

10 УПАРАВАЊЕ

Упаравање је технолошка операција концентровања раствора који чине течни растварач и неиспарљиви растворак, а која се састоји у делимичном испаравању течног растварача из основног раствора.

Ова технолошка операција има широку примену у процесној индустрији (посебно у прехранбеној и хемијској) где се у оквиру сложених технолошких линија добијају слаби течни раствори које је у циљу добијања финалних производа потребно концентровати или у потпуности ослободити течности (шећер из шећерног сирупа, кухињска со из морске воде, чилска шалитра - NaNO_3 , поташа - K_2CO_3) ради крајње употребе, складиштења или транспорта [10.1].

У неким случајевима операција упаравања се обавља у циљу добијања чистог растварача, када је нуспроизвод концентровани раствор (постројења за десалинизацију - добијање воде за пиће из морске воде) [10.2].

Упаравање је добило индустријску примену још почетком 19. века (индустрија шећера). Сам поступак је по својој идеји доста једноставан, ради се о поступку загревања течног раствора до температуре кључања када течност из раствора испарава, али су у пракси ови поступци доста сложени са становишта добијања квалитетног финалног производа, економичног искоришћења топлотне енергије и адекватне примене одговарајућих типова размењивача топлоте - упаривача.

Практично решавање проблема упаравања у великој мери зависи од термофизичких својстава раствора као што су концентрација растворка у раствору, склоност мешавине ка успевавању термостабилност раствора и склоност ка прљању грејних површина апарата [10.3].

Уобичајено је да се садржај растворка у мешавини дефинише преко масених удела растворене супстанце. Растварачи могу бити вода, алкохоли, органске течности, итд. У пракси се најчешће третирају водени раствори соли.

У полазној сировини је најчешће масени удео растворка мали па су термофизичка својства блиска термофизичким својствима чистог растварача. Током процеса упаравања концентрација растворка у мешавини расте, а са њеним повећањем расте густина и вискозност раствора, а смањује се коефицијент проводјења топлоте и специфични топлотни капацитет, што све заједно утиче на смањење коефицијента прелаза топлоте.

Са порастом концентрације растворка у мешавини расте температура кључања раствора при константном притиску у систему [10.4].

Поједине мешавине (посебно органског порекла) имају изражену склоност ка успевавању (стварању пене) што је непожељно, јер интензивно успевавање, поред низа других проблема који се јављају у погону, може проузроковати интензивно узношење концентрованог раствора са паром која се у току процеса ствара, што представља губитак у производњи.

Постоји већи број раствора у прехранбеној, хемијској и фармацеутској индустрији који се не смеју третирати на високој температури, јер би се изгубило на квалитету финалног производа (то су ткз. термолабилни материјали које захтевају специјалне потупке обраде). Такве супстанце захтевају третман при нижим температурама, а у краћем временском периоду [10.5].

Присуство кристала у раствору који се упарава није пожељно, јер се они могу таложити на зидовима апарата образујући слој талога који смањује коефицијент пролаза топлоте, што утиче на смањење производног капацитета постројења. Интензитет прљања грејних површина апарата зависи дакле од концентрације раствора, физичко - хемијских карактеристика мешавине, а свакако и од брзине струјања раствора кроз апарат. У неким случајевима се ради успоравања процеса кристализације основном раствору додају адитиви који повећавају растворљивост раствора у мешавини, а да то не утиче на квалитет финалног производа. Ако се у току процеса упаравања јавља интензивно прљање грејних површина упаривача, онда се препоручује периодично испирање апарата одређеним хемијским препаратима [10.1].

Зависно од агресивности раствора бирају се материјали за израду упаривача. У принципу би требало, када год је то могуће, користити обичне конструкционе материјале, као што су конструкциони челици и ливено гвожђе. Многи раствори делују кородивно на легуре гвођа или обрнуто - гвожђе делује неповољно на квалитет упареног раствора (контаминација мешавине) па се у таквим ситуацијама користе бакар, никл, нерђајући челици, графит, итд. При примени ових скувих материјала треба тежити таквим конструкционим решењима која се одликују ефикасном разменом топлоте (велики коефицијенти пролаза топлоте), што смањује утрошак материјала, а самим тим и цену апарата [10.3].

Трансформација супстанце из течног агрегатног стања у пару се дешава на грејним површинама (клијалишта парних мехурова) на одређеној температури и притиску у систему. Ако је равнотежни притисак паре растварача нижи од притиска у систему онда се ради о појави хлапљења, што је у принципу лагани процес. Са повишењем температуре раствора расте и равнотежни притисак паре, а самим тим и интензитет транспорта супстанције, све до тренутка док се равнотежни притисак паре не изједначи са спољашњим притиском. У том тренутку долази до кључања раствора и до бурног испаравања течности. Температура при којој равнотежни притисак паре достиже притисак у систему је температура кључања [10.4].

10.1 ТЕРМОФИЗИЧКА СВОЈСТВА РАСТВОРА

Термофизичка својства раствора као што су растворљивост, густина, вискозност, топлотни капацитет, топлотна проводност, температура кључања и топлота растварања утичу на интензитет упаравања, избор самог поступка (технолошке шеме по којој се процес обавља) и врсте апарата који се при томе користе. Зато је неопходно размотрити посебно сваки од набројаних параметара.

