i ekvation (12) ger:

$$t_{cykel} = 3027 \text{ s} \quad = 50,4 \text{ min}$$

Minsta antalet ramar som behövs, kan nu beräknas med hjälp av ekvation (11):

$$n_{ram} = 37,47 \text{ ramar} \quad = 38 \text{ ramar}$$

(OBS! Måste alltid avrundas uppåt!)