



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI
Přírodovědecká fakulta
Katedra fyzikální chemie

ZÁKLADY CHEMICKÝCH TECHNOLOGIÍ

Jiří Kolínek

Olomouc, 2013

OBSAH

ÚVOD

1. ZÁKLADNÍ POJMY	1
1.1. Chemické inženýrství jako nástroj převodu chemického návrhu do chemické technologie	1
1.2. Základy bilancování. Bilance hmoty a energie	2
1.3. Materiálová bilance	5
1.4. Bilance entalpie	7
2. HYDROMECHANICKÉ PROCESY, DOPRAVA KAPALIN	12
2.1. Hydrostatika	12
2.2. Doprava kapalin	15
3. FILTRACE	20
4. MÍSENÍ, MÍCHÁNÍ	28
5. SDÍLENÍ TEPLA	35
5.1. Základní pojmy	35
5.2. Mechanismy sdílení tepla	35
6. VÝMĚNÍKY TEPLA	42
6.1. Typy výměníků tepla a jejich konstrukce	42
6.2. Odparky	48
7. DESTILACE A REKTIFIKACE	51
8. EXTAKCE, SUŠENÍ	59
8.1. Extrakce	59
8.2. Sušení	65
9. MEMBRÁNOVÉ PROCESY	73
10. CHEMICKÉ REAKTORY	80
11. MECHANICKÉ OPERACE	86
11.1. Mletí	86
11.2. Sítování	87
12. ZÁKLADY „SPRÁVNÉ VÝROBNÍ PRAXE“, POŽADAVKY NA VÝBĚR ZAŘÍZENÍ PRO PRODUKCI LÉČIVÝCH LÁTEK	89

ÚVOD

Soubor přednášek ZÁKLADY CHEMICKÝCH TECHNOLOGIÍ si klade za cíl seznámit studenty se základními jednotkovými operacemi a zařízeními v chemických technologiích, zaměřeno na výrobu léčivých látek. Stručně budou vysvětleny zásady Správné výrobní praxe. Ve vybraných případech bude doplněno ilustrativními příklady výpočtů.

Jednotlivé kapitoly jsou zaměřeny spíše na praktické aplikace než na teoretické základy chemického inženýrství. Teoretické základy si mohou zájemci doplnit v odborné literatuře. Pro tento kurz se doporučují skripta VŠCHT Praha *Chemické inženýrství I, autotří Schreiberová Lenka a kol.* dostupná v **elektronické** formě na <http://vydavatelstvi.vscht.cz/katalog/eprodukce/>.

Poznatky z přednášek budou doplněny exkurzí do výrobního závodu, kde si studenti prohlédnou jednotlivé typy výrobních zařízení.

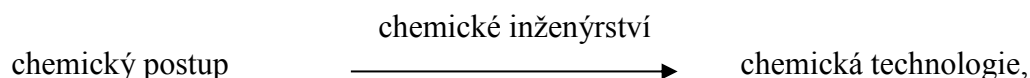
POZNÁMKY

- 1) *Texty jsou postupně aktualizovány podle nových trendů ve vývoji nových technologií a inovací ve výrobních zařízeních.*
- 2) *Kontakt:*
Ing. Jiří Kolínek, FARMAK a.s.
mobil 723 352 039
e-mail: kolinek@farmak.cz, resp. kolinkovi.last0061ny@seznam.cz.

1. ZÁKLADNÍ POJMY

1.1. Chemické inženýrství jako nástroj převodu chemického návrhu do chemické technologie

Vztah chemická technologie- chemické inženýrství se dá se znázornit následujícím schématem



kteřé můžeme interpretovat následovně: chemické inženýrství poskytuje chemikům nástroje k převedení chemického postupu z laboratoře do provozního měřítka.

Nebo jinak:

chemická technologie: konkrétní postup, co je zvláštní, specifické,

chemické inženýrství: zamýšlí se, co je společné, co se dá zevšeobecnit,

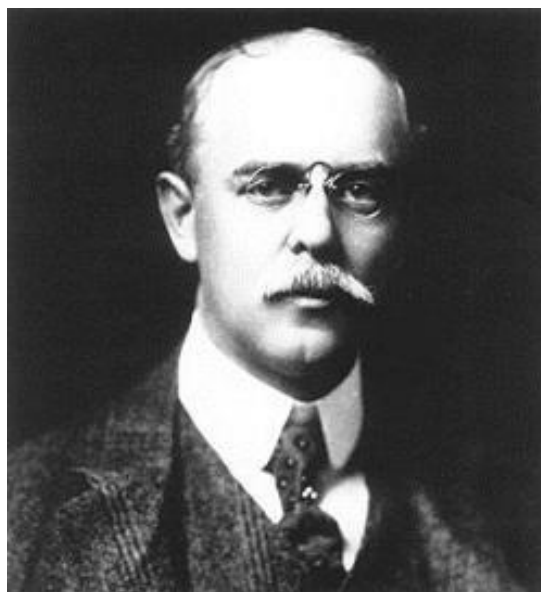
chemické inženýrství – poskytuje technologům stavebnici, utříděné poznatky do celků –
– nazývaných *jednotkové operace*.

Pojem jednotkové operace zavedl americký inženýr Artur D. Little v r. 1915.

Američtí chemici William H. Walker, Warren K. Lewis (vyobrazení na Obrázek 1) poté definovali chemické inženýrství jako samostatný obor.



William H. Walker



Warren K. Lewis

Obrázek 1. Američtí chemici W. H. Walker a W. K. Lewis (převzato z www.chemheritage.org).

Příklad: vztah chemický technolog a chemický inženýr

- Chemický problém:

Po proběhnutí chemické reakce je potřeba reakční směs co nejrychleji zneutralizovat, aby se zabránilo nežádoucím následným reakcím: Po neutralizaci je potřeba rozdělit dvoufázovou směs.

- Řešení:
 - spádová technologie
tradiční: míchaný reaktor, reaktor na dělení fází
nový prvek: reaktor, statický směšovač, reaktor na dělení fází.
 - vertikální technologie
tradiční: míchaný reaktor, přetlačení do dělicího reaktoru,
nový prvek: použije se odstředivé čerpadlo na přečerpání RS, čerpadlo se využije jako směšovač.

- Pojmy:
 - Systémy:
Svět okolo nás – objekty, proměnné v čase, mohou měnit tvar, velikost, polohu
Fyzikální vlastnosti - látka, směs složek.
Vymezení hranic studovaného problému - systémy,
reálné hranice, myšlené hranice.

- Systémy:
 - ustálené a neustálené
 - homogenní a heterogenní
 - otevřené, uzavřené, izolované

- Procesy:
 - dělení z pohledu jednotkových operací:
 - mechanické procesy (mikronizace, mletí, drcení, třídění)
 - hydromechanické procesy (proudění a doprava tekutin, filtrace, míchání usazování, fluidace),
 - tepelné procesy (např. výměna tepla, odparky),
 - difuzní separační procesy (extrakce, sušení, destilace...),
 - chemické procesy,
 - bio-procesy.
 - s rozvojem poznání – dělení na základě společných rysů:
 - přenosové procesy (transportní)
 - přenos (sdílení) hybnosti
 - přenos (sdílení) energie
 - přenos (sdílení) hmoty
 - transformační (přeměnové) procesy:
 - chemické reakce
 - změny skupenství
 - dělení na základě průběhu v čase:
 - procesy vsádkové (diskontinuální),
 - procesy kombinované (polovsádkové),
 - procesy průtočné (kontinuální).

1.2. Základy bilancování. Bilance hmoty a energie

Bilancování je každodenní činnost, která nás provází v běžném životě.

V technické praxi můžeme bilancování označit jako „účetnictví v přírodních a technických vědách“.

Pro názornost si pomůžeme analogií s běžnou domácností:

Bilancovaná veličina	peníze
Bilanční systém	bankovní účet
Bilanční období	měsíc

počáteční stav účtu	+	součet vkladů	+	úrok	=	konečný stav účtu	+	součet výběrů	+	součet poplatků
---------------------	---	---------------	---	------	---	-------------------	---	---------------	---	-----------------

V technické praxi si musíme na začátku odpovědí tři otázky definovat „mantinely“ bilancování:

bilancovanou veličinu „**CO?**“
 hranice bilancovaného systému „**KDE?**“
 časový úsek bilance – bilanční období „**KDY?**“

V dalším si odpovíme na jednotlivé otázky podrobněji:

„CO?“ Bilancované veličiny

Bilancovat můžeme veličiny, které označujeme jako *extenzivní*. Opakem jsou veličiny označované jako *intenzivní*.

V tabulce jsou uvedeny příklady veličin, které lze resp. nelze bilancovat.

(hodnota závisí na velikosti systému)	(hodnota nezávisí na velikosti systému)
ANO	NE
<i>Extenzivní</i>	<i>Intenzivní</i>
látkové množství / složky	měrné teplo
hybnost (m·v)	barva
Energie	tvrdost

Příklad jednoduché bilance:

Smícháme-li 41,7 kg kyseliny sírové hm. koncentrace 96 % a 58,3 kg vody, získáme 100 kg zředěné kyseliny sírové koncentrace 40 % hm.

Příklad „absurdní bilance“:

Smícháme-li x kg kapaliny o teplotě 50 °C a y kg kapaliny o teplotě 80 °C, nedostaneme z kg kapaliny o teplotě 130 °C (50 °C + 80 °C).

Teplota je intenzivní veličina. (Informaci o výsledné teplotě můžeme získat bilancí entalpie, ne přímo bilancí teploty).

„KDE?“ Oblast bilance – bilanční systém

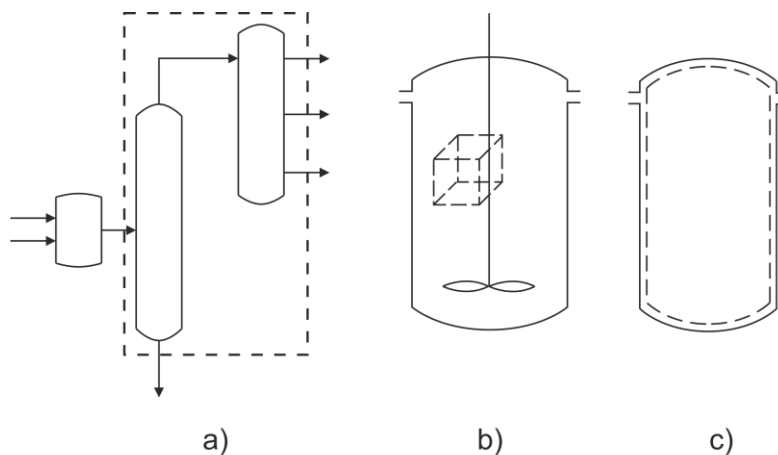
Bilancujeme ve vymezeném prostoru, který se označuje jako bilanční systém (Obrázek 2). Bilanční systém vytvoříme tak, že část prostoru vymezíme hranicemi bilančního systému. Vymezená část prostoru obsahuje prostor, ve kterém probíhá sledovaný proces (technologická linka, soubor aparátů) nebo jeho část (jednotlivé aparáty, resp. jejich část). Hranice, které

vymezují bilanční systém, mohou být reálné nebo myšlené. Část prostoru aparátu, který vymežíme pomyslnou hranicí, označujeme jako diferenciální systém.

Přes hranice systému vstupují, resp. vystupují bilancované veličiny jako vstupní resp. výstupní proudy. Z pohledu „propustnosti“ hranic systému rozlišujeme:

- *uzavřený systém*, nevyměňuje s okolím hmotu,
- *izolovaný systém*, nevyměňuje s okolím hmotu ani energii.

Příklady bilančních systémů:

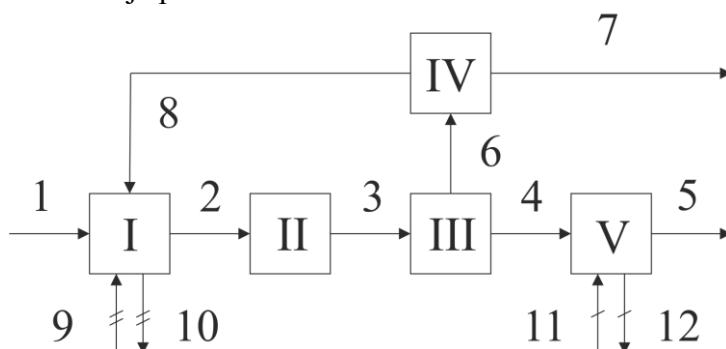


- a) soustava zařízení, otevřený systém, pomyslná hranice vymezuje dva aparáty,
 b) pomyslná hranice vymezuje diferenciální objem,
 c) reálná hranice systému shodná se stěnou aparátu.

Obrázek 2. Bilanční systémy.

Pro přehlednost volíme pro znázornění bilancovaného systému *blokové schéma (flow sheet)* – viz Obrázek 3. V něm *uzly* (římské číslice) představují jednotlivé aparáty (nebo skupiny aparátů), jednotlivé uzly jsou propojeny *proudy* (arabské číslice). Při bilancování používáme dva typy proudů: *reálné* a *fiktivní*. Reálné proudy představují jednotlivé materiálové (látkové) vstupy a výstupy do bilancovaného systému. Pomocí fiktivních proudů řešíme systémy s chemickou reakcí, vznik produktů chemickou reakcí znázorníme vstupním fiktivním proudem, zánik složek (reaktantů) znázorníme výstupním fiktivním proudem.

Na následujícím Obrázek 3 je příklad blokového schématu:



Uzly: I - mísič, II - reaktor, III - separátor, IV - dělič, V - zásobník.

Proudy: 1 - surovina, 2 - vstup reakční směsi do reaktoru, 3 - výstup reakční směsi z reaktoru, 5 - výstup ze zásobníku, výstup ze separátoru ochuzený o produkty, 7 - odpad, 8 - vratný proud (recykl), 9 - fiktivní proud reaktantů, 10 - fiktivní proud produktů, 11 - konečné množství v zásobníku, 12 - počáteční množství v zásobníku.

Obrázek 3. Příklad blokového schématu.

„KDY?“ Bilanční období – časový úsek bilance

Bilanční období definované začátkem (*počáteční čas*) a koncem (*konečný čas*) bilančního období nazýváme *konečné bilanční období*. Bilancujeme za rok, měsíc, hodinu... po definovaném časovém okamžiku.

Druhým důležitým typem bilančního období je velmi krátké období dt následující za časem t . Takové období nazýváme *diferenciální bilanční období*. Tento typ bilance se používá v případech, kdy se bilancované veličiny v průběhu času v bilancovaném systému mění (neustálený proces).

Základní bilanční rovnice

- bilance za konečné bilanční období

Pro tento případ můžeme obecně bilanční rovnici formulovat takto:

$$\begin{array}{ccccccc} \textit{počáteční} & & \textit{součet} & & \textit{součet} & & \textit{konečné} \\ & + & & + & & = & \\ \textit{množství} & & \textit{vstupů} & & \textit{zdrojů} & & \textit{množství} \\ & & & & & & + \\ & & & & & & \textit{výstupů} \end{array}$$

nebo v jednodušším tvaru

$$\textit{vstup} + \textit{zdroj} = \textit{výstup} + \textit{akumulace}.$$

Poznámka:

Bilancování, materiálové resp. energetické/entalpické bilance jsou náročnou kapitolou chemického inženýrství. V tomto kurzu samozřejmě není prostor na podrobné seznámení studentů s touto problematikou.

V dalším proto budou uvedeny jen stručně základní zásady a na jednoduchých příkladech ilustrována problematika bilancování. Pokud praxe v budoucnu přivede některé studenty k potřebě se touto problematikou hlouběji zajímat, naleznou potřebné informace v odborné literatuře.

Ale základní informaci budou mít.

1.3. Materiálová bilance

Bilancované veličiny jsou buď *hmotnost* m (resp. *hmotnostní tok* \dot{m}) při *hmotnostní bilanci*, nebo *látkové množství* n (resp. *látkový – molární tok* \dot{n}) při *látkové bilanci*.

Bilancujeme *složky*, např. látky jako voda, vzduch, popel, vedlejší produkty – polymerní zbytek při destilaci... – tj. sloučeniny, jejich směsi, ionty, prvky. Volba složek v bilančním systému je velmi důležitá, volíme po analýze problému, podle úrovně znalostí.

Podrobnější rozbor je nad úrovní tohoto textu.

Důležitou otázkou je volba vyjádření složení směsí, obvykle se používá vyjádření pomocí
- *hmotnostních zlomků a hmotnostních procent*

$$w_i = \frac{m_i}{m}; \quad m = \sum_{i=1}^{N_s} m_i; \quad \sum_{i=1}^{N_s} w_i = 1. \quad (1)$$

(hmotnostní procento = hm. zlomek w_i x 100)

- molárních zlomků a molárních procent

$$x_i = \frac{n_i}{n}; \quad n = \sum_{i=1}^{N_s} n_i; \quad \sum_{i=1}^{N_s} x_i = 1. \quad (2)$$

(molární procento = mol. zlomek n_i x 100)

Doporučený postup při materiálové bilanci

1. Nakreslíme bilanční schéma, ve kterém se označí uzly (římskými číslicemi) a proudy arabskými číslicemi).
2. V případě, že se jedná o systém s chemickou reakcí, zapíše se stechiometrické rovnice a bilanční schéma se doplní o dvojici fiktivních proudů pro každou uvažovanou reakci.
3. Definují se složky (složkou může být, viz výše, i látka z chemického hlediska ne přesně definovaná – popel, destilační zbytek...)
4. Rozhodneme, zda se bude bilancovat hmotnost nebo látkové množství.
5. Přepočítají se vstupní údaje na jednotné veličiny (hmotnostní, látkové) a v případě bilance s chemickou reakcí se vyčíslí složení fiktivních proudů.
6. Vyplní se *matice zadání* – přehledná tabulka všech údajů, i nulových. Neznámé veličiny se vepíše příslušnými symboly. Pokud není zadáno celkové množství některého proudu nebo množství složky, zvolí se *základ výpočtu*, tj. množství vybraného proudu.
7. Spočítáme počet neznámých a porovnáme, zda máme dostatečný počet rovnic (bilanční rovnice + dodatečné vztahy). Dodatečné vztahy mohou být např. suma hmotnostních/molárních zlomků je rovný 1.

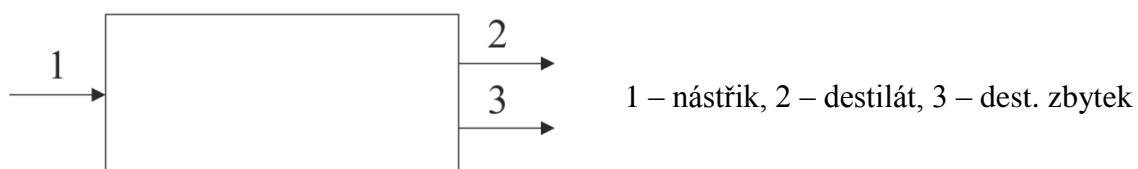
Postup bude ilustrován na jednoduchých příkladech:

1. **Příklad:** bilance systému bez chemické reakce
2. **Příklad:** bilance s chemickou reakcí

Příklad 1:

V destilačním zařízení se zpracovalo 10 kmol nástřiku obsahujícího 55 mol % látky A a 45 mol % Látky B. Získalo se 5 kmol destilátu složení 90 mol % látky A. Jaké je složení a množství dest. zbytku?

Bilanční schéma:



Máme 1 uzel, 3 proudy, 2 složky (A, B)

Matice zadání:

n [kmol]	1	2	3
	10	5	n_3
x_A	0,55	0,90	$x_{A,3}$
x_B	0,45	0,10	$x_{B,3}$

Rovnice:

1) celk. bilance $n_1 = n_2 + n_3$

2) bilance sl. A $n_1 x_{A,1} = n_2 x_{A,2} + n_3 x_{A,3}$

3) bilance sl. B $n_1 x_{B,1} = n_2 x_{B,2} + n_3 x_{B,3}$

Rovnice nejsou nezávislé (2. + 3. = 1.)

Máme 3 neznámé: $x_{A,3}$, $x_{B,3}$, n_3 .

Potřebujeme ještě jednu rovnici

4) $x_{A,3} + x_{B,3} = 1$

Řešíme tři nezávislé rovnice (1., 2., 4.)