10.1.1 Растворљивост

Јасно је да се у одредјеној количини растварача не може растворити неограничена количина чврсте супстанце (растворка). Раствор који при датим условима (температура и притисак у општем случају) садржи у себи максимално могућу количину раствора, а да не долази до кристализације је засићен. Растворљивост супстанце у растварачу се, за већину радних материја, у знатној мери мења са температуром. Тако за већину соли у води растворљивост расте са порастом температуре. За неке соли у води (NaCrO_4 , MnSO_4 , Na_2SO_4) растворљивост опада са

температуром и вишак соли се таложи у облику кристала, док је растворљивост кухињске соли (NaCl) у води практично независна од температуре.

10.1.2 Густина раствора

Густина раствора ($\rho_r, \text{kg/m}^3$) се може приближно одредити на основу правила адитивности

$$\rho_r = \rho_A \cdot \tilde{x}_A + \rho_B \cdot (1 - \tilde{x}_A) \quad (10.1)$$

где су:

- $\rho_A, \text{kg/m}^3$, густина чистог раствора (компонента А)
- $\rho_B, \text{kg/m}^3$, густина растварача (компонента В)
- $\tilde{x}_A, \text{kgA/kg(A+B)}$, масени удео раствора у раствору

Ако је позната густина раствора на температури t_1 , онда се густина раствора на температури t_2 може одредити према [10.6]

$$(\rho_r - \rho_B)_{t_1} = (\rho_r - \rho_B)_{t_2} \quad (10.2)$$

10.1.3 Вискозност раствора

Динамичка вискозност раствора ($\mu_r, \text{Pa} \cdot \text{s}$) опада са порастом температуре и повећава се са порастом концентрације раствора у мешавини.

10.1.4 Топлотни капацитет раствора

Специфични топлотни капацитет раствора ($c_r, \text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$) се такође може одредити приближно на основу правила адитивности [10.6], [10.7]

$$c_r = c_A \cdot \tilde{x}_A + c_B \cdot (1 - \tilde{x}_A) \quad (10.3)$$

где су:

- $c_A, \text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, специфични топлотни капацитет чистог раствора
- $c_B, \text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, специфични топлотни капацитет растварача.

Стварна промена специфичног топлотног капацитета са концентрацијом раствора за неке водене растворе дата је на слици 10.3 [10.1], [10.8].

Специфични топлотни капацитет једињења (компонента А) се може, када нема експерименталних података, приближно израчунати помоћу једначине [10.6]

$$M_A \cdot c_A = \sum_i c_i \cdot n_i \quad (10.4)$$

где су:

- $M_A, \text{kg/kmol}$, кг/кмол, моларна маса једињења
- $c_i, \text{J}/(\text{atom} \cdot \text{K})$, атомски топлотни капацитет
- n_i , број атома елемената у молекулу једињења.

10.1.5 Топлотна проводност раствора

Топлотна проводност раствора (λ_r , W/(m·K)) са ретким изузетима опада са порастом концентрације раствора у мешавини [10.1].

За одређивање коефицијента топлотне проводности водених раствора соли и киселина на 20 °C, користи се углавном формула Ридела [10.9]

$$\lambda_r = \lambda_B + \alpha_i \cdot c_i \quad (10.5)$$

где су:

- λ_B , W/(m·K), топлотна проводност воде на 20 °C
- c_i , kmol/m³, концентрација електролита
- α_i , коефицијент који зависи од врсте јона

За водене растворе NaOH и KOH формула Ридела гласи

$$\lambda_r = \lambda_B + \alpha_i \cdot c_i + \varphi(c_i) \quad (10.6)$$

где је:

- $\varphi(c_i)$, W/(K·m), корекциони фактор

$$\varphi(c_i) = 0,015 \cdot c_i^{0,48} \quad (10.7)$$

За приближна израчунавања може се, за водене растворе соли и база, користити релација [10.1]

$$\left(\frac{\lambda_r}{\lambda_B} \right)_t = \left(\frac{\lambda_r}{\lambda_B} \right)_{20^\circ C}$$

10.1.6 Температура кључања раствора - термодинамичка температурска депресија

Равнотежни притисак паре чистог растварача на константној температури је виши од равнотежног притиска паре која се формира изнад раствора. Раствор кључа на температури која је виша од температуре кључања чистог растварача при константном притиску. Тако нпр. засићен раствор кухињске соли у води (26,4 % мас) има, на атмосферском притиску, температуру кључања 110°C, док је температура кључања чистог растварача (воде) на атмосферском притиску 100°C.

У општем случају температура паре која се образује изнад кључалог раствора једнака је температури кључања посматраног раствора и виша је од температуре кључања чистог растварача при константном притиску.

температури $p_B^o(t)$ за задату концентрацију константан и независан од температуре кључања [10.10]

$$\frac{p_B(t)}{p_B^o(t)} = \text{const} \quad (10.10)$$

Значи, ако је позната температура кључања раствора одређене концентрације на атмосферском притиску, онда је могуће веома једноставно одредити температуру кључања раствора за било који други притисак. Слично као и у претходном случају, ова формула даје задовољавајуће вредности за разблажене растворе.

Најтачнија процена термодинамичке температурске депресије се може извршити коришћењем правила Дириња (Дурињ) [10.11]

$$\frac{t_r(p_1) - t_r(p_2)}{t_B(p_1) - t_B(p_2)} = \text{const} \quad (10.11)$$

Недостатак метода Дириња у односу на претходна два метода је у потреби за познавањем две вредности термодинамичке температурске депресије (за притиске p_1 и p_2) за раствор одређеног састава.