1) $10 = 5 + n_3$; $n_3 = 5$ kmol

2) $10 \cdot 0,55 = 5 \cdot 0,90 + 5 \cdot x_{A,3}$; $x_{A,3} = \frac{10 \cdot 0,55 - 5 \cdot 0,90}{5} = 0,20$

3) $x_{B,3} = 1 - x_{A,3}$; $x_{B,3} = 0,80$

Rovnici 3) můžeme použít pro kontrolu:

$$10 \cdot 0,55 = 5 \cdot 0,90 + 5 \cdot 0,20$$

Látkové množství destilátu je 5 kmol, složení 20 mol % látky A a 80 mol % látky B.

1.4. Bilance entalpie

Dodávání nebo odebírání tepla v chemicko-technologických procesech je základní operace a zároveň je tato operace z ekonomického pohledu nejnákladnější. Proto je jí věnována značná pozornost a tvoří náplň disciplíny *bilance entalpie*.

Jaké jsou základní otázky? Např.: kolik tepla je do systému dodat/odebrat, abychom zajistili požadovanou teplotu, požadované skupenství, nebo jak se změní stav systému po dodání/odebrání určitého množství tepla.

Základní pojmy

V následujících řádcích budou uvedeny poznatky, které by studenti měli mít z předcházejícího studia fyziky a fyzikální chemie.

Energie, které se projevují v procesních technologiích, jsou:

- *Makroskopická mechanická energie*, různé formy

Energie potenciální

Energie kinetická

Energie tlaková

Vzájemnými vztahy /přeměnami makroskopických energií se zabývají obory, jako je mechanika, resp. hydrodynamika.

- *Mikroskopická energie* (nahodilý mikroskopický pohyb molekul, vzájemné působení mezi molekulami, vazby mezi atomy v molekulách...). U této formy energie neumíme určit absolutní hodnotu, dovedeme popsat změnu této energie v tělese konečných rozměrů se změnou stavu a podmínek (teplota, tlak, složení...).

Procesy při kterých dochází ke změnám mikroskopické energie, tepelné procesy, se projeví nejen změnou teploty systému, ale také změnou tlaku a objemu. Tyto změny systému jsou na sobě závislé, označují se jako *stavové chování*. Když budeme dále pokračovat v ožívování znalostí z fyzikální chemie, dojdeme k tzv. *první větě termodynamické*.

Ta definuje stavovou funkci *vnitřní energii* U a její vztah k teple Q a práci W v uzavřeném systému.

Matematickou formulaci 1. věty termodynamické můžeme zapsat jako

$$dU = dQ + dV, \quad (3)$$

dU je změna vnitřní energie systému, dQ je teplo dodané do systému, dW je práce vykonaná okolím na systému.

Pro účely bilancování se zavádí jiná stavová veličina, *entalpie* H vztahem

$$H = U + pV. \quad (4)$$

Pro izobarické systémy, které se v praktických systémech vyskytují nejčastěji, dosazením do vztahu pro 1. větu termodynamickou dostaneme vztah

$$dH = dQ, \quad (5)$$

který nám vyjadřuje, že přírůstek entalpie dH je roven množství tepla dQ , které přešlo do systému z okolí.

Integrací přes konečné časové období získáme bilanční rovnici pro bilanci entalpie, platí pro uzavřený, izobarický systém

$$H_{kon} - H_{poč} = Q \text{ (konečné množství)} - \text{(počáteční množství)} = (\text{vstup}), \quad (6)$$

kde H_{kon} , resp. $H_{poč}$ je entalpie systému na konci resp. na počátku bilančního období a Q je celkové množství tepla, které do systému vstoupilo za bilanční období z okolí.

Platnost rovnice: uzavřený izobarický bilanční systém a konečné bilanční období.

Bilance entalpie otevřeného systému: (otevřený bilanční systém/uzel – diskrétní vstupy a výstupy – proudy)

$$\text{poč. } H + \text{součet vstupů } H + \text{vstup } Q + \text{zdroj } Q = \text{součet výstupů } H + \text{konečná } H \quad (7)$$

Vstupy a výstupy entalpie jsou představovány hmotnými proudy látek s tepelným obsahem vstupujícími/vystupujícími do/ze systému. Počáteční a konečnou entalpii lze chápat jako fiktivní proudy.

Zdroj tepla: např. disipace mech.

Pro praktické provedení bilance entalpie je potřeba umět entalpii jednotlivých proudů vyčíslit. Výpočet měrné resp. molární entalpie, volba referenční teploty, entalpie skupenských změn,... je problematika fyzikální chemie a podrobný výklad této problematiky přesahuje rozsah tohoto kurzu.

Studenti musí zapátrat ve svých mozkových závitech a oživit si znalosti z kurzů fyzikální chemie. Případně sáhnout po odborné literatuře.

Provedení entalpických bilancí bude ilustrováno na jednoduchých příkladech:

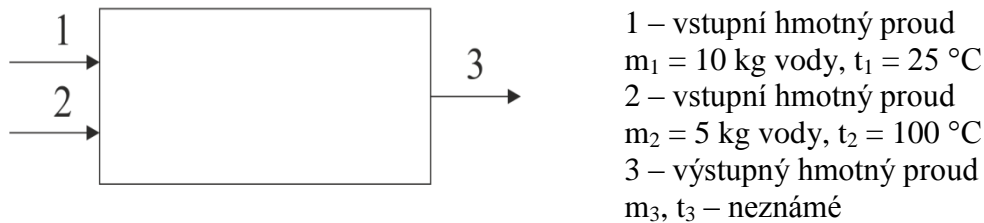
Příklad 1: bilance jednoduchého mísiče

Příklad 2: bilance se zdrojem tepla – varná konvice.

Příklad 1:

Zadání: V jednoduchém mísiči se smíchalo 10 kg vody o teplotě 25 °C a 5 kg vody o teplotě 100 °C. Jaká je výsledná teplota?

Bilanční schéma:



Bilance hmotnosti:

$$m_3 = m_1 + m_2 = 10 + 5 = 15 \text{ kg}$$

Bilance entalpie: bilance za konečné bilanční období,

$$H_1 = H_2 + H_3$$

pomocí měrných entalpií:

$$m_1 h_1 + m_2 h_2 = m_3 h_3$$

ve všech proudech 1 složka – voda. Její měrná tepelná kapacita je c_p – předpokládáme, že je v daném teplotním intervalu konstantní.

$$m_1 c_p (t_1 - t_{ref}) + m_2 c_p (t_2 - t_{ref}) = m_3 c_p (t_3 - t_{ref})$$

Úpravy: c_p můžeme vykrátit; vhodně zvolíme $t_{ref} = 25$ °C

$$m_2 c_p (t_2 - t_{ref}) = m_3 c_p (t_3 - t_{ref})$$

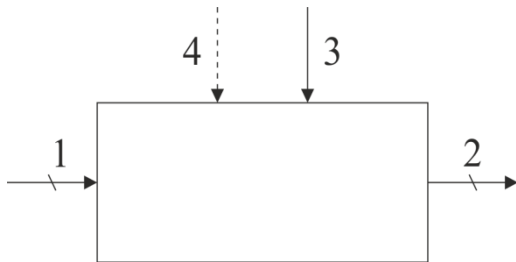
$$t_3 = \frac{m_2 (t_2 - t_{ref})}{m_3} + t_{ref} = \frac{5(100 - 25)}{15} + 25 = 50 \text{ °C}$$

Výsledná teplota je 50 °C.

Příklad 2:

Varná konvice byla naplněna 1,7 l vody o teplotě 15 °C. Za jak dlouho se voda přivede k varu, výkon el. konvice je 1 kW. A za jak dlouho se odpaří 50 % původní hmotnosti vody. Předpokládáme běžný atmosférický tlak, dále že tepelná kapacita prázdné konvice a ztráty tepla do okolí jsou zanedbatelné. Měrná tepelná kapacita vody $c_p = 4,18 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ a měrné výparné teplo vody při teplotě 100 °C $\Delta h_{\text{výp}} = 2257 \text{ kJ kg}^{-1}$.

Bilanční schéma:



- 1) fiktivní hm. proud – počáteční množství vody
- 2) fiktivní hm. proud – konečné množství vody
- 3) hm. proud – množství odpařené vody
- 4) nehmotný proud – dodané teplo

Řešíme entalpickou bilanci za konečné bil. období. V první části počítáme množství tepla potřebné k odpaření 50 % vody. Podělením spočtené hodnoty potřebného množství tepla příkonem dostaneme časový údaj.

Rovnice hm. a ent. bilance:

$$m_1 = m_2 + m_3$$

$$H_1 + Q_4 = H_2 + H_3$$

- Výpočet doby potřebné k dosažení varu:

Je zadáno:

$$m_3 = 0, m_1 = m_2 = m = 1,7 \text{ kg}, t_1 = 15 \text{ °C}, t_2 = 100 \text{ °C}.$$

Entalpická bilance:

$$H_1 + Q_4 = H_2$$

$$m c_p (t_1 - t_{ref}) + Q_4 = m c_p (t_2 - t_{ref})$$

$$Q_4 = m c_p (t_2 - t_1) = 1,7 \cdot 4,18 \cdot (100 - 15) = 604,0 \text{ kJ}$$

Potřebné množství tepla je rovno součinu příkonu a času.

$$Q_4 = P \cdot \tau$$

$$\tau = \frac{604,0}{1} = 604,0 \text{ s}.$$

- Výpočet dobý potřebné k odpaření 50 % vody:

Zadání:

$$m_1 = 1,7 \text{ kg}, m_2 = 0,85 \text{ kg}, m_3 = 0,85 \text{ kg}, t_2 = t_2 = 100 \text{ °C}.$$

Ref. stav: voda – kapalina, $t_{ref} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$.

$$h_1 = c_p(t_1 - t_{ref}) = 4,18 \cdot (25 - 25) = 0 \text{ kJ kg}^{-1}$$

$$h_2 = c_p(t_2 - t_{ref}) = 4,18 \cdot (100 - 25) = 313,5 \text{ kJ kg}^{-1}$$

$$h_3 = c_p(t_3 - t_{ref}) + \Delta h_{vyp} = 4,18 \cdot (100 - 25) + 2257 = 2570,5 \text{ kJ kg}^{-1}$$

$$Q_4 = H_2 + H_3 - H_1 = m_2 h_2 + m_3 h_3 - m_1 h_1 = 0,85 \cdot 313,5 + 0,85 \cdot 2570,5 - 1,7 \cdot 0 \\ = 2451,4 \text{ kJ}$$

$$\tau = \frac{2451,4}{1} = 2451,4 \text{ s}$$

Voda se k varu zahřeje za 604,0 s a za 2451,4 s se odpaří poloviční množství původního obsahu konvice.

2. HYDROMECHANICKÉ PROCESY, DOPRAVA KAPALIN

Voda hrála v našem životě vždy důležitou roli. Proto ji člověk se zájmem pozoroval a to se přeměnilo na snahu porozumět a popsat její chování, později chování obecně kapalin. V chemickém inženýrství se tím zabývá část *hydromechanické procesy*.

Zopakujeme si některé základní pojmy:

Pod pojmem tekutiny rozumíme

- kapaliny
- plyny
- páry

Základní charakteristickou vlastností, kterou se odlišují kapaliny od plynů a par je větší vzdálenost mezi molekulami u plynů a par a z toho plyne větší *stlačitelnost* plynů a par.

Důležitou látkovou vlastností tekutin je *viskozita*, která se projevuje jako míra odporu proti smykovému napětí, které je projevem působení smykových sil na tekutinu. Projevem tohoto působení je, že se kapalina dá do pohybu.

Síly obecně působící v tekutinách:

- síly objemové (hmotnostní), úměrné objemu / hmotnosti. Např. gravitační, odstředivá, magnetická...
- síly plošné, působí na plochy – reálné nebo smyšlené (fázové rozhraní, stěna trubky...) rozhraní mezi vrstvami tekutiny.

Plošná síla se obecně chová jako vektor, má velikost a směr. Zjednodušeně se dá říct, že normálová složka (kolmá k ploše) působí jako *tlaková síla*, tečné složky (kolmé k normálové) působí jako *síly smykové*.

Podrobnější popis této problematiky je nad rámec tohoto kurzu. Podrobnější informace naleznou zájemci např. v učebnicích fyziky, v části věnované mechanice tekutin (hydromechanice)

2.1. Hydrostatika

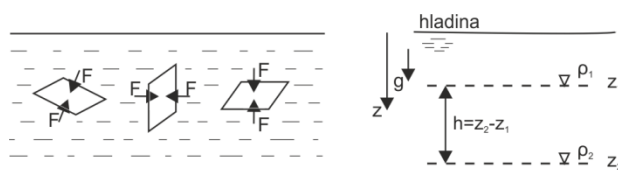
Tekutina v klidu, to znamená, že neexistují smykové síly.

Základní zákon hydrostatiky nám pak říká, že napětí v kapalině je vždy kolmé na libovolnou plochu uvnitř tekutiny. Kolmá síla na jednotku plochy se označuje jako tlak p , $dF = p dA$.

Protože v nehybné tekutině se neprojevují smykové síly, v každém místě nehybné tekutiny je tlakové napětí ve všech směrech.

Zároveň však platí, že v nehybné tekutině se tlak může měnit s místem,

$$p = p(x, y, z) \quad (8)$$



Obrázek 4. V nehybné tekutině je síla působící na jednotku plochy kolmá na tuto plochu a má stejnou velikost (napravo); rozdíl tlaků je úměrný rozdílu výšek (napravo).

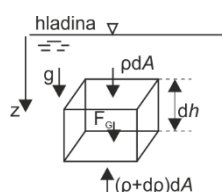
Tak pro závislost tlaku na hloubce/výšce v nehybné tekutině (viz Obrázek 4) platí:

$$p_2 = P_1 + \rho g(z_2 - z_1) = p_1 + \rho gh, \quad (9)$$

kde g = gravitační zrychlení, ρ = hustota tekutiny.

Budeme předpokládat, že tlak se mění jen s výškou h ve směru osy z . Popíšeme-li síly, které působí na těleso ponořené do tekutiny – viz Obrázek 5, dostaneme po úpravách vztah označovaný jako *základní rovnice hydrostatiky*

$$g - \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dh} = 0. \quad (10)$$



Obrázek 5. Síly působící na ponořené těleso.

Budeme-li pro jiný případ předpokládat, že hustota tekutiny ρ je pouze funkcí tlaku p , pak pro tekutinu = vzduch o konstantní teplotě T a za předpokladu platnosti rovnice ideálního plynu dostaneme tzv. *barometrickou formuli*

$$p = p_0 \exp \left[-\frac{gM}{RT} (h - h_0) \right]. \quad (11)$$

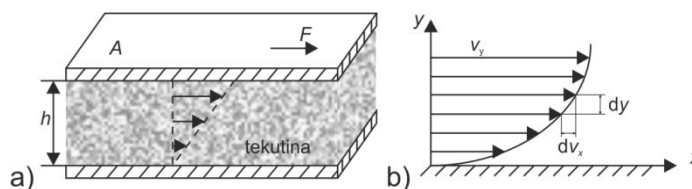
Hydrodynamika, proudění tekutin

Teoretický popis proudění tekutin je velmi složitý. Zde si ukážeme jen některé základní pojmy.

Proudění podél pevné nehybné stěny

Budeme předpokládat řadu zjednodušujících předpokladů: neuvažujeme fluktuace rychlosti (průměrná rychlost), konstantní hustota (v podstatě nestlačitelná tekutina). S těmito zjednodušeními můžeme počítat u kapalin, při proudění plynů tento předpoklad nevyhovuje.

Představme si situaci podle následujícího Obrázek 6:



Obrázek 6. Rychlostní profily v tekutině; a) lineární, b) nelineární.

Při proudění podél nehybné stěny se vytvoří rychlostní profil. Tečná rychlost (rovnoběžná s povrchem) je při povrchu pevné stěny nulová a směrem od této pevné stěny se zvětšuje. Je to způsobena působením smykové síly, tj. viskozity.

Při proudění např. v potrubí (viz předcházející Obrázek 6b), není rychlostní profil lineární.

Tento stav popisuje tzv. *Newtonův zákon*

$$\tau_{xy} = -\eta \frac{dv_x}{dy}. \quad (12)$$

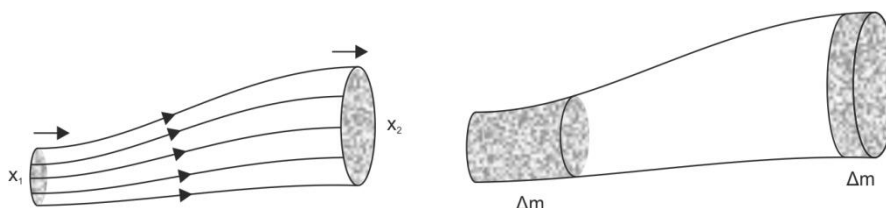
Napětí τ_{xy} je síla ve směru osy x působící na jednotku plochy kolmou na osu y . Vrstva tekutiny s vyšší rychlostí (hybností) předává hybnost vrstvě s nižší rychlostí (hybností). Tím je vysvětleno záporné znaménko v rovnici Newtonova zákona, hybnost teče z místa s vyšší hybností do místa s nižší hybností.

Podle chování rozlišujeme *newtonovské tekutiny* (voda, vzduch,...) a *nenevtonovské tekutiny* (roztoky polymerů, zubní pasta, maltové směsi,...).

Dále si uvedeme stručně základní vztahy platné pro proudění tekutin:

Rovnice kontinuity (materiálová bilance)

Vymezíme si bilanční systém zavedením pojmu *proudová trubice* jako svazek *proudnic*. Proudnic je myšlená čára (křivka), jejíž tečna je v každém bodě rovnoběžná s vektorem rychlosti v tomto bodě (viz následující schéma na Obrázek 7).



Obrázek 7. Pohyb tekutiny v proudové trubici.

Provedeme jednoduchou materiálovou bilanci, v ustáleném stavu musí platit, že hmotnost, která vstoupí do proudové trubice přes průřez S_1 , se musí rovnat hmotnosti, která z ní vystupuje přes průřez S_2 . Za předpokladu konstantní hustoty dostaneme základní *rovnici kontinuity*

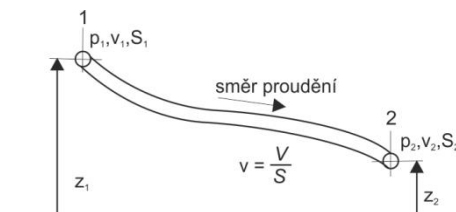
$$S_1 v_1 = S_2 v_2, \quad (13)$$

podle které je rychlost proudění nepřímo úměrná průřezu.

Bernouliho rovnice (bilance mechanické energie)

Provedeme-li bilanci energie v systému znázorněném na následujícím Obrázek 8, dostaneme Bernoulliovu rovnici

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{1}{2} v_1^2 + g z_1 + u_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{1}{2} v_2^2 + g z_2 + u_2. \quad (14)$$



Obrázek 8. Potrubní schéma.

V inženýrské praxi musíme ještě uvažovat účinek viskozity. Zavedeme člen pro disipovanou energii, který představuje množství mechanické energie přeměněné při proudění tekutiny potrubím (modelově proudovou trubicí) působením vnitřního tření na teplo. Za určitých zjednodušujících předpokladů je disipovaná energie rovna změně vnitřní energie.

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{1}{2} v_1^2 + g z_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{1}{2} v_2^2 + g z_2 + e_{dis}. \quad (15)$$

Tento tvar Bernoulliho rovnice se používá při výpočtech proudění v potrubí.

Velikost měrné disipované energie je při proudění přímým potrubím kruhového průřezu přímo úměrná délce potrubí L , velikosti kinetické energie a nepřímo úměrná průměru d

$$e_{dis} = \lambda \frac{L v^2}{d}. \quad (16)$$

Bezrozměrný koeficient λ se nazývá *součinitel tření*.

Určení číselné hodnoty *součinitele tření* vychází z tzv. teorie podobnosti a přesahuje rozsah tohoto kurzu. V případě potřeby si posluchač najde odpověď na tuto problematiku v odborné literatuře.

Předcházející vztah platí pro proudění v rovném potrubí. V praktických aplikacích se vyskytují v potrubních systémech různá kolena, odbočky, redukce a armatury (ventily, kohouty, šoupátka...). Označujeme je místní hydrodynamické odpory. Disipovanou energii na těchto místních hydrodynamických odporech vyjádříme pomocí *součinitele místního odporu* ζ

$$e_{dis} = \zeta \frac{v^2}{2}, \quad (17)$$

hodnoty součinitelů místního odporu pro jednotlivé místní odpory jsou tabelované.

Celková hodnota disipované energie v potrubním systému je pak rovna součtu hodnot v rovných úsecích potrubí a hodnot pro jednotlivé místní hydrodynamické odpory.

2.2. Doprava kapalin

Potřeba dopravovat kapaliny – všude kolem nás, vodovod, ropovod, technologické operace

Chemické technologie:

základní aparatura možné uspořádání:

- vertikální uspořádání, samospád – pro transport používám hydrostatickou energii, tento způsob má svá omezení (pomáháme si např. zvýšením tlaku na začátku aparátového řetězce pomocí tlakového plynu)
- horizontální uspořádání – pro transport musím dodat energii – čerpadlo
- často kombinace

Pro transport spalin je potřeba dodat energii. V případě samospádu je to rozdíl potenciální energie ve výchozím a konečném místě.

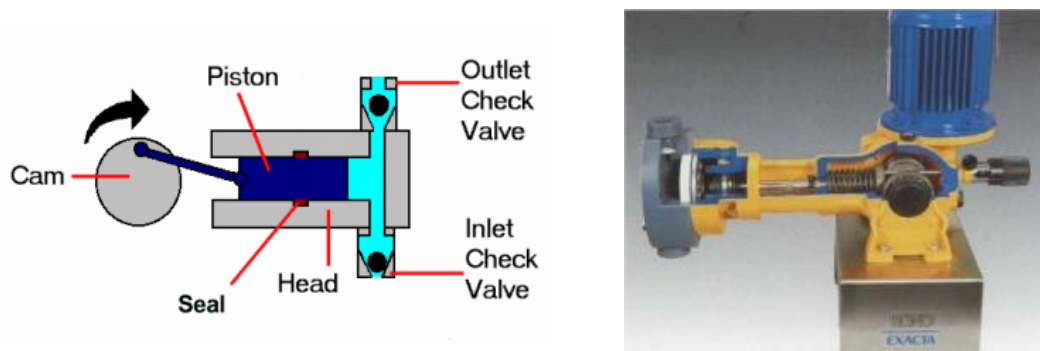
V případě, že tato energie není dostatečná, nebo potřebujeme dopravit kapalinu z nižšího na vyšší místo, musíme energii dodat, prostřednictvím čerpadla.

Základní dělení čerpadel:

a) *Hydrostatická čerpadla:*

Přeměna mechanické energie na tlak přímo na pracovním prvku čerpadla – pístové, membránové, zubové, lamelové, hadicové, vřetenové.

Pístové čerpadlo



Obrázek 9. Pístová čerpadla (převzato z <http://automatizace.hw.cz>).

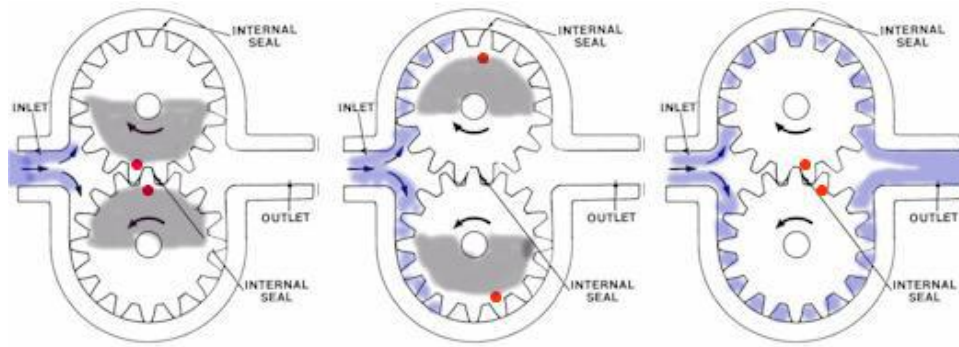
Princip funkce pístového čerpadla je zřejmý ze schematického Obrázek 9: při pohybu pístu zprava doleva v důsledku vyvolaného podtlaku v komoře čerpadla dochází k nasání čerpané kapaliny do komory (nadvzvedne se sací ventil, uzavře se výtlačný ventil), při zpětném pohybu pístu se kapalina z komory čerpadla vytlačí.

Stejný princip – plunžrová čerpadla (konstrukční rozdíl – způsob těsnění pístu resp. plundru)

Zdvih pístu se dá nastavit – dávkovací čerpadla, množství kapaliny nasáté/vytlačené čerpadlem je přesně dané objemem komory (na Obrázek 9 je vidět stavěcí šroub zdvihu pístu)

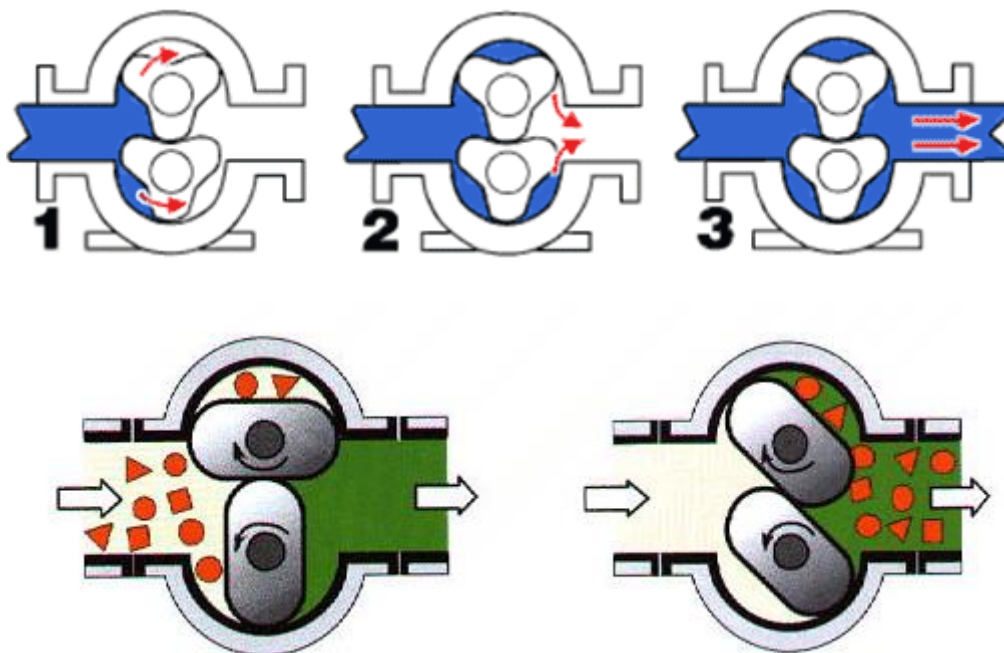
Zubové čerpadlo

Zubová čerpadla s vnějším ozubením fungují na principu dvou navzájem identických rotujících ozubených kol, jejichž ozubení na sací straně vychází ze společného záběru a proti stěnám pouzdra čerpadla vytváří prázdné kapsy. S využitím atmosférického tlaku dochází k jejich plnění médiem. V těchto kapsách dochází k transportu čerpaného média od sací části, okolo vnějšího obvodu komory, až do výtlačku čerpadla a poté se ozubená kola dostávají opět do vzájemného záběru a generují tak potřebný tlak.



Obrázek 10. Ukázky zubového čerpadel (převzato z <http://automatizace.hw.cz>).

Rotační Lobe pumpy



Obrázek 11. Ukázka principu Lobe pump (převzato z <http://automatizace.hw.cz>).

Tento druh je vhodný pro velmi obtížně čerpatelné látky téměř jakékoliv viskozity a hlavně kapalné produkty obsahující velké pevné kousky. Podobně jako zubová čerpadla s externím ozubením využívá dvou rotujících dílů, které „převázejí“ čerpaný materiál od sacího vstupu k výstupu v „komůrkách“ mezi rotujícími díly a stěnou pouzdra čerpadla.

Fakt, že Lobe pumpy nepatří do skupiny zubovek, je dáno jedním důležitým konstrukčním faktem: obě rotující části se vzájemně v žádném místě pohybu nedotýkají, i když to na obrázcích tak nevypadá. Zároveň nejsou ani v kontaktu se stěnami pouzdra čerpadla.

To má za následek důležitý praktický závěr: Lobe pumpe se jen minimálně opotřebovává, může libovolnou dobu běžet i naprázdno a lze tak s ní čerpat i plynné látky, je odolná vůči korozi a může čerpat mimo kapalných látek skoro libovolné viskozity i abrazivní a různé sypké materiály. Výstup je tlakově i průtokově stálý (nepulsující) i při měnícím se vstupním tlaku přiváděné látky. Protože „transportní komůrky“ jsou větších rozměrů než například u zubových provedení a rotory obvykle neobsahují ostré části (rohy) minimalizuje se degradace produktu. Tím se Lobe pumpy velmi hodí pro čerpání kapalných či pastovitých produktů obsahujících větší pevné kousky, které se při čerpání mají zachovat (jinak řečeno: nemají se rozmělnit). Také se velmi snadno čistí (sanitují) bez nutnosti rozebírání.

Princip rotačního Lobe čerpadla je v uzavření kapaliny v prostoru vytvořeném mezi rotorem a tělesem čerpadla. Jakmile křídlo každého rotoru projde okolo vstupního sacího otvoru, „nabere“ kapalinu či plyn a pak jej transportuje v komůrce mezi rotorem a stěnou čerpadla k výstupnímu otvoru (výtlaku), kde je pod tlakem „vystrčen“ ven. Protože části pumpy se nedotýkají ani nejsou utěsněné, je sice čerpadlo odolné proti opotřebení, ale na druhou stranu může sloužit jen pro nízkotlaké aplikace s tlakem do max. 30 barů. Na druhou stranu může poskytovat vysoký průtok i přes 4 000 litrů/min.

Hadicová čerpadla

Základní konstrukce a princip hadicových / peristaltických čerpadel je velmi jednoduchý a dá se zjednodušeně přirovnat k úkonu, který automaticky provádíte, když se snažíte rukou něco vytlačit z hadičky nebo třeba střívkou (např. vytlačit obsah jitrnice nebo paštiky zabalené v tzv. buřtíku). Prostě chytnete obal mezi prsty, prsty stisknete a tlačíte obsah pouzdra k ven. Stejně tak to funguje i zde. Pouze obal zde nahrazuje hadice čerpadla, kterou se dopravuje produkt, a tlak prstů z jedné strany tvoří pevná stěna čerpadla a z druhé strany dvě na rameni otáčející se rolny či vačkové kolo.

Napevno uchycená a do oblouku či jednoho závitu stočená hadice je pak za chodu periodicky stlačována proti stěně čerpací hlavy rotujícími rolnami či vačkovým kolem poháněnými externím motorem, které tak před sebou tlačí od sacího otvoru k výtlakovému otvoru určité množství produktu. Tento efekt vytváří v hadici vysoký podtlak, který zapřičiňuje nasání a výtlak média. Z principu funkce je také patrné, že v konstrukci čerpadla nejsou ventily či ucpávky, a že čerpané médium nepřichází do přímého kontaktu s žádnými částmi čerpadla mimo samotné hadice. Proto je tento princip ideální pro použití ve sterilním (hygienicky čistém) prostředí.

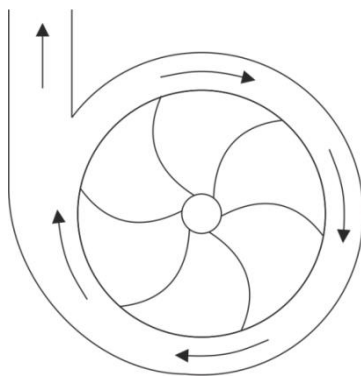
b) Hydrodynamické čerpadla

Odstředivá čerpadla

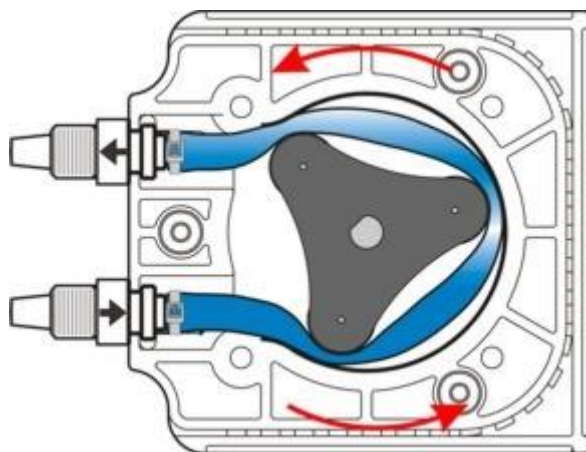
U odstředivých čerpadel je kapalina po vstupu do oběžného kola unášena lopatkami a odstředivou silou tlačena radiálně k obvodu kola. Zvyšuje se rychlost a tlak kapaliny. Na obvodu kola je největší obvodová rychlost a z toho vyplývá, že kapalina zde má největší kinetickou energii. Tuto energii kapalina získala od motoru, který pohání oběžné kolo. Z oběžného kola kapalina přechází do difuzoru a dále do spirálové skříně. V těchto částech se

rozšiřuje průtočný průřez, tím se snižuje rychlost kapaliny (rovnice kontinuity) a stoupá tlak – dle zákona zachování energie (Bernoulliho rovnice). Lopatky difuzoru usměřují proud kapaliny z oběžného kola, omezují její víření a tím se zlepšuje účinnost stroje. Proto jsou lopatky difuzoru zakřiveny tak, aby k nim byl vektor výstupní rychlosti z oběžného kola tečný. V řadě případů však difuzor není použit a kapalina z oběžného kola přechází přímo do spirálové skříně.

Podle konstrukce se odstředivá čerpadla dělí na axiální a radiální. Rozlišení je podle směru přívodu čerpané kapaliny vzhledem k ose oběžného kola.



Obrázek 12. Schéma odstředivého čerpadla.



Obrázek 13. Peristaltické čerpadlo (převzato z <http://www.cannonwater.com>).

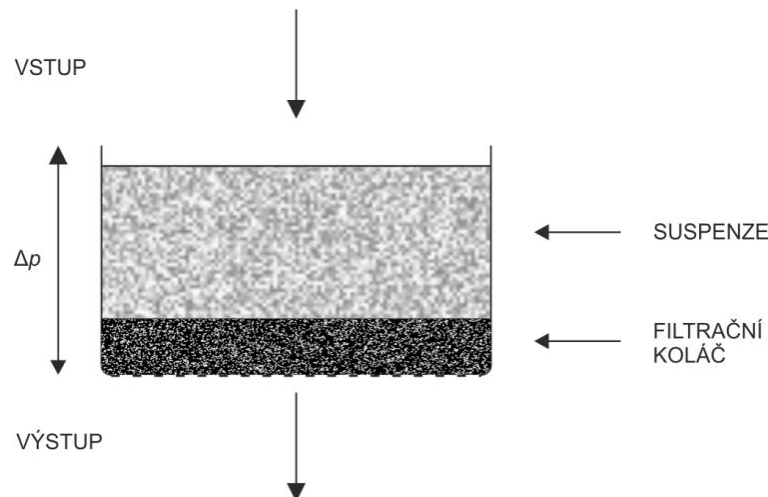
3. FILTRACE

Filtrace je jednou ze základních technologických operací, je to jedna ze základních jednotkových operací. Touto operací se oddělují pevné částice od tekutiny (směs tekutiny a pevných částic se jmenuje suspenze).

Operace filtrace se v chemických technologiích používá jednak při separaci pevného produktu od kapalin, žádaný produkt je pevná látka nebo k odstranění malého podílu tuhých částic z tekutiny, žádaný produkt je čistá tekutina (kapalina, plyn).

Obecný princip filtrace

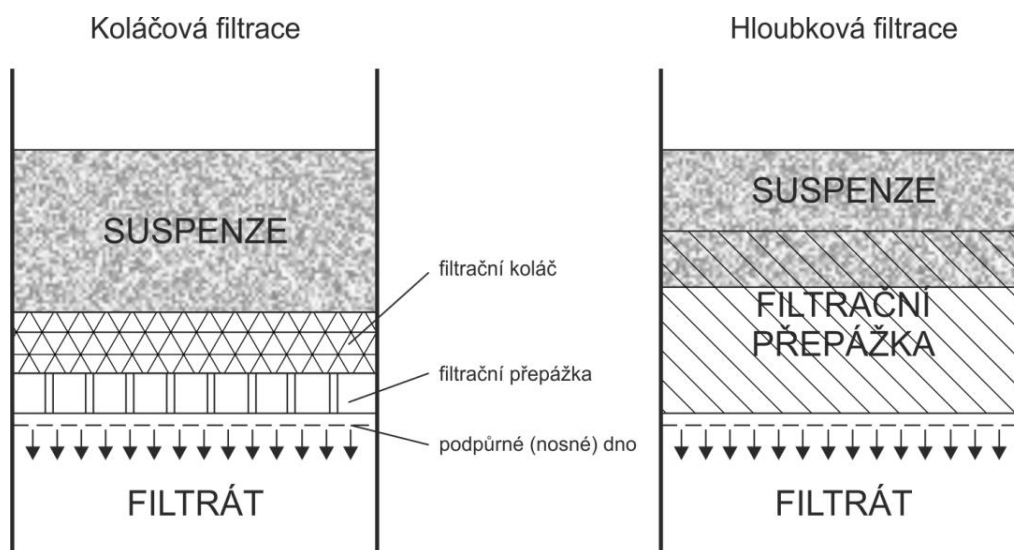
Náčrt:



Obrázek 14. Obecný princip filtrace.

Způsoby filtrace

- koláčová
- hloubková
- s křížovým tokem („cross flow“), membránové filtrace,



Obrázek 15. Porovnání koláčové a hloubkové filtrace.

Hybná síla filtrace

- tlakový rozdíl mezi horním povrchem filtračního koláče a spodním povrchem filtrační přepážky,
- = filtrační rozdíl tlaků
- nosný rošt (podpůrná deska) zpravidla vykazuje zanedbatelný hydraulický odpor

Vytváření filtračního rozdílu tlaků

- hydrostatickým tlakem
- zvyšováním tlaku nad hladinou suspenze, *tlaková filtrace*
- snižováním tlaku pod filtrační přepážkou, *vakuová filtrace*
- čerpání do filtru pomocí čerpadla
- odstředivou silou – *filtrační odstředivky*

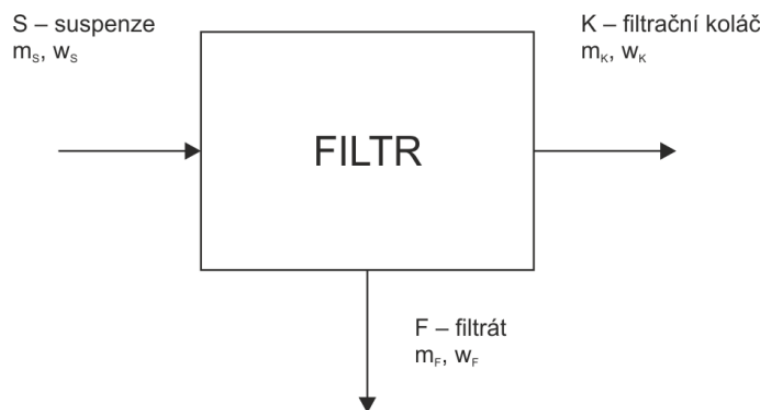
Průběh (etapy) filtračního procesu (koláčová filtrace)

1. *Vlastní filtrace* – vytváří se filtrační koláč a filtrát.
2. *Promývání filtračního koláče* promývací kapalinou, odstranění nežádoucích rozpustných složek (nečistot)
3. *Odstranění vlhkosti z koláče*. Původní nebo promývací kapalina se odstraní profouknutí vzduchem, stlačením koláče.
4. *Částečné/úplné sušení filtračního koláče* sušícím plynem
5. *Vyjmutí filtračního koláče z filtru*
6. *Příprava filtru na další filtraci* (rozebrání, čištění, výměna/vyčištění filtrační přepážky, sestavení filtru)

Filtrační přepážky

- vrstvy zrnitých materiálů (pískové filtry, filtrační hlínky, křemelina...)
- vrstvy vláknitých materiálů (skleněná, celulózová vlákna, vlákna ze syntetických materiálů...) – nanesou se na perforovanou nosnou přepážku
- papírové materiály
- porézní kompaktní materiály – řízená porozita
 - o porézní (sintrované, spékané kovy, porézní sklo – frity)
 - o keramické (desky, trubky – filtrační svíčka)
- tkaniny z přírodních nebo syntetických vláken
 - o filtrační plachetky
 - o netkané materiály (plsti z textilních, syntetických, grafitových vláken)
- perforované desky, síta – kovové a syntetické polymerní materiály s definovanou strukturou a morfologií pórů
- speciální filtrační membrány

Materiálová bilance:



Obrázek 16. Bilanční schéma filtrace.

bilanční systém – filtr

bilanční období – doba jednoho filtračního cyklu, nebo ustálený stav (kontinuální)

$$m_S = m_K + m_F \quad (18)$$

*obdobně: bilance tuhé fáze
 bilance kapaliny*

Kinetika filtrace:

rychlost filtrace = hybná síla / odpor filtru

odpor filtru = odpor filtr. koláče + odpor filtrační přepážky

filtrační koláč nestlačitelný, stlačitelný

- *filtrace při konstantním rozdílu tlaku*
- *filtrace při konstantní rychlosti*

Popis funkce: koláčová filtrace, periodicky pracující filtrační zařízení, produkt je pevná látka, filtrační koláč. Tlaková nádoba, může být opatřena duplikací pro temperaci zpracovávané suspenze. Ve spodní části je nádoba opatřena filtračním dnem, které je tvořeno nosným dnem, na které se pokládá filtrační přepážka.