Теоријско одређивање термодинамичке температурске депресије

Промена равнотежног притиска паре са температуром може се одредити према Клаузијус - Клапејроновој (Clausius, Clapeyron) једначини фазног прелаза

$$\frac{dp_B}{dT} = \frac{r}{T \cdot \left(\frac{1}{\rho_g} - \frac{1}{\rho_l} \right)} \quad (10.12)$$

где су:

- p_B, Pa , притисак паре чистог растварача
- $\rho_g, kg/m^3$, густина сувозасићене паре
- $\rho_l, kg/m^3$, густина кључале течности.

Ако је испуњен услов $\rho_l \gg \rho_g$ израз (10.12) се може упростити

$$\frac{dp_B}{dT} = \frac{r \cdot \rho_g}{T}$$

Ако се искористи једначина стања идеалног гаса

$$\rho_g = \frac{p_B \cdot M_B}{R_u \cdot T}$$

где су:

- $R_u = 8,314 J/(kmol \cdot K)$, универзална гасна константа
- $M_B, kg/kmol$, моларна маса растварача.

Према Рауловом (Раоулт) закону [10.10] равнотежни притисак паре растварача износи

$$p_B = p_B^o \cdot x_B = p_B^o \cdot (1 - x_A) \quad (10.16)$$

где су:

- p_B^o, Pa , равнотежни притисак паре чистог растварача (Б) на температури T
- $x_B = 1 - x_A$, $kmolB/kmol(A + B)$, молски удео растварача у раствору.

Диференцирањем једначине (10.16) добија се

$$dp_B = -p_B^o \cdot dx_A \quad (10.17)$$

Заменом (10.15) и (10.17) у (10.13) добија се једначина

$$\frac{dx_A}{dT} = -\frac{(1-x_A) \cdot r \cdot M_B}{R_u} \cdot \frac{1}{T^2} \quad (10.18)$$

Интеграљењем једначине (10.18) од температуре кључања чистог растварача (T_B, K) до температуре кључања раствора (T_r, K) при сталном притиску

$$\int_0^{x_A} \frac{dx_A}{1-x_A} = -\frac{r \cdot M_B}{R_u} \cdot \int_{T_B}^{T_r} \frac{dT}{T^2} \quad (10.19)$$

добија се

$$\ln \frac{1}{1-x_A} = \frac{r \cdot M_B}{R_u} \cdot \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_B} \right) \quad (10.20)$$

Пошто је термодинамичка температурска депресија по дефиницији разлика

$$\Delta_1 = T_r - T_B \quad (10.21)$$

на основу једначине (10.20) биће

$$\Delta_1 = \frac{T_B^2}{\frac{r \cdot M_B}{R_u \cdot \ln \frac{1}{1-x_A}} - T_B}$$

што значи да термодинамичка температурска депресија зависи од температуре и топлоте промене фазе растварача и састава мешавине.

Уколико се у једначини (10.12) може сматрати да је испуњено $T_B^2 \gg T_B \cdot \Delta_1$ занемари члан $T_B \cdot \Delta_1$ добија се једноставнији израз

$$\Delta_1 = \frac{T_B^2}{r} \cdot \frac{R_u}{M_B} \cdot \ln \frac{1}{1-x_A}$$

Овако израчуната термодинамичка температурска депресија нема већу примену у пракси и углавном важи за јако разблажене растворе.

У наредној табели (15.4) је дата термодинамичка температурска депресија за неке водене растворе на атмосферском притиску.

* 6,25

Табела 15.4

Растворак	\tilde{x}_A , kgA/kg(A + B)															
	0,10	0,20	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95
CaCl ₂	1,5	4,5	10,5	14,3	19,0	24,3	30,0	36,5	43,0	50,7	60,0	75,0	-	-	-	-
Ca(NO ₃) ₂	1,1	2,5	4,3	5,4	6,7	8,3	10,0	13,2	17,2	23,0	31,2	40,2	49,2	-	-	-
CuSO ₄	0,3	0,6	1,4	2,1	3,1	4,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FeSO ₄	0,3	0,7	1,3	1,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
KCl	1,3	3,3	6,1	8,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
KNO ₃	0,9	2,0	3,2	3,8	4,5	5,2	6,1	7,2	8,5	10,0	11,6	13,7	-	-	-	-
KOH	2,2	6,0	12,2	17,0	23,6	33,0	45,0	60,4	78,8	100,5	126,5	155,5	190,3	225,0	-	-
K ₂ CO ₃	0,8	2,2	4,4	6,0	8,0	10,9	14,6	19,0	24,0	31,4	-	-	-	-	-	-
MgCl ₂	2,0	6,6	15,4	22,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MgSO ₄	0,7	1,7	3,4	4,8	7,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NH ₄ Cl	2,0	4,3	7,6	9,6	11,6	14,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NH ₄ NO ₃	1,1	2,5	4,3	5,12	6,3	7,50	9,10	11,0	13,2	15,7	19,0	23,0	28,0	35,5	47,5	72,5
(NH ₄) ₂ SO ₄	0,7	1,6	2,9	3,7	4,7	5,9	7,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NaCl	1,9	4,9	9,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NaNO ₃	1,2	2,6	4,5	5,6	6,8	8,4	10,0	12,0	14,5	17,9	-	-	-	-	-	-
NaOH	2,8	8,2	17,0	22,0	28,0	35,0	42,2	50,6	59,5	69,0	79,6	92,0	106,6	124,0	145,5	174,5
Na ₂ CO ₃	1,1	2,4	4,2	5,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Na ₂ SO ₄	0,8	1,8	2,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Шећер (сахароза)	0,1	0,3	0,6	0,8	1,0	1,4	1,8	2,4	3,0	-	-	-	-	-	-	-
BaCl ₂	0,8	2,0	3,4	4,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
K ₂ O	0,8	1,6	2,8	3,6	4,5	5,6	7,1	9,0	11,5	14,8	-	-	-	-	-	-
KClO ₃	0,8	1,8	2,9	3,5	4,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Na ₂ O ₃	0,8	1,8	3,4	4,5	5,8	7,5	9,6	12,1	15,1	18,4	21,7	24,7	-	-	-	-