Jako filtrační přepážka se používá buď textilní tkanina, kovové síto, plastové síto, slinuté (sintrované) materiály.

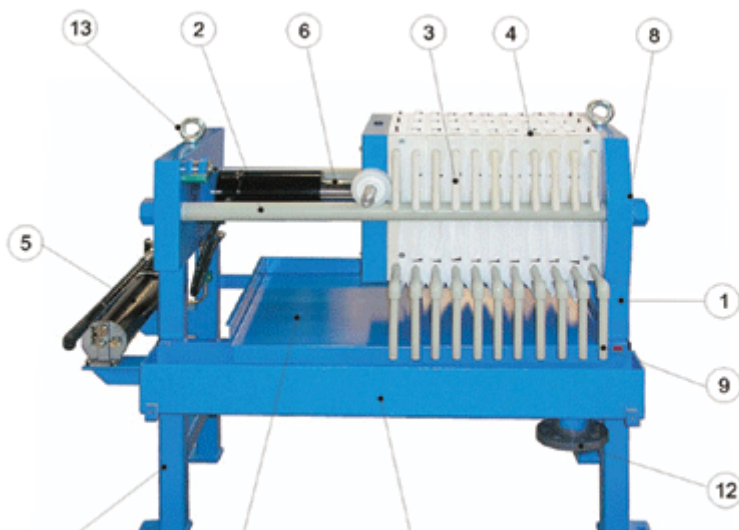
Zařízení:

Filtrační nuč, tlakový filtr:



Obrázek 17. Filtr DN250, 6 bar, Hastelloy (převzato z <http://www.vsk.cz/>).

Kalolisy:



Základní části kalolisu:

1. Rám kalolisu
2. Svorník rámu
3. Filtrační deska
4. Filtrační plachetka
5. Hydraulická pumpa
6. Hydraulický válec
7. Noha kalolisu
8. Přívod suspenze k odvodnění
9. Výstup filtrátu
10. Okapová plata
11. Žlab pro sběr filtrátu
12. Příruba pro odvod filtrátu
13. Úchyty pro manipulaci

Obrázek 18. Základní části kalolisu (převzato z <http://www.envites.cz/>).

Základní typy kalolisuů:

Rámový kalolis

Filtrační komory rámového kalolisu jsou sestaveny ze dvou typů desek: rámových a filtračních. Rám ohraničuje filtrační komoru, sousední filtrační desky s drenáží pro odvod filtrátu ji z obou stran uzavírají. Tloušťka rámové desky určuje tloušťku filtračního koláče - obvykle se pohybuje v rozmezí 10 – 50 mm. Filtrát je po průchodu plachetkou povlečenou na filtrační desce odváděn drenáží do kanálků vrtaných uvnitř desky a je vyveden ven z kalolisu. Pracovní tlak se obvykle pohybuje mezi 6 až 15 bary.



Obrázek 19. Rámový kalolis (převzato z <http://www.envites.cz/>).

Komorový kalolis

Pracovní prostor tvoří filtrační komory, vzniklé vzájemným přisunutím dvou sousedních filtračních desek. Desky mají v ploché části vybrání s drenážním systémem. Celková hloubka vybrání obou sousedních desek určuje tloušťku výsledného filtračního koláče. Ta se obvykle pohybuje v rozmezí 15 – 50 mm.

Přívod suspenze je řešen nejčastěji středovým popřípadě rohovým nátokem, přefiltrovaná kapalina je po průchodu plachetkou odváděna drenáží po povrchu desek a dále vrtanými kanálky uvnitř desky ven z kalolisu.

Pracovní tlak se pohybuje obvykle v rozmezí 6-15 bar.

Desky i plachetky jsou standardně vyrobeny z polypropylenu, podle charakteru filtrované suspenze lze zvolit i jiné materiálové provedení.



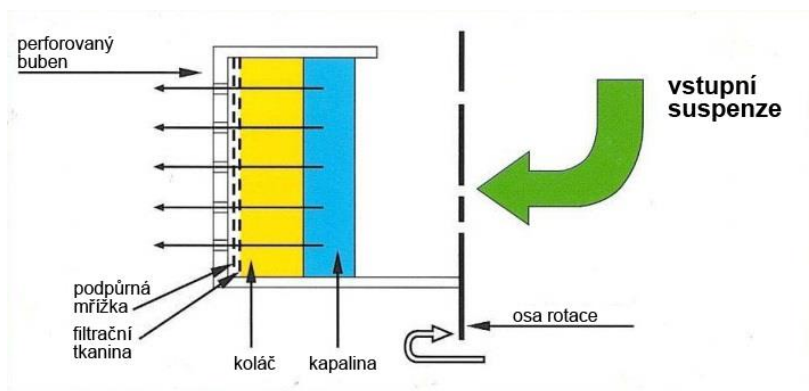
Obrázek 20. Komorový kalolis (převzato z <http://www.envites.cz/>).

Filtrační odstředivky

Zařízení používaná standardně pro izolaci produktů chemických technologií. Rozlišujeme dva základní typy filtračních odstředivek, vertikální a horizontální

Princip činnosti:

Hnací silou filtrace je odstředivá síla. Suspenze se vnáší dovnitř rotujícího bubnu, odstředivá síla vytváří tlak, který vytlačuje kapalinu skrz filtrační přepážku, pevná látka vytváří na filtrační přepážce filtrační koláč.



Obrázek 21. Odstředivá filtrace (převzato z <http://www.rousselet.cz/>).

Příklady odstředivek:



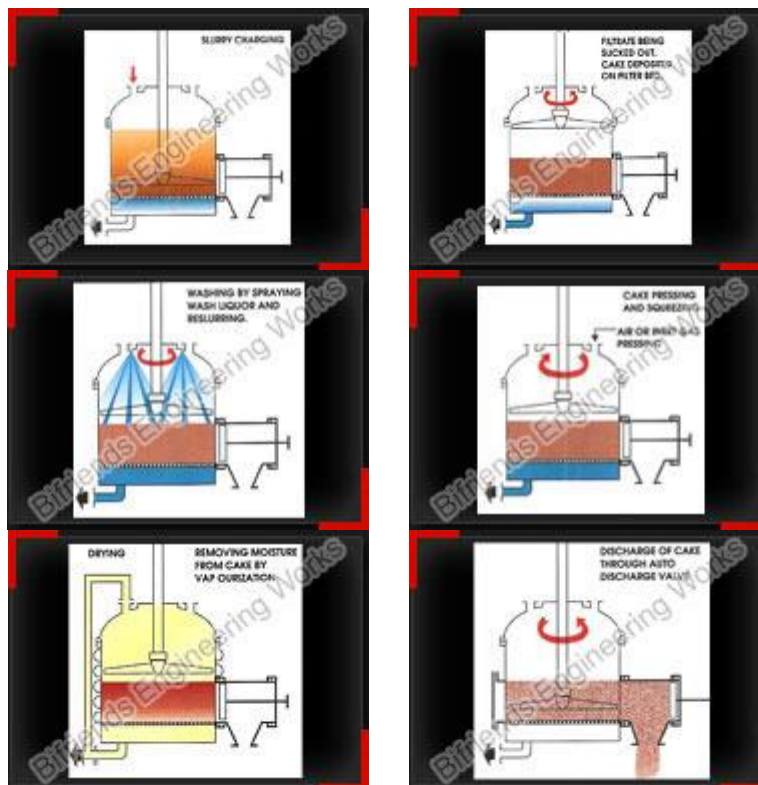
Obrázek 22. Příklad vertikální (vlevo) a horizontální odstředivky (převzato z <http://www.rousselet.cz/>).

Na Obrázek 22 je vertikální a horizontální odstředivka v provedení „pharma design“, odklápěcí lub umožňující kontrolu vyčištění, kvalitní materiál, vysoká úroveň povrchové úpravy.

Horizontální odstředivka je v provedení umožňující instalaci skrz stěnu čistého prostoru, „špinavé části“ jako pohon, ... jsou instalovány v technickém prostoru.

Speciální zařízení:

- **sušící filtr**, více operací v jednom zařízení: filtrace, promytí / vymývání, sušení (některé typy umožňují i provedení chemické reakce, rozmělnění aglomerátů produktu).



Obrázek 23. Příklady sušících filtrů (převzato z <http://www.bifriendsengg.com/>).

Svíčkové filtry: hloubková filtrace



Obrázek 24. Příklady svíčkových filtrů (převzato z <http://www.nanovita.de/>).

Filtrovaný roztok se přivádí do nádoby filtru a filtrát je odváděn z vnitřní části svíčkového filtru. Tomu je uzpůsobena konstrukce filtračního elementu – svíčky, způsob těsnění svíčky v nádobě filtru.

Sáčkové filtry:



Obrázek 25. Ukázka sáčkových filtrů (převzato z <http://www.fdpp.com/>).

Filtrovaný roztok se přivádí do středu filtračního sáčku a je odváděn z nádoby filtru. Podle konstrukce a materiálu filtračního sáčku může probíhat kombinovaný způsob filtrace, koláčová i hloubková.

4. MÍSENÍ, MÍCHÁNÍ

Míchání

- patří mezi nejvíc používané operace v chemickém průmyslu (resp. příbuzných oborech, potravinářský, výroba kosmetiky, farmaceutických přípravků...).
- hlavní cíle:
 - odstranění nehomogenity
 - koncentrační,
 - fázová,
 - teplotní,
 - tvarová, distribuce velikosti částic.
 - zlepšení sdílení hmoty a tepla

Z hlediska zpracovávaného materiálu rozlišujeme:

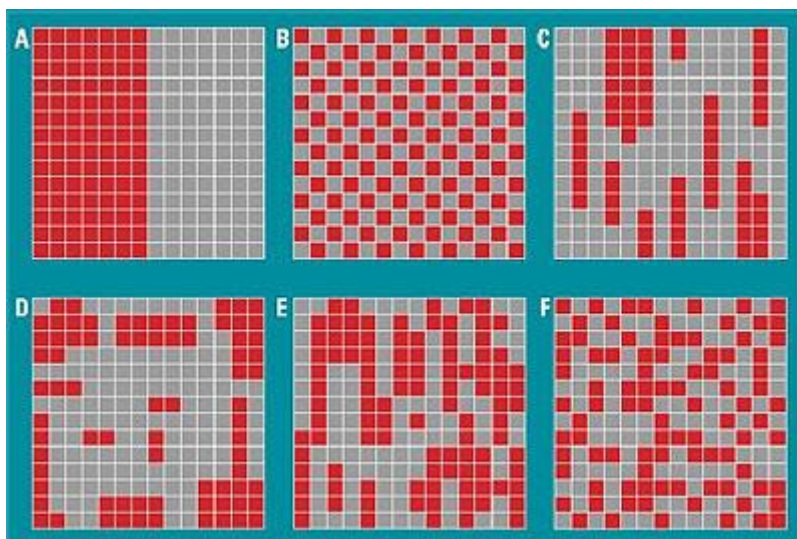
- mísení pevných zrnitých materiálů
- míchání v kapalném prostředí (kapaliny, emulze, suspenze)

Mísení pevných zrnitých materiálů

Příprava směsí z různých přísad:

- potravinářský průmysl,
- farmaceutický průmysl,
- výroba krmných směsí,
- výroba dezinfekčních prostředků...

Sypké směsi – nelze dosáhnout dokonalého smísení (vzájemně mísitelné kapaliny ano), aby všechny vzorky odebrané v různých místech měli stejné složení.



A: dokonalé rozdělení
B: ideální směs (v praxi nedosažitelné)
C, D, E: reálné směsi
F: reálná, homogenní směs

Obrázek 26. Příklady směsí (převzato z <http://www.loedige.de/>).

Charakter sypké směsi: dvě nebo více složek, každá složka je soubor zrn, který se při dynamickém pochodu mísení chová stejně (přičemž každé zrno může být složeno z různých chemických sloučenin).

Chování zrna ve směsi ovlivňují vlastnosti zrna:

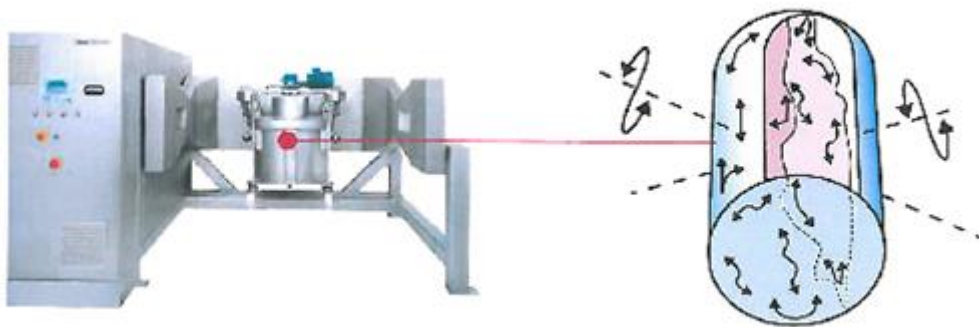
- tvar
- hmotnost
- mechanická pevnost (drobení, otěr...)
- obsah vlhkosti,
- tepelná stálost
- vlastnosti povrchu (velikost povrchu, sklon nabíjet se el. nábojem – sklon k shlukování...)

Složité procesy, výsledek – náhodný stav, u směsi s rozdílnými vlastnostmi zrn – rozduřování („čím delší doba míchání, tím vyšší stupeň separace částic“)

Zařízení:

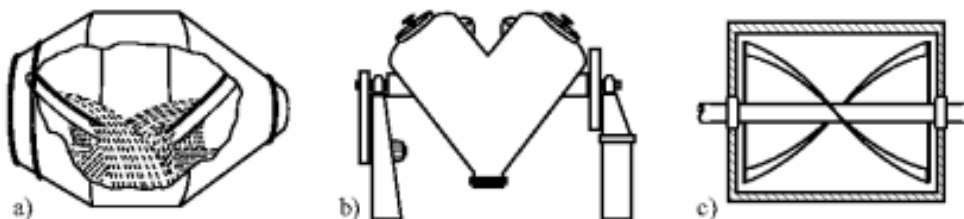
a) 3D mísič

Míchání – homogenizace probíhá v přepravním kontejneru (plastový sud, kovový kontejner...), ve kterém se transportuje dál v technologickém procesu.



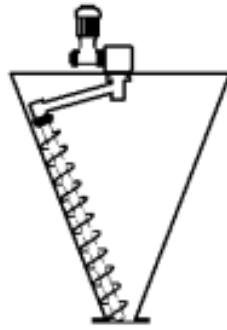
Obrázek 27. 3D mísič.

b) typy mísičů s rotující komorou



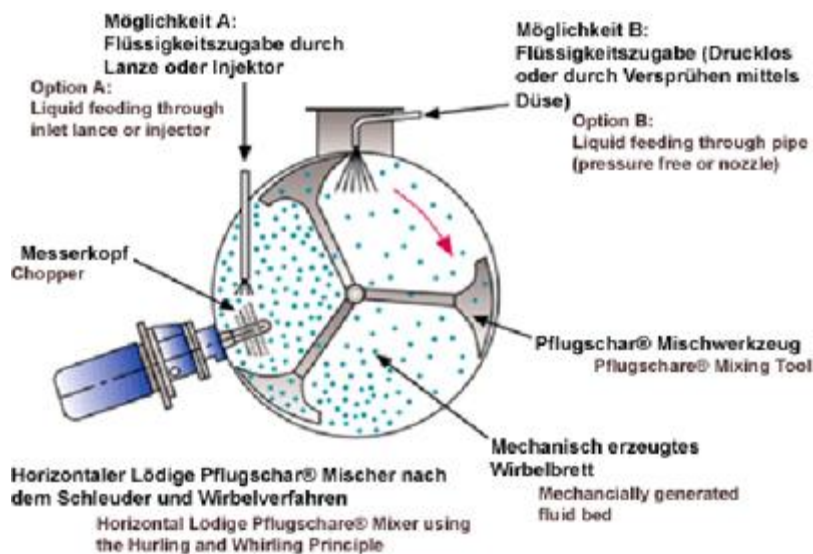
Obrázek 28. Mísiče zrnitých materiálů: a) kuželovitý; b) mísič typu V; c) pásový (převzato z Šnita D.: Chemické inženýrství I. 1. vyd. VŠCHT v Praze, Praha 2006. ISBN 80-7080-589-7).

c) planetový mísič



Obrázek 29. Planetový mísič (převzato z Šnita D.: Chemické inženýrství I. 1. vyd. VŠCHT v Praze, Praha 2006. ISBN 80-7080-589-7).

d) „pflugshare“ (pluhový) mísič



Obrázek 30. Horizontální Loedige Pflugschar® mixér (převzato z <http://www.loedige.de/>).

Míchání v kapalném prostředí

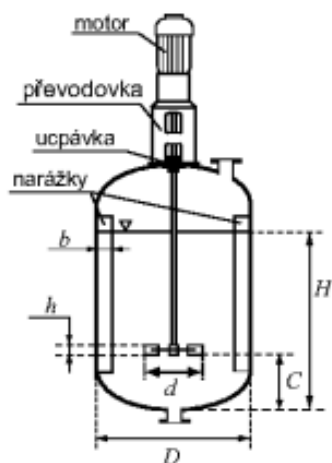
Velmi rozšířený proces, i v běžném životě od narození (sunar) po celý život (káva).

Návrh jednotkové operace míchání:

- malá zařízení, poměrně snadná záležitost
- velké míchané nádoby, příkon míchadla řádově 100kW: abychom dosáhly požadované parametry s co nejmenšími energetickými nároky je složitý proces.

Dnes jsou k dispozici účinné SW prostředky.

Běžný průmyslový míchací aparát tvoří nádoba, která má nejčastěji válcový tvar a rovné, resp. klenuté dno. V nádobě je hřídel, na které je umístěno míchadlo, někdy více míchadel nad sebou. Hřídel je poháněna motorem (přes převodovku), často s měničem otáček. Uvnitř nádoby mohou být různé vestavby, stěnové narážky nebo jiné usměrňovače toku.



Obrázek 31. Schéma míchací nádoby (převzato z Šnita D.: Chemické inženýrství I. 1. vyd. VŠCHT v Praze, Praha 2006. ISBN 80-7080-589-7).

Podle požadovaného cíle můžeme míchání rozdělit:

a) Homogenizace

Promíchávání navzájem mísitelných kapalin.

- v malém měřítku jednoduchý proces,
- velké měřítko, značně rozdílné viskozity homogenizovaných kapalin – může způsobovat značné obtíže

Lze hodnotit *stupněm homogenity* (nemusí být vztažen pouze na koncentraci, ale např. na teplotu, barvu...).

- vztah dosažené hodnoty hodnocené veličiny při dokonalém promíchání (vypočítaná hodnota) a hodnoty dosažené v daném čase, hodnota se mění od 1 do 0.

V literatuře jsou pro různá míchadla publikované kriteriální rovnice, vyjadřující závislost stupně homogenity na čase (platí pro dané míchadlo, geometrické uspořádání, typ nádoby...)

b) Suspendace

Systém kapalina – tuhá fáze, cílem je udržet tuhé částice ve vznosu.

Tím se dosáhne zlepšení přestupu hmoty mezi fázemi

- rozpouštění, krystalizace
- adsorpce,
- katalytické reakce

nebo se připravují suspenze pro další zpracování

- lékové formy
- nanášení ochranných povlaků (smaltování, plasty – „teflonové pánve“)

Při návrhu dva parametry:

- první kritická frekvence otáčení (žádná částice nezůstane v klidu)
- druhá kritická frekvence otáčení (rovnoměrné rozdělení částic v objemu)

c) Dispergace

Vytvoření dvoufázové soustavy, maximální mezifázový povrch, intenzifikace sdílení hmoty.

Emulgace : kapalina – kapalina

Aerace: kapalina – plyn

Spojité a dispergovaná fáze (v některých případech závisí na systému míchání)

d) Intenzifikace přestupu tepla

Z teorie sdílení tepla je známo, že intenzita výměny tepla je přímo úměrná rychlosti proudění kapaliny.

Mícháním se zvyšuje tepelný výkon zařízení – topení / chlazení, vnější dvojité plášť (duplikace, navařená „půl trubka“), vnitřní had.

Druhy míchadel, použití



Obrázek 32. Různé druhy míchadel (převzato z <http://www.liquidsyrupmanufacturingplant.com/>).

Pomaloběžná:

- kotvové, hřebenové, listové, pásové, šnekové,
- obvodová rychlost konců lopatek míchadla do $1,5 \text{ m s}^{-1}$,
- pro míchání směsí s vysokou viskozitou.

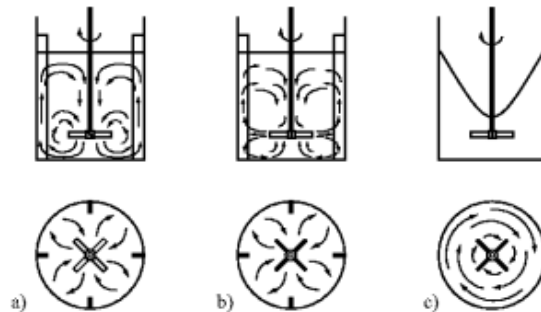
Rychloběžná:

- vrtulové, šestilopátkové, třílopatkové, turbínové, klecové,
- obvodová rychlost 4 až 15 m s^{-1} ,
- pro viskozity odpovídající řádově viskozitě vody.

Přechod mezi uvedenými kategoriemi - lopatková míchadla:

- lopatkové s kolmými nebo šikmými lopatkami,
- obvodová rychlost 1,5 až 4 m s⁻¹.

Účinek míchadla na míchanou kapalinu:



Obrázek 33. Znázornění tokových profilů v mechanicky míchaných nádobách; a) axiální; b) radiální; c) tangenciální (převzato z Šnita D.: Chemické inženýrství I. 1. vyd. VŠCHT v Praze, Praha 2006. ISBN 80-7080-589-7).

- radiální míchadla, např. 4, 8, 9, 10, 12, 13,
- axiální míchadla, např. 5, 6, 7, 11,
- vliv, funkce narážek, typy narážek

volba míchadla:

- pro homogenizaci a suspendaci: míchadla axiální, obvykle směr otáčení takový, aby výstupní proud směřoval ke dnu,
- pro dispergaci: radiální míchadla

Modelování míchání (přenos výsledků z malého, tj. laboratorního nebo poloprovozního měřítka do průmyslových podmínek:

Vychází se z poznatku, že pro

- heterogenní směsi platí předpoklad konstantní hodnoty hustoty příkonu $P/V = konst.$
- homogenní směsi platí předpoklad zachování konstantní obvodové rychlosti konců lopatek $nd = konst.$

Při platnosti těchto předpokladů lze odvodit vztah mezi frekvencí otáčení a průměrem míchadla (index d značí *dílo*, index m *model*):

- pro heterogenní směsi:

$$n_d = n_m \left[\frac{d_m}{d_d} \right]^{2/3} \quad (19)$$

- pro homogenní směsi:

$$n_d = n_m \frac{d_m}{d_d} \quad (20)$$

Míchání ve smaltovaných aparátech:

- tvar míchadla přizpůsoben možnostem smaltování
- konstrukce narážky
- zvláštní konstrukce – systém „cryo lock“ a „glass lock“

System „cryo lock“ fy Paudler: využívá tepelné roztažnosti kovů. Hřídel míchadla se zchladí kapalným dusíkem, pak se nasadí vlastní míchadlo. Po zahřátí hřídele na normální teplotu se dosáhne pevného spojení.



Obrázek 34. „Cryo lock“ systém (převzato z <http://www.pfaunder.de/>).

„Glas Lock“ systém fy De Dietrich: založeno na principu kuželového zábrusu, známého z laboratorního skla. Pomocí přípravku se jednotlivé lopatky usadí do otvoru v náboji hřídele míchadla. Pro demontáž se použije opět speciální přípravek.

Obrázek 35. „Glaslock“ systém (převzato z <http://www.dedietrich.com/>).

Narážky ve smaltovaných reaktorech:

Konstrukce narážek je odlišná než u ocelových aparátů, smaltovaný povrch neumožňuje navaření narážky na stěnu aparátu. Narážky se vkládají do nádoby přes příslušné hrdlo ve víku. Nově se vyvíjejí zvláštní konstrukce, typ „C“ fy Pfaudler.

Obrázek 36. Typ „C“ firmy Pfaudler (převzato z <http://www.pfaunder.de/>).

34

5. SDÍLENÍ TEPLA

5.1. Základní pojmy

Pojmem tepelná energie označujeme energii mikroskopického pohybu částic (translačního, rotačního, vibračního).

Měřitelnou mírou této energie je **teplota**.

Teplo je část vnitřní energie, která samovolně přechází z místa s vyšší teplotou do místa s nižší teplotou. Přesnější (avšak nezavedené) označení pro teplo by byl například pojem *tepelná energie*. Teplo je tedy pojem popisující *proces*, který způsobuje *změnu stavu* systému, na rozdíl od *teploty*, která popisuje *stav* systému.

Tepelný tok \dot{Q} je definován jako množství tepla, které projde danou plochou za jednotku času (ve směru kolmém na tuto plochu).

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{dT} \quad (21)$$

Jednotkou tepla je jednotka energie, tj. 1 Joule (J). Z definice dále plyne, že jednotkou tepelného toku je 1 J/s (neboli 1 W)

V praxi se celkové množství tepla vyjadřuje v J (a v jeho násobcích – kJ, MJ, GJ) nebo v kilowatthodinách (kWh).

5.2. Mechanismy sdílení tepla

Základními mechanismy sdílení tepla jsou tři:

- vedení (kondukce),
- proudění (konvekce),
- sálání (radiace).

Vedením tepla rozumíme přenos tepla v nehybném prostředí prostřednictvím vibrací základních částic hmoty (atomů, molekul). Klasický pokus na prokázání sdílení tepla vedením je ohřev kovové tyče na jednom konci, kdy teplota postupně vzrůstá nejen v místě ohřevu, ale postupně i ve vzdálenějších částech.

O *sdílení tepla prouděním* hovoříme v tekutém prostředí, kde dochází k pohybu větších celků tekutiny buďto samovolně (díky rozdílu hustot: s rostoucí teplotou obvykle hustota tekutiny klesá, ohřátá tekutina tak stoupá vzhůru a na její místo přichází chladnější tekutina, tento jev nazýváme **volná konvekce**), anebo je proudění vynuceno působením vnější síly, např. zařazením čerpadla (**nucená konvekce**).

Ke *sdílení tepla sáláním* může docházet mezi dvěma tělesy o různé teplotě, jestliže teplejší těleso vyzařuje paprsky v infračervené oblasti spektra (a tím se ochlazuje), zatímco chladnější těleso toto záření pohlcuje (a tím se zahřívá). Jedná se tedy o sdílení tepla mezi dvěma systémy (tělesy), které nejsou v přímém kontaktu, musí však mezi nimi být prostředí propustné pro elektromagnetické záření (např. vakuum).

V prostředí chemických technologií, které jsou okruhem zájmu těchto přednášek, se mechanismus sdílení tepla sáláním neuplatňuje.

Dále stručně probereme mechanismy sdílení tepla vedením a prouděním a jejich kombinace – **přestup a prostup tepla**.

Vedení tepla:

Podle nultého zákona termodynamiky je systém v tepelné rovnováze, tj. nedochází v něm ke sdílení (tok) tepla pokud má všude stejnou teplotu (tj. teplota je konstantní).

Dále je známo, že obecnou hybnou silou procesů je jejich vzdálenost od rovnovážného stavu. V tomto případě je mírou odchylky, vyjádřením vzdálenosti od rovnovážného stavu, *gradient teploty*.

V dalším se omezíme na gradient teploty ve směru osy z . Podle Fourierova zákona pro vedení tepla platí: Tok tepla \dot{Q} ve směru osy z skrz plochu A , kolmou na osu z , je roven součinu velikosti této plochy a záporné hodnotě derivace teploty podle osy z (gradientu teploty ve směru této osy)

$$\dot{Q} = -A\lambda \frac{dT}{dz}. \quad (22)$$

Záporné znaménko vyjadřuje, že tok tepla je kladný ve směru klesající teploty. Konstantou úměrnosti je **tepelná vodivost λ** .

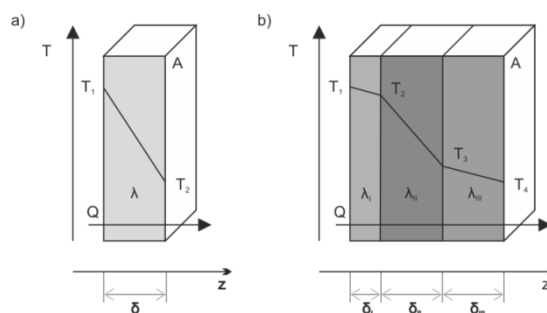
Tepelná vodivost je materiálová vlastnost, závisí na druhu materiálu a teplotě, u plynů i na tlaku.

Jednotka tepelné vodivosti je $Wm^{-1}K^{-1}$. Její hodnoty jsou tabelované.

Intenzitu toku tepla vedením definujeme jako tok tepla ve směru osy z , vztažený na jednotku plochy

$$q_{ved,z} = \frac{\dot{Q}}{A} = -\lambda \frac{dT}{dz}. \quad (23)$$

Vedení tepla rovinnou stěnou



Obrázek 37. Vedení tepla jednoduchou a složenou rovinnou stěnou.

Představme si reálnou situaci podle Obrázek 37. Dále vycházíme z předpokladu, že při ustáleném jednosměrném vedení tepla musí být intenzita tepelného toku konstantní, jinak by mezi plochami docházelo k akumulaci tepelné energie a tím i ke změně teploty. To by ale bylo v rozporu s předpokladem ustáleného stavu. Dalším předpokladem je konstantní hodnota tepelné vodivosti λ .

Za těchto předpokladů řešením Fourierovy rovnice dostaneme vztah pro výpočet tepelného toku jednoduchou rovinou stěnou

$$\dot{Q} = A\lambda \frac{T_1 - T_2}{\delta}. \quad (24)$$

Porovnáním původní rovnice a výsledku po integraci je zřejmé, že derivace teploty ve směru osy z je konstantní, což jinými slovy znamená, že teplotní profil je lineární

$$-\frac{dT}{dz} = \frac{T_1 - T_2}{\delta} = \text{konstanta}. \quad (25)$$

Představme si rovinou stěnu složenou z více vrstev – Obrázek 39. Analogicky jako pro případ jednoduché stěny lze odvodit vztah,

$$\dot{Q} = A \frac{T_1 - T_4}{\left(\frac{\delta_I}{\lambda_I} + \frac{\delta_{II}}{\lambda_{II}} + \frac{\delta_{III}}{\lambda_{III}}\right)}. \quad (26)$$

který je možné zobecnit pro n vrstev

$$\dot{Q} = A \frac{T_1 - T_4}{\sum_{j=1}^n \frac{\delta_j}{\lambda_j}}, \quad (27)$$

použitelný pro výpočet tepelného toku přes složitou stěnu.

Důležitou (pro praktické aplikace) vlastností tohoto výpočtového vztahu je potřeba znalosti pouze teplot na okrajích systému.

Vedení tepla válcovou stěnou

V praxi se často můžeme setkat s případem vedení tepla přes válcovou plochu – ve směru kolmém na podélnou osu válcové plochy, resp. systému souosých válcových ploch. Při ustáleném vedení tepla musí být tepelný tok každou z ploch stejný. Nezávisí tedy na vzdálenosti od osy ploch – radiální souřadnici r . Platí totéž, co bylo uvedeno pro rovinou stěnu.

Platí pro tok válcovou plochou o poloměru r a délce L

$$\dot{Q} = -\lambda A \frac{dT}{dr} = -2\lambda\pi r L \frac{dT}{dr}. \quad (28)$$

Řešením této rovnice dostaneme vztah pro výpočet ustáleného tepelného toku válcovou plochou

$$\dot{Q} = 2\pi L \lambda \frac{T_1 - T_2}{\ln \frac{r_2}{r_1}} = 2\pi L \lambda \frac{T_1 - T_2}{\ln \frac{d_2}{d_1}}. \quad (29)$$

Obdobně jako pro případ rovinné plochy lze odvodit pro obecný případ n -válcových vrstev

$$\dot{Q} = 2\pi L \frac{T_1 - T_{n+1}}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{\lambda_j} \ln \frac{r_{j+1}}{r_j}} = 2\pi L \frac{T_1 - T_{n+1}}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{\lambda_j} \ln \frac{d_{j+1}}{d_j}}. \quad (30)$$

Přestup tepla

V systémech s proudící tekutinou se vedle sdílení tepla vedením uplatí i sdílení tepla prouděním – konvekcí.

Množství tekutiny m s měrnou entalpií h obsahuje takové množství entalpie H , která je rovna součinu

$$H = mh. \quad (31)$$

Pokud množství proudící tekutiny vyjádříme pomocí hmotnostního toku \dot{m} , tok entalpie je pak

$$\dot{H} = \dot{m}h. \quad (32)$$

Pokud v souladu s předcházejícím vztáhneme tok entalpie prouděním na jednotku plochy A kolmou na osu z je intenzita toku entalpie prouděním (q_{kon})

$$q_{kon,z} = \frac{\dot{H}}{A} = \frac{\dot{m}h}{A} = \frac{\dot{V}\rho h}{A} = v_z \rho h. \quad (33)$$

Intenzita toku entalpie je obecně vektorová veličina, entalpie se může sdílet obecně ve všech třech směrech.

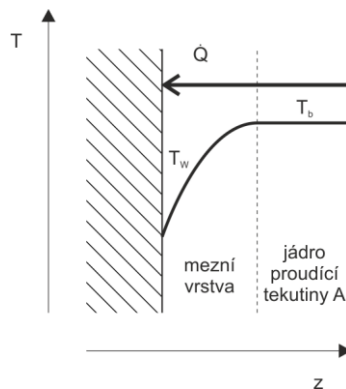
Pro řešení tohoto problému je potřeba znát rychlost proudění tekutiny v každém místě a čase. Z hydrodynamiky se využije poznatek o vyvinutém rychlostním profilu tekutiny – mezní vrstva, jádro proudící tekutiny. Pro praktické účely se tento problém transformuje na sdílení tepla mezi jádrem proudící tekutiny a povrchem stěny. Hnací silou je rozdíl teploty v jádru proudící tekutiny (nemění se a dá se změřit) a teplotou stěny. V praxi tento proces sdílení tepla mezi jádrem proudící tekutiny a povrchem stěny (resp. fázovým rozhraním, např. voda – vzduch) nazýváme **přestup tepla**.

Newtonův ochlazovací zákon

Popisuje, jaké množství tepla se vymění mezi proudící tekutinou a pevnou stěnou (fázovým rozhraním), tj. **přestup tepla** – viz Obrázek 38.

$$\dot{Q} = \alpha A(T_b - T_w), \quad (34)$$

kde α je **součinitel přestupu tepla**.



Obrázek 38. Přestup tepla z jádra proudící tekutiny na stěnu.

Tímto se úloha popisu **přestupu tepla** převádí na úlohu na nalezení hodnoty **součinitele přestupu tepla**.

Výpočet **součinitele přestupu tepla** je složitý problém. Hodnota **součinitele přestupu tepla** závisí

- na typu proudění (konvekce) tekutiny,
- na geometrických vlastnostech obtékaných těles,
- na fyzikálně chemických vlastnostech tekutin.

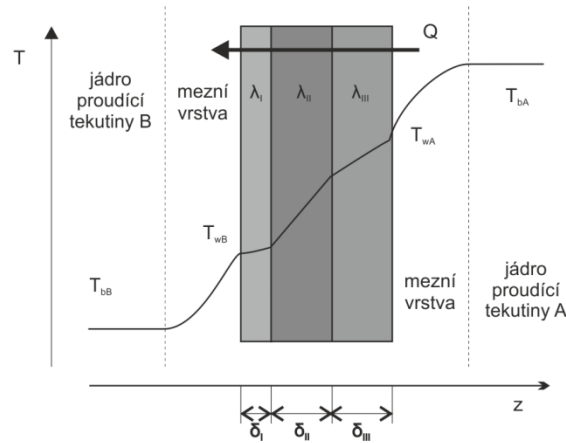
Tato problematika přesahuje rámec tohoto kurzu. V případě potřeby lze postupy nalézt v odborné literatuře.

Prostup tepla – složené sdílení tepla

V technické praxi se často vyskytují problémy typu: určit množství tepla, které se vyměňuje mezi dvěma proudícími tekutinami, vzájemně oddělenými stěnou nepropustnou pro hmotu, ale propustnou pro teplo (jednoduchou nebo složenou).

Prostup tepla se tedy skládá z následujících procesů (sériových, řazených za sebou):

- **přestup tepla** z jádra proudící teplejší tekutiny **A** na povrch stěny, kolem které tekutina **A** protéká,
- **vedení tepla** stěnou (jednoduchou nebo složenou)
- **přestup tepla** z povrchu stěny, kolem které protéká tekutina **B** do jádra této tekutiny.



Obrázek 39. Prostup tepla vícevrstvou rovinnou stěnou.

Pokud uvažujeme ustálený stav, můžeme odvodit výpočtové vztahy:

Prostup tepla rovinnou stěnou

$$\dot{Q} = K \cdot A \cdot \Delta T, \text{ kde} \quad (35)$$

$$\Delta T = T_{bA} - T_{bB}, \quad (36)$$

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_A} + \sum_j \frac{\delta_j}{\lambda_j} + \frac{1}{\alpha_B}, \quad (37)$$

kde K je *součinitel prostupu tepla*.

Prostup tepla válcovou stěnou

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_A} + \sum_j \frac{\delta_j}{\lambda_j} + \frac{1}{\alpha_B}, \quad (38)$$

$$\dot{Q} = K_L \cdot L \cdot \Delta T, \quad (39)$$

kde L délka válcové plochy,

$$\Delta T = T_{bA} - T_{bB}, \quad (40)$$

$$\frac{2\pi}{K_L} = \frac{1}{\alpha_A r_A} + \sum_{j=1}^n \frac{1}{\lambda_j} \ln \frac{r_{j+1}}{r_j} + \frac{1}{\alpha_B r_B}, \text{ resp. } \frac{\pi}{K_L} = \frac{1}{\alpha_A d_A} + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \frac{1}{\lambda_j} \ln \frac{d_{j+1}}{d_j} + \frac{1}{\alpha_B d_B}. \quad (41)$$

K_L je *součinitel prostupu tepla, vztažený na jednotkovou délku (trubky)*.

Poznámka:

Jak bylo vzpomenuto, určení součinitele přestupu tepla α není jednoduché. Výhodou však je, že někteří výrobci aparátů uvádějí pro svoje výrobky orientační hodnoty součinitele prostupu tepla, které jsou pro technické výpočty dostatečné.