10.1.7 Топлота растварања - енталпија течног раствора

Раствори се у општем случају не могу разматрати као просте механичке мешавине две или више компонената, јер се при растварању раствора (А) у растварачу (В) јављају додатни топлотни ефекти (егзотермни или ендотермни процеси) када се говори о топлоти мешања (растварања). Појава мешања компонената је праћена променом запремине раствора. Ако нема ових пратећих термофизичких ефеката онда се ради о тз. идеалним растворима. Јасно, у општем случају сви раствори су неидеални.

При растварању амонијумнитрата (NH₄NO₃) у води настаје интензивно расхлађење раствора - ендотермни процес [10.12]



Ако се раствара калијумхидроксид (KOH) у води долази до интензивног загревања течног раствора - егзотермни процес



Ознаком aq се обележава велика, тачније неодређено велика количина растварача (у овом случају воде) у систему.

У многим растворима се јавља и одређена количина тз. солвата (када је растварач вода онда се ради о хидратима) који представљају углавном нестабилна

једињења која граде молекули растворка и растварача. У неким случајевима појава стварања солвата значајно може да утиче на физичко - хемијска својства раствора. Нпр. безводни сулфат бакра је безбојан, а његов водени раствор има плаву боју захваљујући хидратима бакар сулфата који се при растварању формирају [10.12].

Концентрација солвата у раствору је променљива и свакако зависи од масеног удела растворка у раствору и од температуре у систему. Може се закључити да раствор представља мешавину слободних молекула растворка, растварача и солвата, у складу са хемијском теоријом раствора Менделејева (Менделеев) из 1887.

Топлота растварања се састоји из два основна члана. Једно је топлина растварања у ужем смислу која је последица разрушења структуре кристалних решетки за шта је потребно утрошити одређену енергију и то је јасно по правилу ендотермна реакција. Други члан представља топлоту солватације, односно хидратације ако се ради о воденим растворима и овакви процеси могу бити егзотермни или ендотермни, тако да је у општем случају процес растварања праћен одавањем или апсорбовањем одређене количине топлоте зависно од међусобног односа ова два поменута члана [10.13].

За сваки раствор се може одредити интегрална топлина дехидрације, која зависи од природе саме мешавине као и од почетне и крајње концентрације растворка у раствору.

За процес формирања раствора на референтној температури (t_0) може се поставити једначина енергетског биланса

$$m_A \cdot h_A(t_0) + m_B \cdot h_B(t_0) = (m_A + m_B) \cdot h(t_0) + Q_r \quad (10.27)$$

где су:

- m_A , kg A, маса растворка у систему
- m_B , kg, маса растварача у систему
- $h_A(t_0)$, J/kgA, специфична енталпија растворка на референтној температури
- $h_B(t_0)$, J/kgB, специфична енталпија растварача на референтној температури
- $h(t_0)$, J/kg(A + B), специфична енталпија раствора на референтној температури
- Q_r , J, топлина растварања.

Очигледно је да у случају када је реакција егзотермна (топлота се ослобађа) топлина растварања има предзнак плус и обрнуто када је реакција ендотермна има предзнак минус.

Топлота растварања се најчешће своди на јединицу масе растворка или на јединицу масе раствора, када важе следеће релације

$$\dot{q}_r = \tilde{x}_A \cdot q_r \quad (10.28)$$

где су:

- \dot{q}_r , J/kg(A + B), J/kg(A + B), специфична топлина растварања сведена на јединицу масе раствора
- q_r , J/kgA, специфична топлина растварања сведена на јединицу масе растворка.

Потребно је правити разлику између интегралне топлоте растварања о којој је до сада било ређи и диференцијалне топлоте растварања [10.14].

Диференцијална топлота растварања представља топлоту реакције која се јавља при мешавину мале количине растворка са раствором познатог састава тако да се састав раствора у току овог процеса практично не меша.

С обзиром да су по дефиницији енталпије чистих компоненти на референтној температури једнаке нули, тј.

$$h_A(t_0) = h_B(t_0) = 0 \quad (10.29)$$

следи да је енталпија раствора на референтној температури

$$h(t_0) = -q_r' = -\tilde{x}_A \cdot q_r \quad (10.30)$$

Може се закључити да за егзотермне реакције које су праћене појавом загревања течног раствора енталпија течног раствора на референтној температури има предзнак минус, а за ендотермне реакције она има предзнак плус.

С обзиром да је по дефиницији промена енталпије течног раствора од референтне температуре до неке произвољне температуре

$$h(t) - h(t_0) = c_p \cdot (t - t_0) \quad (10.31)$$

следи

$$h(t) = c_p \cdot (t - t_0) + h(t_0) \quad (10.32)$$

односно

$$h(t) = c_p \cdot (t - t_0) - q_r' \quad (10.33)$$

или

$$h(t) = c_p \cdot (t - t_0) - \tilde{x}_A \cdot q_r \quad (10.34)$$

У току процеса упаравања меша се састав раствора. Ако раствор није идеалан, што је најчешћи случај, промена састава доводи до додатних топлотних ефеката (појава топлоте дехидрације) који могу имати одређени утицај на укупни топлотни биланс упаривача.