Např. fa KAVALIER uvádí:

Orientační hodnoty celkového součinitele prostupu tepla stěnami ze skla SIMAX:

Při použití jako kondenzátoru (kolem trubek kondenzuje vodní pára, trubkami chladící voda)

$k = 290\text{--}580 \text{ W/m}^2\text{K}$ ($250\text{--}500 \text{ kcal/m}^2\text{h } ^\circ\text{C}$)

Při použití jako odparky (kolem trubek odpařování vody, v trubkách kondenzace vodní páry)

$k = 465\text{--}814 \text{ W/m}^2\text{K}$ ($400\text{--}700 \text{ kcal/m}^2\text{h } ^\circ\text{C}$)

Při použití jako výměníku tepla (kolem trubek ohřívána kapalina, trubkami ohřívající kapalina) $k = 250\text{--}400 \text{ W/m}^2\text{K}$ ($200\text{--}350 \text{ kcal/m}^2\text{h } ^\circ\text{C}$)

6. VÝMĚNÍKY TEPLA

V následujícím textu si ukážeme využití teorie o přestupu tepla v praktických aplikacích.

Výměníky tepla

zařízení, které slouží k výměně tepla mezi dvěma fázemi (obvykle kapalné), z teplejší se teplo odebírá, do studenější se převádí

technologické systémy: potřebujeme vyhřívat, chladit (reakční směs, úprava teplota vstupujících surovin, operace s fázovými proměnami – odpařování, kondenzace...).

6.1. Typy výměníků tepla a jejich konstrukce

U velkých systémů – důležitá část návrhu, *úspora energie*

Konstrukce výměníků

- z hlediska funkce

Rekupační výměníky - výměna tepla mezi tekutinami oddělenými nepropustnou přepážkou. **Materiál přepážky – vysoká tepelná vodivost.**
Kontinuální provoz.

Regenerační výměníky – výměna tepla prostřednictvím hmoty, která je schopna akumulovat teplo (keramické hmoty...). Velké, energeticky náročné technologické celky – tavicí pece, cihelny...

Přerušovaný proces, většinou periodický

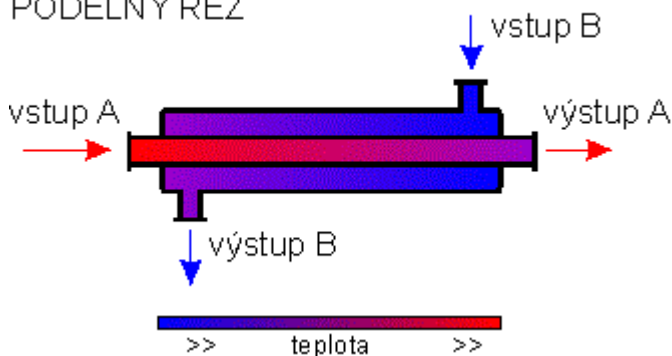
Směšovací výměníky – přímé smíchání teplejší a chladnější tekutiny (příprava teplé vody mícháním s párou)

- z hlediska uspořádání toků

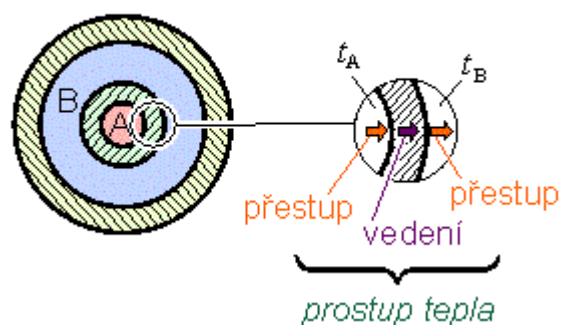
- *Souproudé výměníky*
- *Protiproudé výměníky*
- *Výměníky s křížovým tokem*

V oblasti chemických technologií, kterými se zabýváme – převážně rekupační výměníky

PODÉLNÝ ŘEZ



PŘÍČNÝ ŘEZ



Obrázek 40. Funkce výměníku tepla (převzato z <http://www.vscht.cz/uchi/echi/vt/index.html>).

Entalpická bilance

Označíme si:

Teplejší proud A, množství \dot{m}_A , teplota na vstupu $T_{A,i}$, na výstupu $T_{A,o}$. Obdobně pro studenější proud, s indexem B. Celkový tepelný tok, který se ve výměníku vyměňuje mezi teplým a studeným proudem je $\dot{Q}_{A,B}$.

Uvažujeme bilanci celého výměníku v ustáleném stavu, vztaženou na časovou jednotku. Ztráty do okolí se zanedbávají.

$$\begin{array}{c} \dot{H}_{A,i} + \dot{H}_{B,i} = \dot{H}_{A,o} + \dot{H}_{B,o} \\ \text{přítok} \qquad \text{odtok} \end{array} \quad (42)$$

Dále budeme předpokládat, že ve výměníku nedochází k fázové přeměně. Upravíme tak, že entalpie vyjádříme pomocí měrných entalpií a dále předpokládáme konstantní hodnotu c_p v daném teplotním intervalu. Dostaneme rovnici pro celkovou entalpickou bilanci výměníku tepla ve tvaru:

$$\dot{m}_A c_{p,A} (T_{A,i} - T_{A,o}) = \dot{m}_B c_{p,B} (T_{B,i} - T_{B,o}) = \dot{Q}_{AB} \quad (43)$$

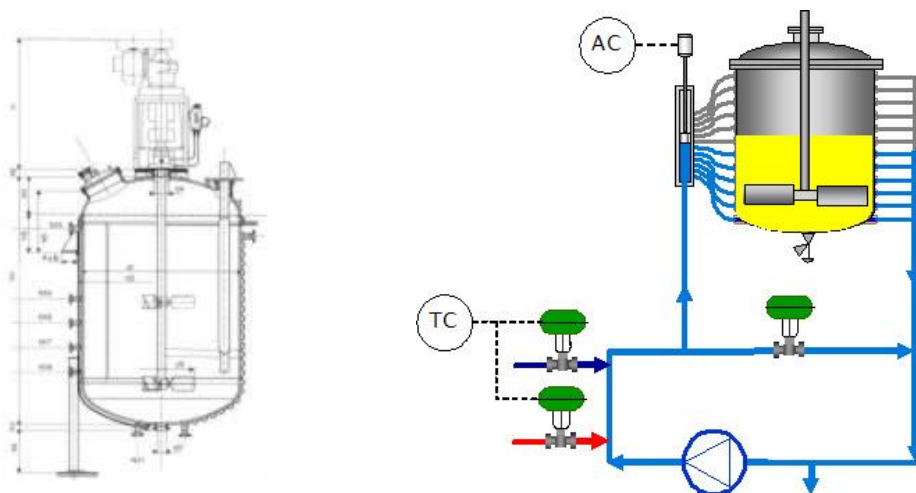
Tento vztah lze použít pro výpočty tepelného výměníku s danými rozměry.

Pokud chceme navrhovat rozměry výměníku, musíme se zabývat i otázkou prostupu tepla. Tyto otázky jsou nad rámec kurzu, opět studenti musí v případě potřeby sáhnout po odborné literatuře

Typy výměníků

- duplikace reaktorů
- výměníky
 - o deskové
 - o trubkové

Příklady:

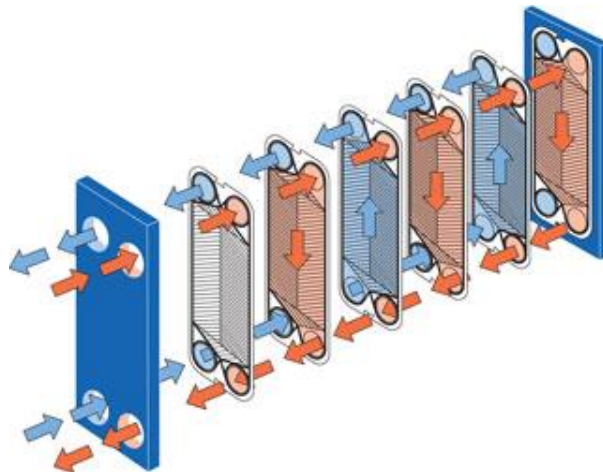


Obrázek 41. Patentovaný systém COFLUX umožňující plynulou regulaci vyhřívání/chlazení v systémech s duplikací pomocí změny teplosměnné plochy.

Obecný princip funkce deskových výměníků tepla

Deskové tepelné výměníky sestávají ze souboru desek lisovaných z různých materiálů v závislosti na požadavcích aplikace. Mezi deskami - díky jejich profilovanému povrchu - vznikají oddělené kanály pro ohřívání a chlazené médium.

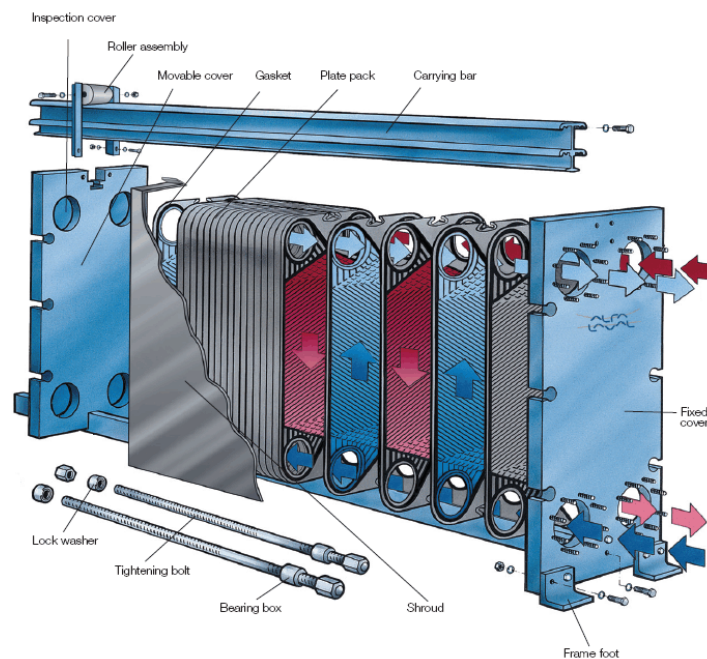
Každá deska je obtékána primárním médiem z jedné strany a sekundárním médiem ze strany druhé. **Mezi jednotlivými médii dochází přes stěnu (materiál) desky k prostupu tepla.**



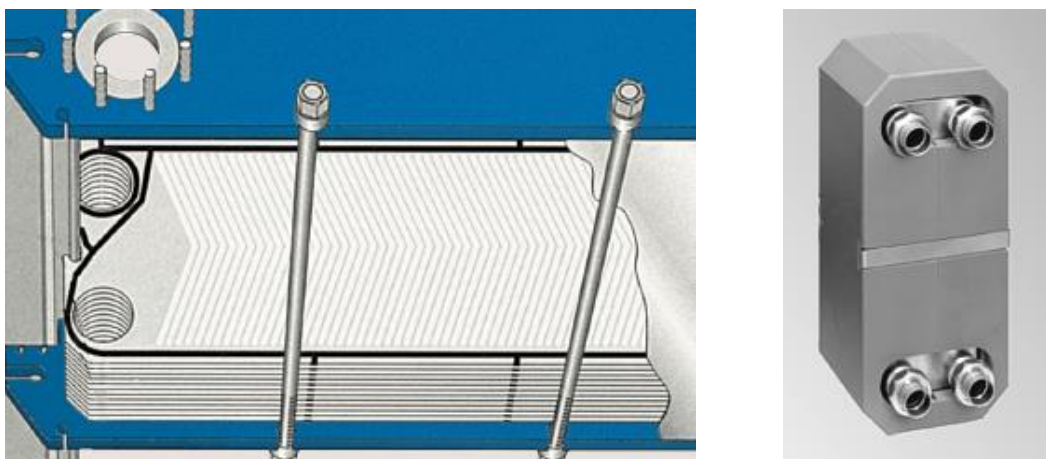
Obrázek 42. Princip funkce deskového výměníku tepla (rozebíratelný deskový výměník tepla).

konstrukce desky – prolisy (zvýšení turbulence = intenzivnější prostup tepla), někdy leštěný povrch – snížení tvorby usazenin

*rozebíratelné - skládané výměníky, těsnění desek
nerozebíratelné – svařované/pájené výměníky*



Obrázek 43. Princip deskového výměníku firmy ALFA LAVAL, SE.



Obrázek 44. Detail desky s těsněním, Alfa Laval, SE (vlevo); komerčně dodávaný deskový výměník, Viessmann Werke GmbH, D (vpravo).



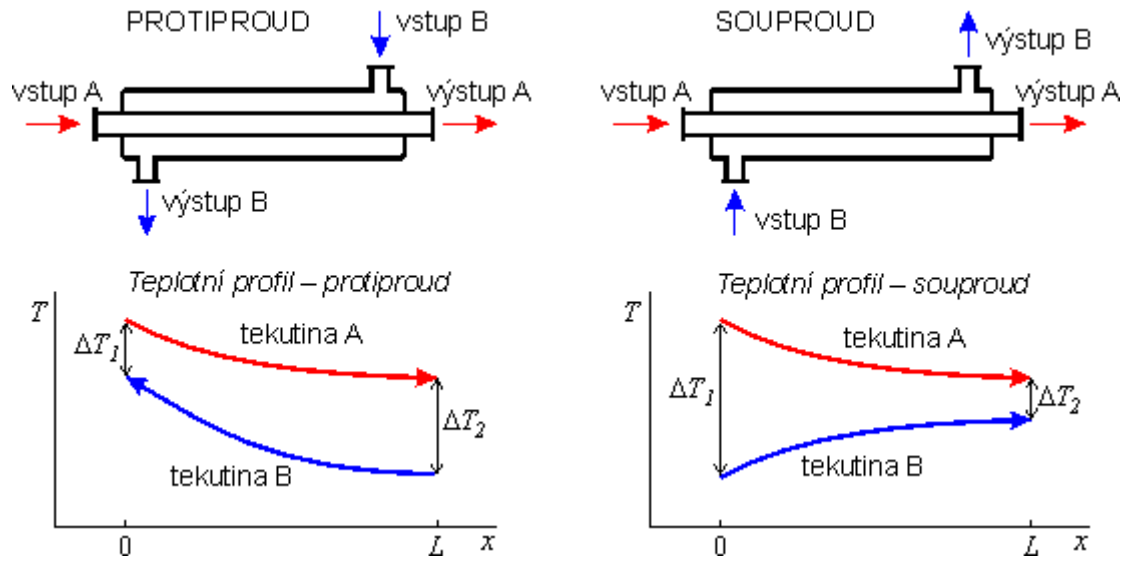
Obrázek 45. Nabídka deskových výměníků společnosti Alfa Laval, SE.

Trubkové výměníky tepla

Mezi trubkové výměníky řadíme výměník trubka v trubce, svazkový výměník, nebo trubkový had.

Trubka v trubce

Konstrukčně nejjednodušší typ výměníku se skládá z vnitřní trubky a pláště. Jedna tekutina proudí vnitřní trubkou, druhá mezitrubkovým prostorem v plášti, teplo se sdílí skrze stěnu vnitřní trubky. Tento výměník může být provozován jako souprroudý nebo protiproudý.



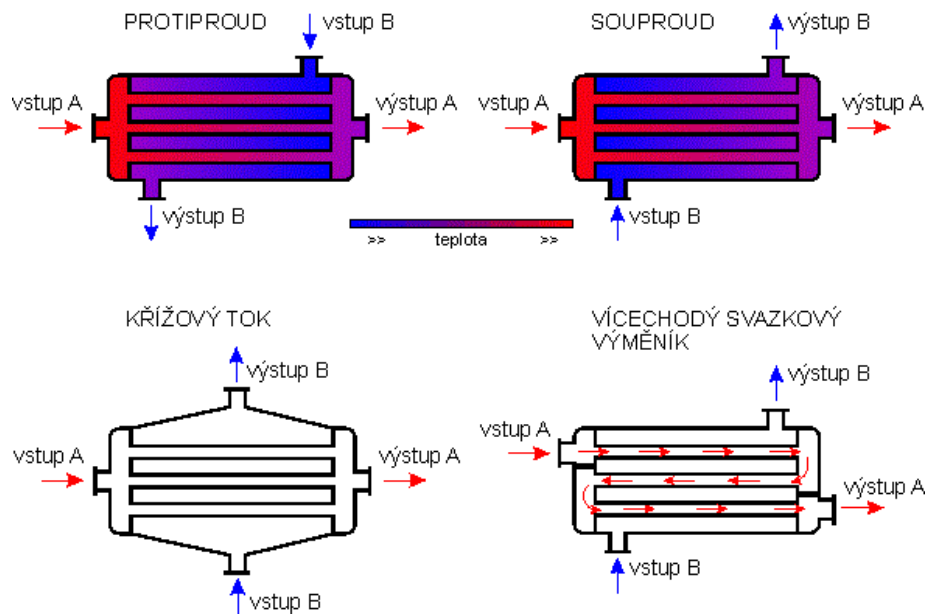
Obrázek 46. Výměník tepla trubka v trubce (převzato z <http://www.vscht.cz/uchi/echi/vt/trubkove.html>).



Obrázek 47. Příklad průmyslové realizace výměníku trubka v trubce společnosti E. J. Bowman Ltd., UK.

Svazkový výměník

Je-li v plášti umístěno více trubek, hovoříme o svazkovém výměníku tepla. Jedna tekutina je vedena v trubkách, druhá protéká mezitrubkovým prostorem. Tento výměník také může být provozován jako souproutý nebo protiproutý, umožňuje však i složitější uspořádání, například křížový tok nebo smíšené uspořádání proudů u vícechodých výměníků.



Obrázek 48. Svazkový výměník tepla (převzato z <http://www.vscht.cz/uchi/echi/vt/trubkove.html>).



Obrázek 49. Příklad průmyslové realizace svazkového výměníku (MICo, s.r.o., CZ).



Obrázek 50. Hotový výměník (MICo, s.r.o., CZ).

Trubkový had

Obvykle spirálová trubice, již proudí chladicí (nebo ohřívací) médium, používá se často i v laboratorním měřítku např. v termostatech či zpětných chladičích. V průmyslovém měřítku se používá hlavně k zabudování do aparatur (např. reaktoru).



Obrázek 51. Nerezový trubkový had firmy Sentry Equipment Corp., WI/USA.

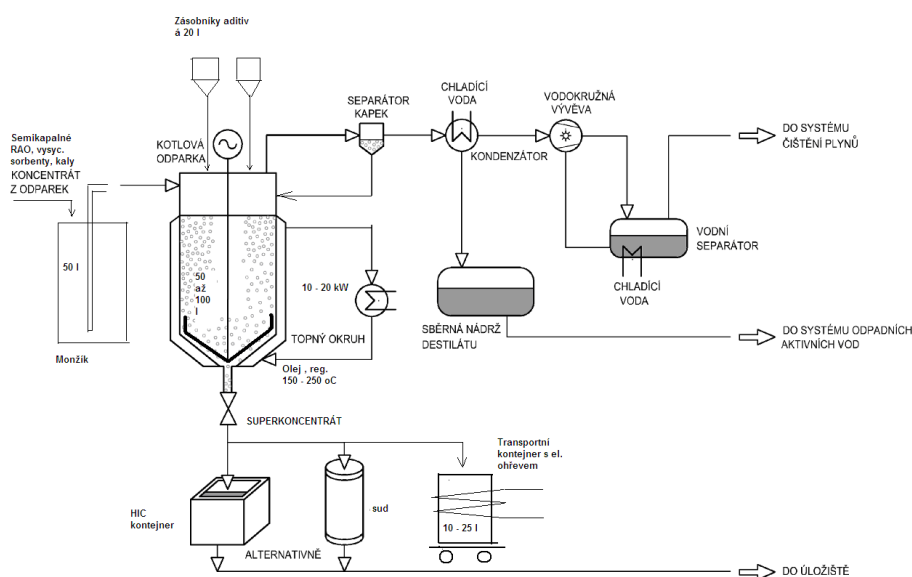
6.2. Odparky

Odpařování je proces, při kterém ze zpracovávaného materiálu (roztoku) odstraňujeme těkavou složku, resp. složky. Většinou je žadáným produktem zbytek zbavený těkavých složek (krystalizace, kondenzované mléko, koncentráty přírodních šťáv...).

Základem pochodu odpařování je opět sdílení tepla, zařízení – odparka je výměník tepla.

Odpařování probíhá buď za normálního tlaku, nebo v případě že jsou přítomny termolabilní látky tak za tlaku sníženého.

Jak již bylo řečeno, základem je výměník tepla, ve kterém dochází k zahřátí zpracovávaného roztoku k bodu varu, ve druhém výměníku tepla dochází ke kondenzaci par (používá se označení *brýdové páry*).



Obrázek 52. Příklad průmyslové odparky (převzato z <http://susen2020.cz/>).

R_0 , R_1 je vstupující resp. vystupující (zahuštěný) roztok, P, K_P je přívod topné páry, resp. odvod parního kondenzátu, C je přívod chladicí kapaliny, K_B je odvod kondenzátu brýdových par společně s chladicí kapalinou.

Odparka pracuje kontinuálně. Zpracováváný roztok je přiváděn do prostoru trubkového výměníku tepla, v úzkém, mezitrubkovém prostoru se ohřívá k varu a vlivem nižší hustoty paro-kapalinové směsi stoupá vzhůru. V širokém prostoru ve středu odparky má kapalina vyšší hustotu a tak se dosáhne účinné cirkulace. Brýdové páry kondenzují po styku s chladicí kapalinou a jsou přes hydraulický uzávěr odváděny. Zahuštěný roztok se odvádí ze středu vařáku.

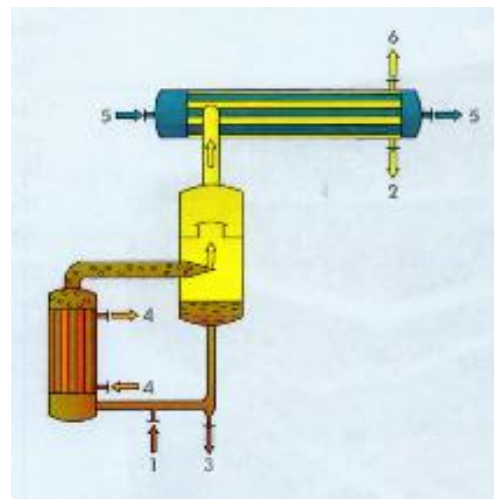
Z popisu je zřejmé, že odparka se bude využívat pro zahušťování vodných roztoků.

Pro zpracování termolabilních látek – častý případ v oblast kvalifikované chemie, resp. chemie léčivých látek je důležité používat zařízení, která minimalizují tepelné namáhání produktu.

Na následujících příkladech budou ilustrovány možnosti:

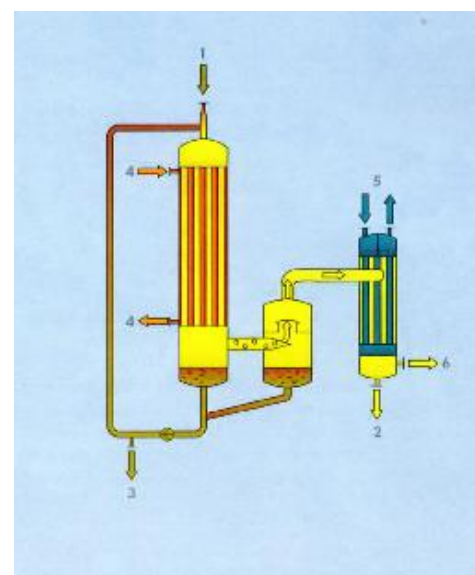
Odparka s cirkulačním vařákem:

Klasické uspořádání odparky, v cirkulačním vařáku je zpracováváný materiál udržován při vysoká teplotě po celou dobu trvání operace.



Odparka s filmovým vařákem, padající film:

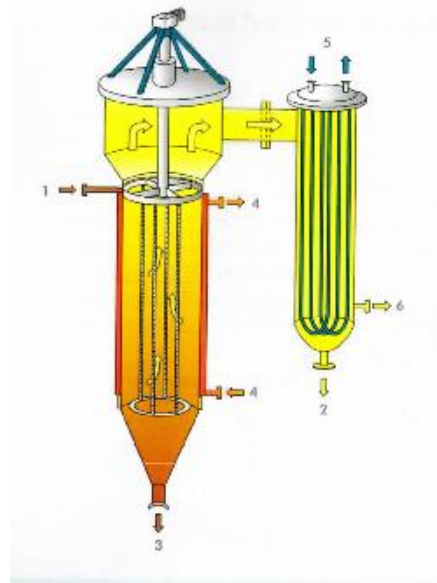
Zpracováváný roztok je přiváděn na hlavu vařáku a distribučním zařízením je rozdělován do jednotlivých trubic vařáku, po jejich ploše volně stéká ke dnu, kde je čerpadlem cirkulován. Kratší doba přímého styku produktu s vyhříváním povrchem výměníku



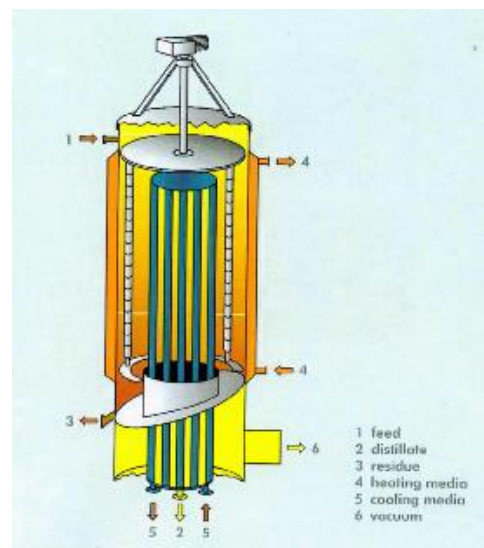
Filmová rotační odparka, odparka se stíraným filmem:

Vařák odparky je tvořen odparným válcem, ve kterém se otáčí rotor se stěrači. Zpracovávaný roztok se přivádí shora do distribučního zařízení, které rozdělí nástřik na povrch vyhřívaného válce. Stěrače rotoru pak udržují tenký film po celé odparné ploše. Brýdové páry odchází přestupníkem do kondenzátoru.

Velmi krátká doba styku zpracovávaného produktu s vyhřívanou odparnou plochou.



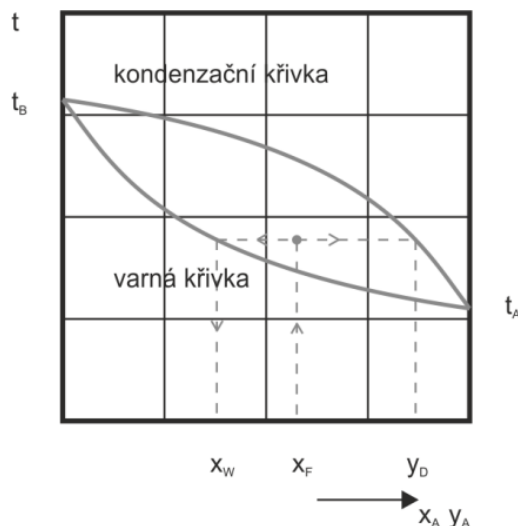
Zvláštním případem je zařízení označované jako krátkocestná, resp. molekulární odparka (destilace). O tomto zařízení podrobněji v kapitole Destilace.



Poznámka: popis jednotlivých proudů (1 až 6) platí pro všechny obrázky.

7. DESTILACE A REKTIKACE

Destilace je základní separační proces pro látky v kapalně fází. Principem destilace je výměna látek mezi kapalnou a parní fází, při stejné teplotě obou fází. Při této výměně látek se systém přibližuje rovnovážnému stavu, ve kterém je složení kapaliny a páry určeno fázovou rovnováhou.



Obrázek 53. Rovnovázný izobarický t-x-y diagram směsi A+B.

Rektifikace je proces opakované destilace, která probíhá ve vertikální koloně, kde při stupňovitém (patrové kolony) nebo spojitým kontaktu (plněné kolony) dochází k postupnému obohacování parní fáze o těkavější složku.

Zde se budeme zabývat pro jednoduchost dvousložkovými směsmi, složky označujeme **A**, resp. **B**, složka **A** je těkavější. Platí tedy $T_{bA} < T_{bB}$.

Destilace a rektifikace mohou probíhat jako přetržité, periodické procesy, nebo jako nepřetržité, kontinuální procesy.

Třídění destilačních procesů z pohledu provedení:

DESTILACE		
	kontinuální	periodická
jednostupňová	rovnovážná destilace	(diferenciální), vsádková destilace
vícetupňová	rektifikace	periodická rektifikace

Rovnováha kapalina pára:

Opakování z fyzikální chemie:

- dvousložkové soustavy, ideální chování
- platí Raoultův zákon,

$$y_A p = p_A^\circ(T) x_A, \quad (44)$$

$$y_B p = p_B^\circ(T) x_B, \quad (45)$$

kde p je tlak a $p_A^\circ(T)$, resp. $p_B^\circ(T)$ je tlak par čisté složky při teplotě T – jinak *tenze par*.

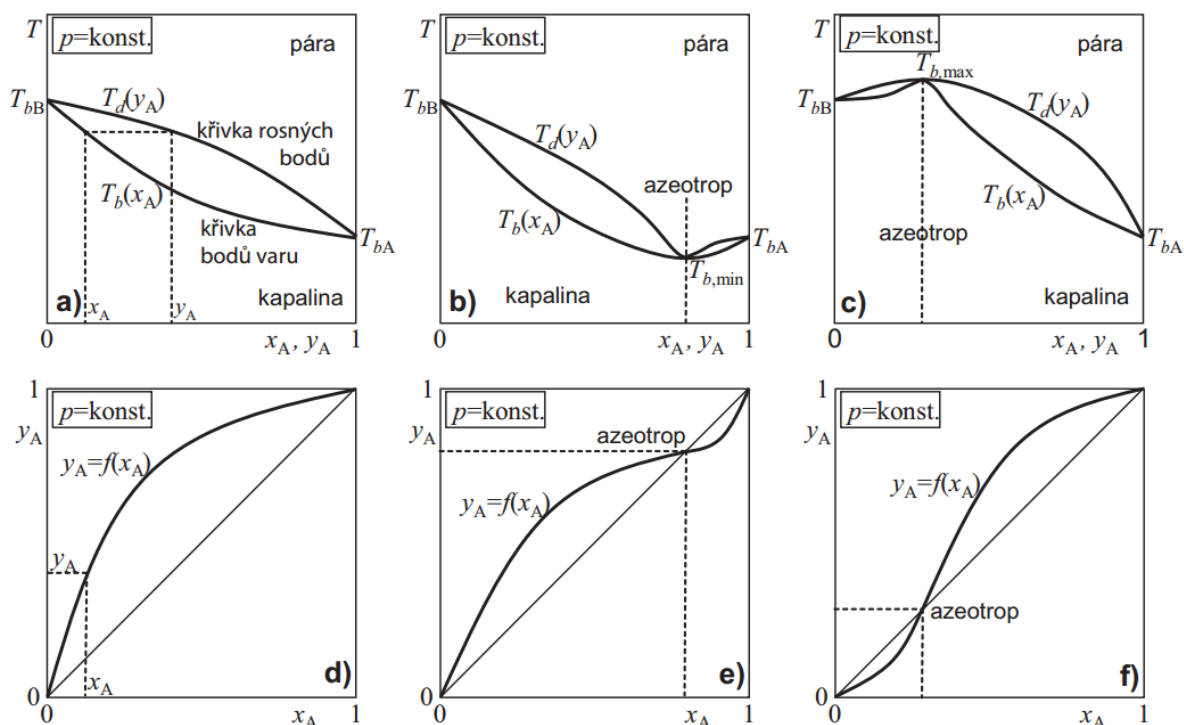
Dále pro molární zlomky platí:

$$x_B = 1 - x_A \text{ a } y_B = 1 - y_A. \quad (46)$$

- relativní těkavost složky A k složce B , $\alpha_{AB} = p_A^\circ(T)/p_B^\circ(T)$. Pomocí Raoultova zákona se dá vyjádřit

$$\alpha_{AB} = \frac{y_A/x_A}{y_B/x_B}. \quad (47)$$

- azeotropická směs - relativní těkavost je jen v určitém rozsahu koncentrací větší než 1. Směs, pro kterou je rovnovážné složení v kapalně a parní fázi stejné se nazývá azeotrop. Rektifikací azeotropických směsí získáme jednu téměř čistou složku a azeotrop.



Obrázek 54. Isobarické rovnovážné diagramy (převzato z HASAL P., SCHREIBER I., ŠNITA D., et al. Chemické inženýrství I. 2nd ed. Praha: VŠCHT Praha, 2007. P. 263. ISBN 978-80-7080-002-7).

Pro odhad hodnot tenze par čistých složek p_A° , p_B° při teplotě T je možné použít Antoineovu rovnici

$$\ln p_i^\circ = A_i - B_i/(T + C_i), \quad i = A, B. \quad (48)$$

Hodnoty konstant A_i , B_i , C_i jsou tabelovány v odborné literatuře.

Studenti by si měli uvědomit, že pro pochopení pochodů destilace a rektifikace by měli rozumět těmto základům z fyzikální chemie.

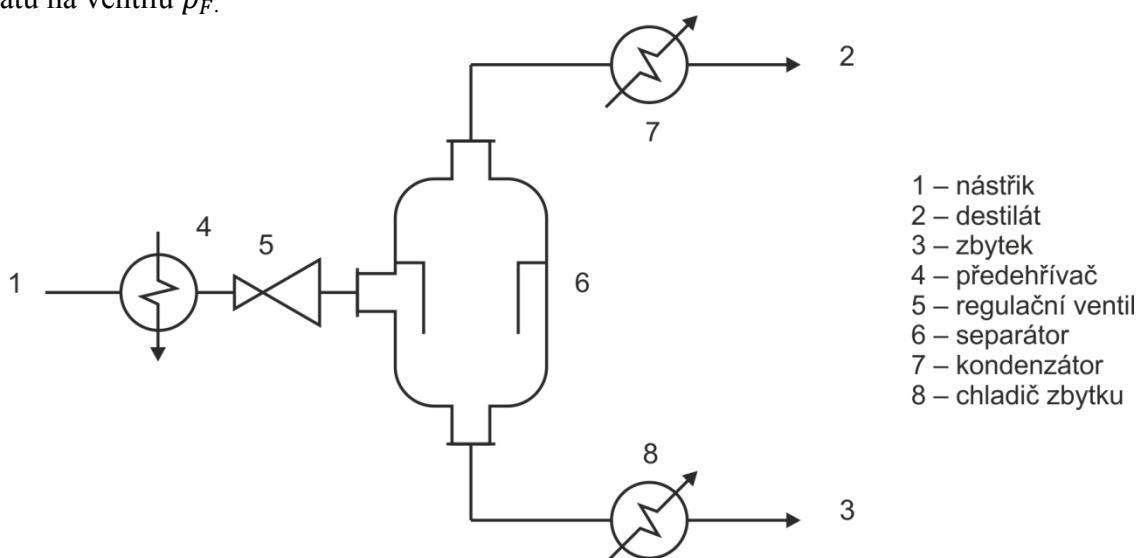
V praxi se vyskytují více reálné systémy, vícesložkové – speciální oblasti fyzikální chemie. Existují složité empirické vztahy a experimentálně naměřené hodnoty konstant pro počítačové zpracování.

Používá se v programech pro výpočet rektifikačních kolon.

Jednotlivé typy destilačních pochodů:

a) Rovnovážná, mžiková (angl. „flash“) destilace:

Jak bylo uvedeno v tabulce v úvodu, jedná se o jednostupňový proces. Zjednodušeně lze proces popsat takto. Nástřík o molárním průtoku \dot{n}_F a složení z_{AF} (molární zlomek složky A) se upraví v přehříváči na teplotu T_F a tlak se upraví na p_F . Fázovou separací za redukčním ventilem vzniká při tlaku p pára o průtoku \dot{n}_V a složení y_A a kapalina o průtoku \dot{n}_L a složení x_A . Pro úspěšné praktické provedení je potřeba nastavit teplotu nástříku T_F tlakovou ztrátu na ventilu p_F .



Obrázek 55. Schéma rovnovážné destilace.

Látková bilance: ustálený stav

$$\dot{n}_F = \dot{n}_L + \dot{n}_V \quad (49)$$

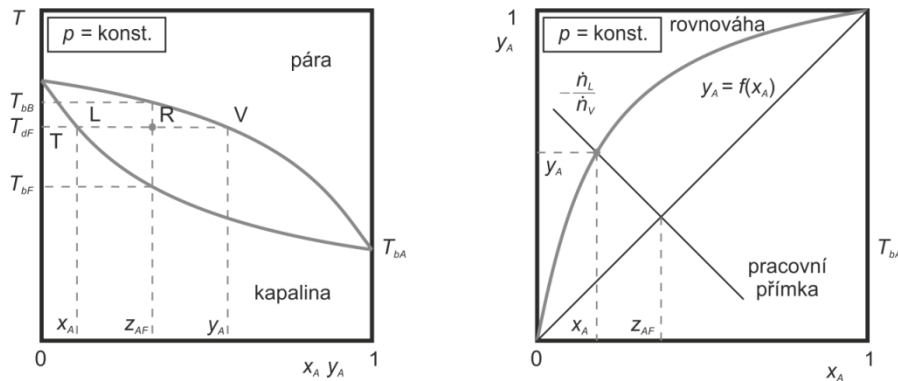
$$\dot{n}_F z_{AF} = \dot{n}_L x_A + \dot{n}_V y_A \quad (50)$$

Pokud máme zadané parametry nástříku, tlak v separátoru, průtoky výstupních proudů \dot{n}_L , \dot{n}_V (resp. jejich poměr) můžeme určit složení výstupních proudů a teplotu T . Řešíme graficky, s pomocí rozdělovacího diagramu $x_A + y_A$.

Řešením rovnic látkové bilance získáme rovnici *pracovní přímky*

$$y_A = z_{AF} - \frac{\dot{n}_L}{\dot{n}_V} (x_A - z_{AF}), \quad (51)$$

pracovní přímku zakreslíme do rozdělovacího diagramu tak, že prochází bodem z_{AF} , z_{AF} a má směrnici $-\dot{n}_L/\dot{n}_V$. Hledané složení výstupních proudů pak najdeme jako průsečík pracovní přímky a rovnovážné křivky. Teplotu odpovídající tomuto složení pak určíme pomocí rovnovážných dat.

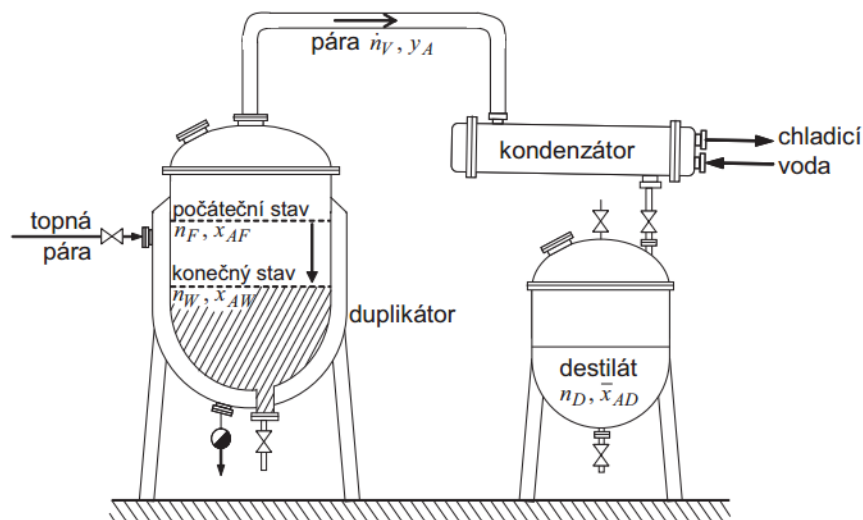


Obrázek 56. Znázornění mžikové destilace (podle předlohy z HASAL P., SCHREIBER I., ŠNITA D., et al. Chemické inženýrství I. 2nd ed. Praha: VŠCHT Praha, 2007. P. 263. ISBN 978-80-7080-002-7).

Mžiková destilace, diferenciální destilace, rektifikace

b) Vsádková, diferenciální destilace:

Druhým způsobem provedení destilace je vsádkové provedení, které je znázorněné na následujícím schématu.