За сваки раствор се може одредити укупна топлота дехидрације, која зависи од природе саме мешавине као и од почетне и крајње концентрације растворка у раствору.

Специфична топлота дехидрације се обично одређује по јединици масе растворка у мешавини у зависности од његове почетне и крајње концентрације

$$q_{DH} = q_{rp} - q_{rk} \text{ , J/kgA} \quad (10.35)$$

где су:

- q_{rp} , J/kgA, специфична топлота растварања сведена на јединицу масе растворка при почетној концентрацији
- q_{rk} , J/kgA, специфична топлота растварања сведена на јединицу масе растворка при крајњој концентрацији.

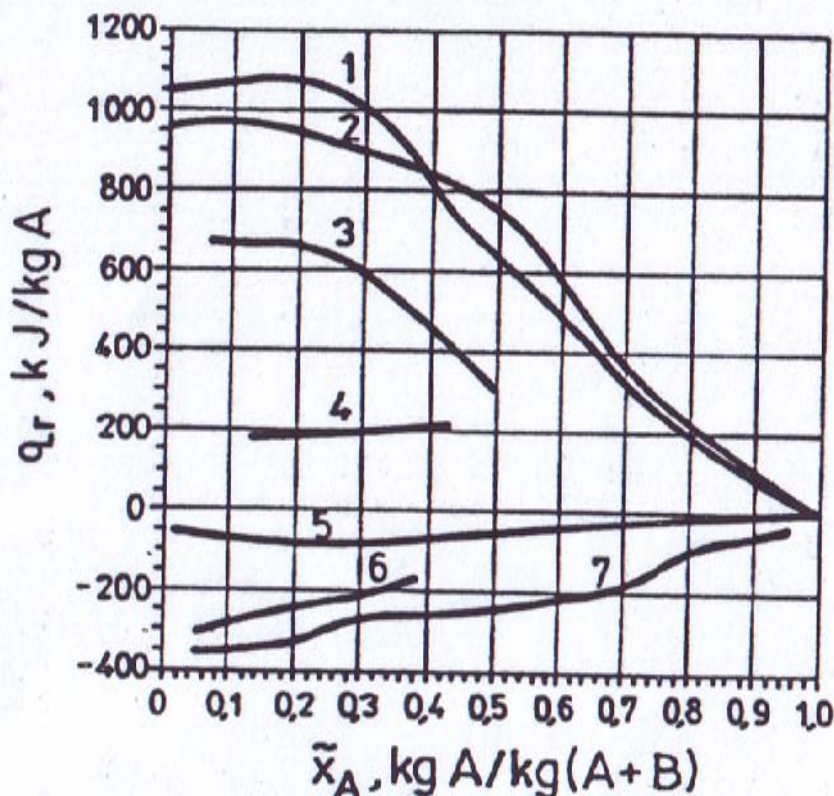
Укупна топлота дехидрације зависи и од укупне количине растворка у систему (за шаржне апарате), односно од протока растворка кроз упаривач (за проточне апарате) и износи

$$Q_{DH} = m_A \cdot q_{DH} \quad (10.36)$$

где је:

- m_A укупна количина раствора у систему у шаржном апарату или проток раствора кроз упаривач за проточни апарат.

Најчешће је укупна топлота дехидрације мала у односу на све друге чиниоце који фигуришу у једначинама енергетског биланса, па се као таква углавном занемарује. На наредној слици је дата интегрална топлоте дехидрације за неке водене растворе.



1-NaOH, 2-KOH, 3-CaCl₂, 4-K₂Cl, 5-(NH₄)₂SO₄, 6-NaNO₃, 7-NH₄NO₃

10.2 ТЕРМОФИЗИЧКА СВОЈСТВА ПРЕХРАМБЕНИХ ПРОИЗВОДА

Многи прехранбени производи се добијају у процесу упаравања. Извршена су мерења карактеристичних величина за шећерни сируп, воћне сокове, млеко са шећером, итд. Утврђено је да се термофизичке величине мењају углавном са садржајем сувог материјала у раствору као и са променом температуре. Емпиријске формуле које следе немају велику тачност, али се могу користити у топлотном прорачуну процеса упаравања. Јасно је да ове емпиријске изразе треба користити само када не постоје подаци за конкретну мешавину [10.5].

Термодинамичка температурска депресија се може проценити помоћу обрасца за произвољан садржај сувог материјала

$$\Delta_N = 0,40 \cdot \exp(4,5 \cdot \tilde{x}_A) \quad (10.37)$$

Статистичком обрадом експерименталних података за различите растворе на собној температури ($t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$) добијене су следеће емпиријске зависности:

- специфични топлотни капацитет

$$c_o = 4190 \cdot (1 - \tilde{x}_A), \text{ J/(kg} \cdot \text{K)} \quad (10.38)$$

- густина

$$\rho_o = 1000 \cdot (1 + 0,42 \cdot \tilde{x}_A), \text{ kg/m}^3 \quad (10.39)$$

• топлотна проводност

$$\lambda_o = 0,595 \cdot (1 - 0,49 \cdot \tilde{x}_A^{0,53}), \text{ W/(m} \cdot \text{K)} \quad (10.40)$$

- динамичка вискозност

$$\mu_o = 99 \cdot 10^{-6} \cdot \exp(8 \cdot \tilde{x}_A), \text{ Pa} \cdot \text{s} \quad (10.41)$$

Поправка за произвољну температуру мешавине ($t, \text{ }^\circ\text{C}$)

$$c = c_o + 1,75 \cdot (t - 20), \text{ J/(kg} \cdot \text{K)} \quad (10.42)$$

$$\rho = \rho_o - 0,5 \cdot (t - 20), \text{ kg/m}^3 \quad (10.43)$$

$$\mu = \frac{12,9 \cdot \mu_o}{(t - 20)^{0,85}}, \text{ Pa} \cdot \text{s} \quad (10.44)$$

10.3 УПАРАВАЊЕ РАСТВОРА

Упаравање раствора се обавља у апаратима шаржног и проточног типа. Првобитно су развијани апарати шаржног типа, при чему се почетни раствор налива у резервоарски простор упаривача, загрева до температуре кључања и упарава до крајње концентрације. Температура кључања расте током времена рада апарата, јер се повећава садржај раствора у раствору са издвајањем паре. Угушћени раствор се извлачи из упаривача и процес се затим понавља од почетка са новом шаржом.

Данас се овакви апарати ретко користе, пре свега због неекономичне потрошње топлотне енергије и то углавном тамо где се ради о малим производним капацитетима или о потреби добијања мањих количина упареног раствора различите концентрације из једне шарже.

У савременој индустрији користе се вишестепене упаривачке станице проточног типа које чине батерије размењивача топлоте - упаривача [10.1], [10.2].

Обично се у оквиру упаривачке станице само у први степен доводи грејни медијум са стране, док се за грејање наредних степена који раде на нижем притисцима користи пара која се образује над раствором у посматраном степену станице. Пара која се образује над кључалим раствором се назива секундарна пара.

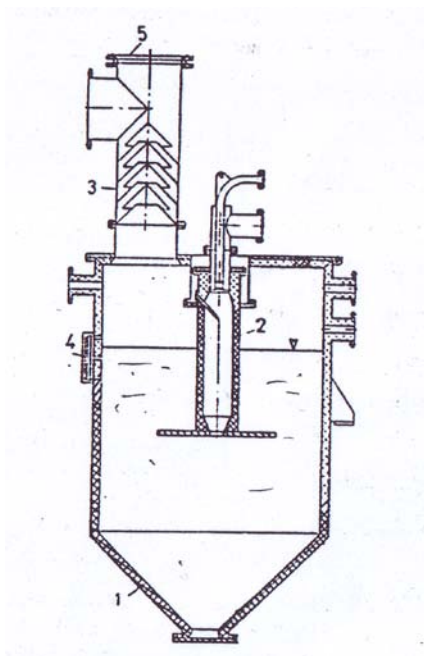
Ако се први степен упаривачке станице греје са воденом паром онда се та пара назива грејна или примарна пара.

Део секундарне паре се може користити не само за грејање појединих упаривачких тела, већ и у другим потрошачима топлоте који пак могу бити изван упаривачке станице. Та пара се назива екстра пара.

Степени упаривачке станице подразумевају технолошке подсистеме у оквиру упаривачке станице који се међусобно разликују по карактеристичним радним параметрима као што су концентрација раствора у мешавини, притисак и температура. У вишестепеним упаривачким станицама раствор прелази из степена у степен, све се више угушћује, да би се у последњем степену добио финални производ.

Према начину преноса топлоте упаривачи се деле на рекуперативне и контактне апарате [10.1].

Као упаривачи користе се углавном рекуперативни размењивачи топлоте, мада се у последње време, за изразито агресивне растворе, примењују контактни размењивачи топлоте [10.16], погледати наредну слику.



1-Оклоп (тело апарата), 2-горионик, 3-одвајач капи, 4-нивоказ, 5-мембрански сигурносни вентил

У контактним апаратима продукти сагоревања високе температуре барботирају кроз слој течног раствора који се концентрује. Оклоп оваквог упаривача се прави од конструкционог челика који је са унутрашње стране озидан, док се сви елементи конструкције који долазе у непосредан контакт са раствором израђују од киселоотпорних материјала.

10.4 ТЕХНОЛОШКЕ ШЕМЕ УПАРАВАЊА

Континуални процес упаравања се обавља у упаривачким станицама које могу бити једноступене и вишеступене са искоришћењем секундарне паре за упаравање

раствора у степенима који раде на нижим притисцима. Део ове секундарне паре се може предати потрошачима топлоте који су изван технолошке линије упаравања (екстра пара).

Већином се упаривачи греју помоћу сувозасићене водене паре која се кондензује на спошањој површини цеви, односно у међуцевном простору грејног тела. Обично се примарна (грејна) пара уводи у први степен упаривачке станице. Притисак грејне паре се креће у границама $3 \div 10 \text{ bar}$ (температуре $135 \div 180^\circ \text{C}$). Ако је неопходна виша температура грејног флуида у првом упаривачком телу онда се могу користити високотемпературски радни флуиди (нпр. минерална уља). Даље упаравање раствора се обавља на нижим притисцима тако да у последњем степену упаривачке станице може владати вакуум (апсолутни притисак у систему до $0,05 \text{ bar}$) [10.1].

Ако се користи једноступена упаривачка станица онда се секундарна пара одводи из система и кондензује у кондензатору. То је за већину случајева неекономичан систем упаравања са неефикасним искоришћењем топлоте.

Да би се испарио 1 kg воде из раствора потребно је утрошити (кондензовати) $1 \div 1,3 \text{ kg}$ грејне паре. Јасно је да ће упаравање бити знатно економичније ако се секундарна пара из једног упаривачког тела користи за упаравање раствора у наредном степену, када ће количина упареног растварача бити знатно већа за исту потрошњу примарне паре у односу на шему једноступеног упаравања [10.3].

Као расхладни радни флуид за кондензацију секундарне паре из последњег степена упаривачке станице користи се по правилу вода. За кондензацију користи се вода из река, језера, вештачких акумулација или бунара када се остварује проточно хлађење кондензатора.

У подручјима где нема довољно воде за проточно хлађење користи се систем циркулационог хлађења који се остварује помоћу куле за хлађење воде спрегнуте са контактним размењивачем (најчешће барометријски кондензатор) или помоћу евапоративног кондензатора. При том процесу топла вода из кондензатора се уводи у кулу где јој се температура снижава помоћу околног ваздуха (евапоративно хлађење воде). Због испаравања воде у току процеса хлађења, као и због осталих губитака у систему, повремено се додаје одређена количина свеже воде. У овом случају је потрошња свеже воде знатно мања од количине воде која се троши у систему проточног хлађења.

У последње време се користе и кондензатори са ваздушним хлађењем, ако је упаривачка станица смештена у подручје које је дефицитарно са водом.

Приликом пројектовања упаривачке станице потребно је изабрати технолошку шему упаравања, оптимални број степена упаравања и систем рационалног искоришћења секундарне паре.

Примарна грејна пара која се уводи у први степен упаривачке станице мора да има температуру која је довољно висока да обезбеди потребну температурску разлику између грејног медијума и раствора на температури кључања. Ова температурска разлика не би требало да буде испод 10°C . Од температуре примарне паре зависи и могућност искоришћења секундарне паре у наредним степенима упаривачке станице. У последњим степенима упаривачке станице где је вискозност раствора велика,

посебно у случају кристализације угушћеног раствора потребно је да корисна температурска разлика буде у границама $28 \div 30 \text{ }^\circ\text{C}$, а понекад и већа.

Са друге стране, није добро преко мере повећавати температуру а самим тим и притисак примарне водене паре, јер то доводи до нерационалне потрошње горива у котловском постројењу и поскупљења постројења (дебљи зидови апарата и грејних тела упаривача као и сложенија конструкција).

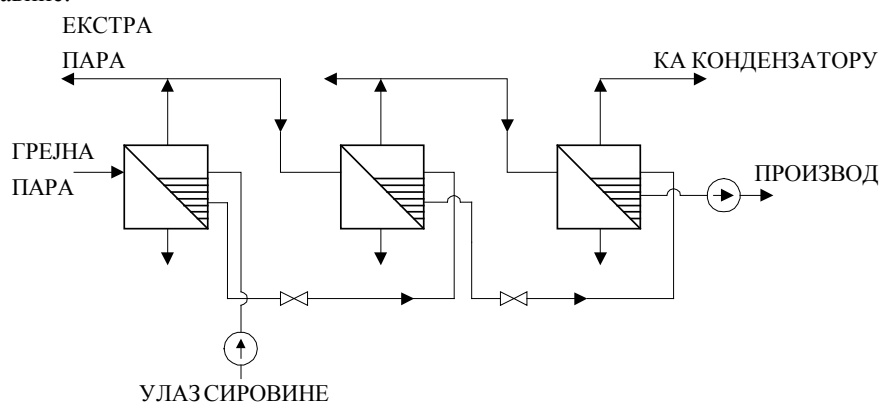
Кондензат из првог степена упаривачке станице се враћа у котло, док се кондензат из осталих степена не може враћати јер у себи садржи и одређену количину раствора без обзира на ефикасност сепаратора.

Према релативном кретању грејне паре и раствора кроз упаривачку станицу оне се деле на четири основне групе [10.2]:

- упаривачке станице са истосмерним током;
- упаривачке станице са супротносмерним током;
- упаривачке станице са паралелним током;
- упаривачке станице са комбинованим током.

10.4.1 Упаривачке станице са истосмерним током

У оваквим упаривачким станицама секундарна пара и раствор струје у истом смеру (од првог ка последњем упаривачком телу где се концентровање угушћеног раствора обавља на најнижем притиску који влада у систему, а самим тим и на најнижој температури). Ова шема обезбеђује најједноставнији начин транспорта раствора из степена у степен. Са стране раствора су потребне само две пумпе и то пумпа за сировину и пумпа за финални производ (слика 10.9). Транспорт раствора између појединих степена се остварује захваљујући разлици притисака која постоји између суседних упаривачких тела. На цевоводу за транспорт раствора налазе се регулациони вентили помоћу којих се обезбеђује потребан проток третиране мешавине.



Слика 10.9 Упаривачка станица са истосмерним током

Ова шема упаравања је погодна за третман термолабилних раствора (органске супстанције и прехранбени производи), јер се угушћени раствор третира на ничим притисцима, односно на нижим температурама. Пожељно је да раствор на улазу у

први степен упаривачке станице буде догрејан до температуре кључања. За те сврхе се користи секундарна пара и кондензат из последњег степена упаривачке станице, као и екстра пара и кондензат из осталих степена. Често се финално догревање почетног раствора обавља помоћу свеже (примарне) паре. Загревање сировине до температуре кључања на улазу у упаривачку станицу има свог економског оправдања јер је јединична цена загрејача обично знатно нижа од јединичне цене упаривача, где би се иначе вршило догревање почетног раствора у случају да он није загрејан на температуру кључања.

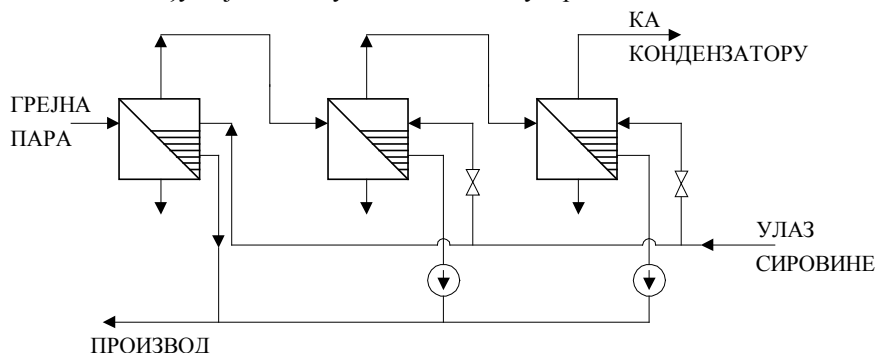
Због једноставне регулације самог постројења као и због осталих добрих страна које су напред изнете ова шема упаравања се најшће се користи у пракси.

Недостатак ове шеме упаравања је у томе што је за исту укупну грејну површину упаривачке станице најмања количина размењене топлоте, а самим тим и најмањи капацитет постројења у односу на све остале шеме упаравања (слично поређењу рекуперативних размењивача топлоте са истосмерним, супротносмерним и комбинованом струјањем флуида).

10.4.2. Упаривачке станице са супротносмерним током

У упаривачким станицама са супротносмерним током се сировина доводи у последњи степен станице (део система где је најнижи притисак), па се помоћу пумпи пребацује у суседне степене у којима влада виши притисак (слика 10.10).

Струјање раствора према овој технолошкој шеми се остварује помоћу пумпи које се налазе између појединих суседних степена упаривачке станице.



Слика 10.10 Упаривачка станица са супротносмерним током

С обзиром да је у последњем степену упаривачке станице најнижи притисак у систему (а то значи да је и најнижа температура кључања раствора) следи да није потребно претходно догревање раствора испред упаривачке станице, односно да је економичнија потрошња топлоте у односу на претходну технолошку шему.

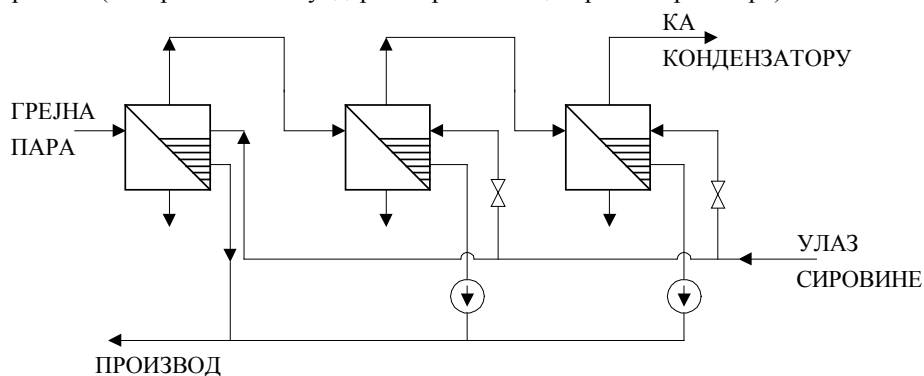
Овај начин упаравања се користи за растворе чија вискозност расте веома брзо са порастом концентрације растворка у мешавини, као и за упаравање раствора који имају велику термодинамичку температурску депресију, односно високу температуру кључања.

Капацитет упаривачке станице са супротносмерним током је већи од капацитета станице са истосмерним током за исту укупну грејну површину система, што нарочито долази до изражаја при упаравању релативно вискозних раствора.

Основни недостатак ове технолошке шеме лежи у чињеници да није погодна за третман термолабилних раствора.

10.4.3. Упаривачке станице са паралелним током

Упаривачка станица са паралелним током је према начину рада слична једноступеном упаравању, уз коришћење повољних топлотних ефеката вишеступеног упаравања (искоришћење секундарне паре за концентровање раствора).



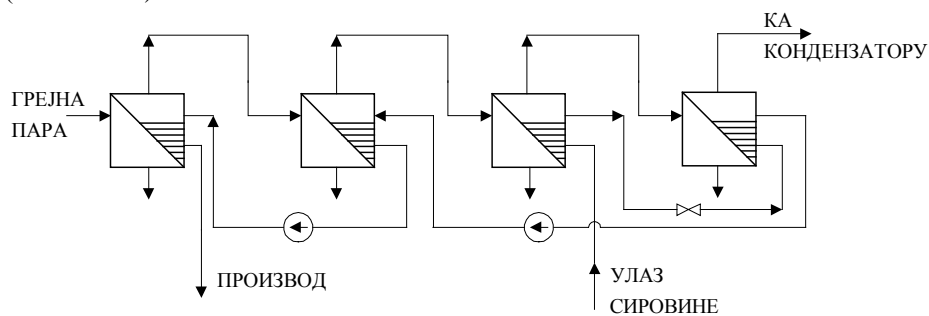
Слика 10.11 Упаривачка станица са паралелним током

Наиме, у сваки степен упаривачке станице доводи се сировина која се упарава до крајње концентрације (слика 10.11).

Ова шема упаравања се користи за третирање раствора који су склони кристализацији.

10.4.4. Упаривачке станице са комбинованим током

Сировина се уводи у неки од степена који није ни први ни последњи. На тај начин се избегавају неке од пумпи које обезбеђују струјање раствора из степена у степен а омогућује се третирање концентрованог раствора на високим температурама (слика 10.12).



Слика 10.12 Упаривачка станица са комбинованим током

Користи се за растворе већег вискозитета, као и за растворе који су склони кристализацији.