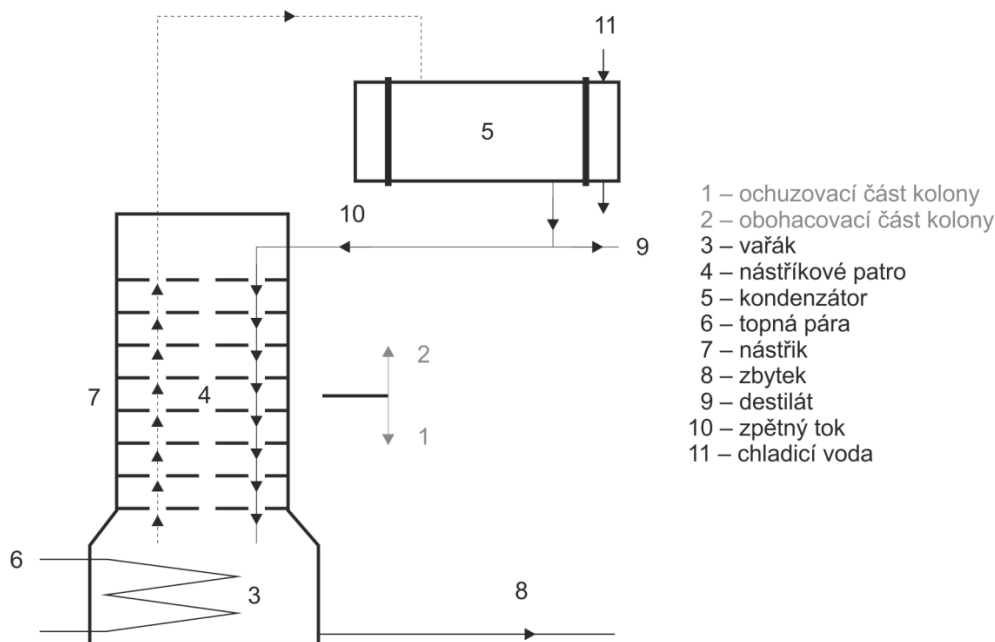
Obrázek 57. Zařízení pro vsádkovou destilaci (převzato z Šnita D.: Chemické inženýrství I. 1. vyd. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha 2006. ISBN 80-7080-589-7).

Do destilačního kotle se předloží vsádka velikosti n_F (látkové množství) s molárním zlomkem těkavější složky x_{AF} . Proces destilace začíná okamžikem, kdy je dosaženo bodu varu. Odváděné páry s průtokem n_V , složením y_A jsou po zkondenzování jímány v nádobě (nádobách) na destilát, v množství n_D s průměrným složením \bar{x}_{AD} . Teplota varu destilační vsádky stoupá během průběhu destilace v důsledku snižování obsahu těkavější složky.

Popis diferenciální destilace je složitější než v předcházejícím případě. Protože se jedná o neustálý proces, musí se použít pro bilance vyjádření v diferenciálním tvaru. Řešení vede k řešení integrační rovnice.

To je mimo rozsah tohoto kurzu.

c) **Kontinuální rektifikace:**



Obrázek 58. Patrová rektifikační kolona.

Základní schéma zařízení pro kontinuální rektifikaci je na Obrázek 58. Vlastní rektifikační kolony se podle konstrukce dělí na patrové kolony a plněné kolony.

V dalším budeme uvažovat patrové kolony, viz schéma. Nástřik s molárním průtokem \dot{n}_F a molárním zlomkem z_{AF} je přiváděný na nástřikové patro. Kapalná fáze stéká kolonou kaskádovitě z patra na patro, parní fáze stoupá vzhůru a probublává zádrž kapaliny na patře. Kapalina, která steče až na dno kolony, je částečně vypařena v rovnovážném vařáku a páry odcházejí zpět do kolony. Z paty kolony je odváděn kapalný zbytek o průtoku \dot{n}_W a složení x_{AW} .

Páry odcházející z nejvyššího patra jsou úplně zkondenzovány v tzv. *totálním kondenzátoru*. Kapalina z kondenzátoru má teplotu bodu varu a stejné složení jako pára odcházející z nejvyššího patra. Tento kapalný proud se dělí v definovaném poměru na *zpětný tok (reflux)*, který se vrací zpět na nejvyšší patro kolony (v množství \dot{n}_L) a *destilát*, který se odvádí po ochlazení jako produkt (v množství \dot{n}_D).

Jako další pojem budeme definovat *poměr zpětného toku R (reflexní poměr)* jako

$$R = \dot{n}_L / \dot{n}_D. \quad (52)$$

Fyzikální princip rektifikace spočívá v tom, že v rektifikační koloně dochází na každém patře k výměně složek mezi kapalnou a parní fází. Kapalina a pára odcházející z každého patra se přibližují fázové rovnováze. Na patro přichází kapalina o nižší teplotě než vstupující pára a při kontaktu těchto proudů se teploty vyrovnávají a při tom se stoupající pára je obohacována a stékající kapalina ochuzována o těkavější složku A.

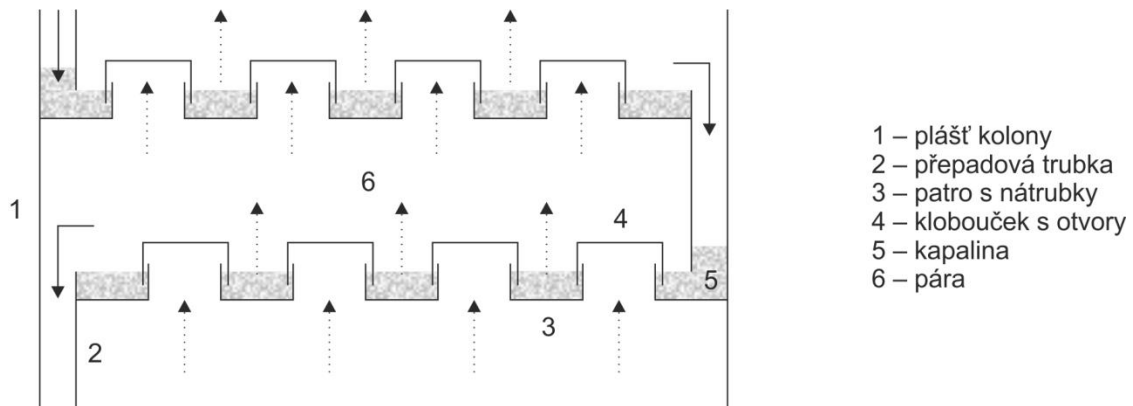
Část kolony nad nástřikovým patrem se nazývá *obohacovací část*, část kolony pod nástřikovým patrem se nazývá *ochudňovací část*.

Matematický popis rektifikace, bilance a jejich řešení jsou nad rozsah tohoto kurzu.

Jak již bylo řečeno, z hlediska konstrukce dělíme rektifikační kolony na patrové kolony a plněné kolony. U obou principů je cílem dosažení co nejefektivnějšího kontaktu kapalné a parní fáze.

U patrových kolon dochází ke kontaktu na tzv. patře, které udržuje zádrž kapalinu a pomocí různých mechanismů zintenzivňuje probublávání stoupajících par.

Jedním z principů je tzv. *kloboučkové patro*, princip je zřejmý z následujícího Obrázek 59:



Obrázek 59. Princip kloboučkového patra.

Obdobnou funkci má tzv. *ventilové patro* a další.

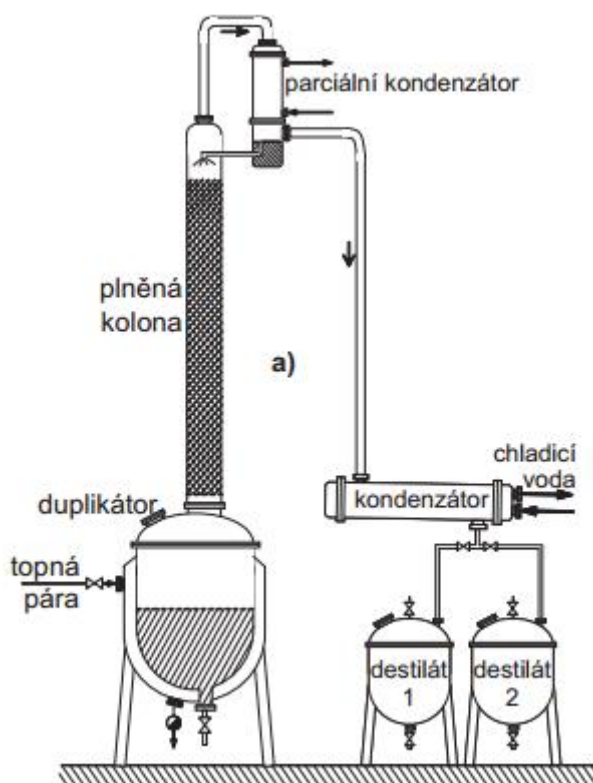
V plněných kolonách, na rozdíl od patrových, dochází ke kontaktu parní a kapalné fáze spojitě po celé výšce kolony, a sice na mezifázovém povrchu. Proto je cílem náplně dosažení největšího povrchu náplně, na kterém dochází ke kontaktu fází, stékající kapalné a stoupající parní fáze.

Podle typu náplně rozeznáváme náplň *sypanou* a *uspořádanou, strukturovanou*. Příklady náplní jsou na následujícím Obrázek 60, typy strukturovaných náplní jsou na prvních dvou řádcích, poslední obrázky.



Obrázek 60. Materiály výplně.

Jak bylo uvedeno v úvodu, kontinuální rektifikace je technologická operace využívaná v kontinuálních, velkokapacitních technologiích. V malotonážních výroбах, výroбах chemických specialit se spíše používá *vsádková destilace s rektifikací*.



Obrázek 61. Zařízení pro vsádkovou destilaci s rektifikací (převzato z Šnita D.: Chemické inženýrství I. 1. vyd. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha 2006. ISBN 80-7080-589-7).

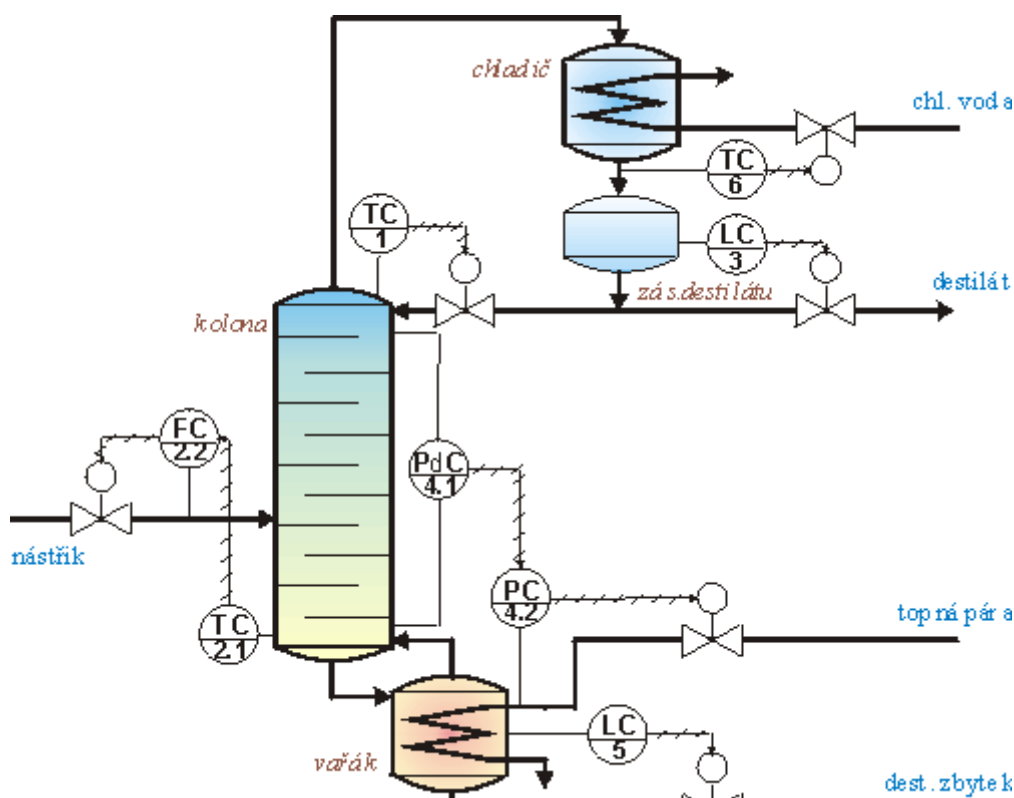
Rektifikační kolona se používá plněná, je zřejmé, že celá kolona pracuje jako obohacovací. Stejně jako u obyčejné vsádkové destilace, s časem se mění složení par přicházejících na hlavu kolony.

Konstantní složení destilátu lze dosáhnout řízením poměru zpětného toku (postupným zvětšováním).

Vsádkovou rektifikaci lze využít na dělení vícesložkových směsí. Odběr jednotlivých frakcí lze řídit podle teploty na hlavě kolony.

Pro informaci:

Složitost procesu rektifikace je ilustrována schématem regulace kontinuální rektifikace.



Obrázek 62. Schéma regulačních okruhů rektifikační kolony (převzato z <http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/F3/F3k39-prrs.htm>).

Funkce jednotlivých okruhů jsou tyto:

- *TC 1 regulace teploty v hlavě kolony prostřednictvím průtoku refluxu; teplota v hlavě kolony odpovídá bodu varu destilátu za daných podmínek a tím i jeho složení, takže jde vlastně o regulaci složení destilátu,*
- *TC 2.1 regulace teploty v patě kolony pomocí průtoku nástržiku jako pomocné regulované veličiny (FC 2.2); teplota v patě kolony odpovídá bodu varu destilačního zbytku a tím i jeho složení a nástržiku se dodává jen tolik, aby se udržoval dělicí poměr kolony na požadované hodnotě,*
- *LC 3 regulace hladiny v zásobníku destilátu ovládním odběru destilátu z kolony; odebírá se všechno destilát, který se nevrací jako reflux,*
- *PdC 4.1 regulace tlakového spádu na koloně intenzitou topení ve vařáku prostřednictvím tlaku páry v topné komoře vařáku jako pomocné regulované veličiny (PC 4.2); tlakový spád na koloně je ukazatelem optimálního zaplnění kolony,*
- *LC 5 regulace hladiny destilačního zbytku ve vařáku pomocí odběru zbytku z kolony,*
- *TC 6 regulace teploty destilátu za chladičem pomocí průtoku chladicí vody.*

Dnes jsou výše uvedené regulační obvody většinou začleněny do vyššího počítačového řídicího systému, který automaticky nastavuje žádané hodnoty regulovaných veličin podle složitých algoritmů založených na využití hmotnostních a energetických bilancí, optimalizačních metodách apod. Takový systém také průběžně analyzuje stav kolony, sleduje nežádoucí výkyvy a odchylky, hlídá mezní hodnoty atd. Výkon kolony také bývá koordinován s předcházejícími a následujícími technologickými operacemi.

8. EXTAKCE, SUŠENÍ

8.1. Extrakce

Extrakce je separační metoda založená na předpokladu, že jedna nebo více kapalných nebo pevných látek, které chceme separovat, se rozpouští v kapalině, která se s původní směsí nemísí, nebo se mísí jen omezeně.

Používá se v chemickém, petrochemickém, farmaceutickém a potravinářském průmyslu.

Studenti si jistě dokáží představit řadu příkladů z jednotlivých průmyslových odvětví.

V poslední době se často používá tzv. superkritická extrakce, kdy se místo kapalného extrakčního činidla používá plyn v nadkritickém stavu.

Proces, při kterém se extrahuje pevná látka kapalinou, se označuje jako *vyluhování*. Typickým příkladem použití je extrakce léčivých látek z rostlin ve farmaceutickém průmyslu.

Pojmy:

- extrahovaná látka
- rozpouštědlo, ve kterém je extrahovaná látka rozpuštěná (v případě extrakce z tuhé fáze je to inertní součást tuhé fáze)
- extrakční činidlo
- extrakt, rafinát

Označíme:

A – extrahovaná složka (ta, kterou chceme separovat z původní směsi)

C – původní rozpouštědlo (v případě extrakce z pevné fáze inert)

F – surovina (obsahuje A a C)

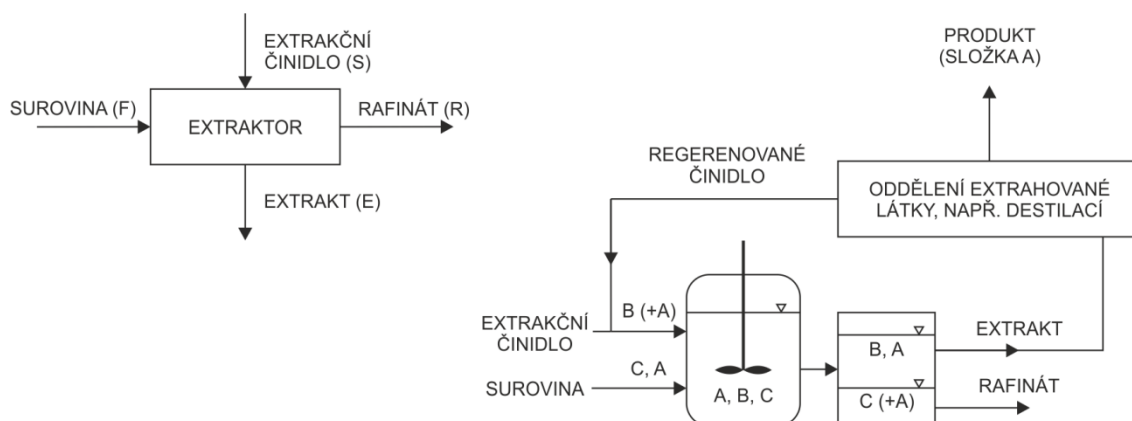
S – extrakční činidlo

B – přidávané rozpouštědlo, tvoří složku S (v případě, že používáme regenerované rozpouštědlo je v S obsažena i složka A)

E – extrakt (převážně přidávané rozpouštědlo B a extrahovaná složka A)

R – rafinát, převážně původní rozpouštědlo C (resp. inert pevné fáze)

Extrakce kapalina – kapalina s dokonale nemísitelnými rozpouštědly:



Obrázek 63. Princip kapalinové extrakce.

předpoklady

- vsádkový proces, dvě varianty
 - o jednostupňový
 - o vícestupňový s opakovaným přívodem čerstvého rozpouštědla
- obě fáze jsou po skončení procesu vzájemně v rovnováze
- obě fáze jsou po skončení procesu dokonale separovány
- základní komponenty obou fází - rozpouštědlo a extrakční činidlo nemohou přecházet do druhé fáze

Surovina F a extrakční činidlo se smíchají v extraktoru. Po předepsané době kontaktu se oddělí extrakt E od rafinátu R.

Z extraktu se separovaná složka A získá např. odpařením rozpouštědla, rozdestilováním směsi...

Fázová rovnováha sloužící k popisu procesu extrakce udává vzájemnou rozpustnost všech tří složek A, B, C. Předpokládáme vzájemnou nerozpustnost složek B a C, rovnováha určuje rozdělení extrahované složky A mezi původní rozpouštědlo C a přidávané rozpouštědlo (extrakční činidlo) B.

Rovnovážná data se dají nalézt v odborné literatuře, nebo se dají naměřit experimentálně.

Způsob vyjádření fázové rovnováhy:

- y = molární (u - hmotnostní) zlomek extrahované složky v extraktu (obsahuje extrakční činidlo a extrahovanou složku)
- x = molární (w - hmotnostní) zlomek extrahované složky v rafinátu (obsahuje původní rozpouštědlo resp. inertní (nerozpustnou) tuhou fázi)

Častěji se používá hmotnostní vyjádření, takže budeme používat u resp. w nebo U a W , při použití vyjádření pomocí relativních hmotnostních zlomků (*studenti zapátrají ve své paměti – co je relativní zlomek*)

Naměřená rovnovážná se prezentují v tabulkové formě, nebo přepočítána na funkční závislost

$$u^* = f(w^*), \text{ kde } * \text{ značí rovnovážná data.} \quad (53)$$

Bilance jednostupňové extrakce:

Budeme uvažovat nejjednodušší příklad, jednostupňová extrakce, nemísitelná rozpouštědla.

- látková bilance, molární zlomky x , y
- *předpoklad* extrakční činidlo neobsahuje extrahovanou složku A ($y_{S1} = 0$)
- bilancovaný systém

extrahované složky A

$$n_F x_F = n_{E1} y_1 + n_{R1} x_1, \quad (54)$$

extrakčního činidla B

$$n_{S1} = n_{B1} = n_{E1} (1 - y_1), \quad (55)$$

rozpouštědla C

$$n_F(1 - x_F) = n_{R1}(1 - x_1) = n_C, \quad (56)$$

Zadáno:

- množství a složení nástřiku n_F, x_F
- množství extrakčního činidla n_{S1}

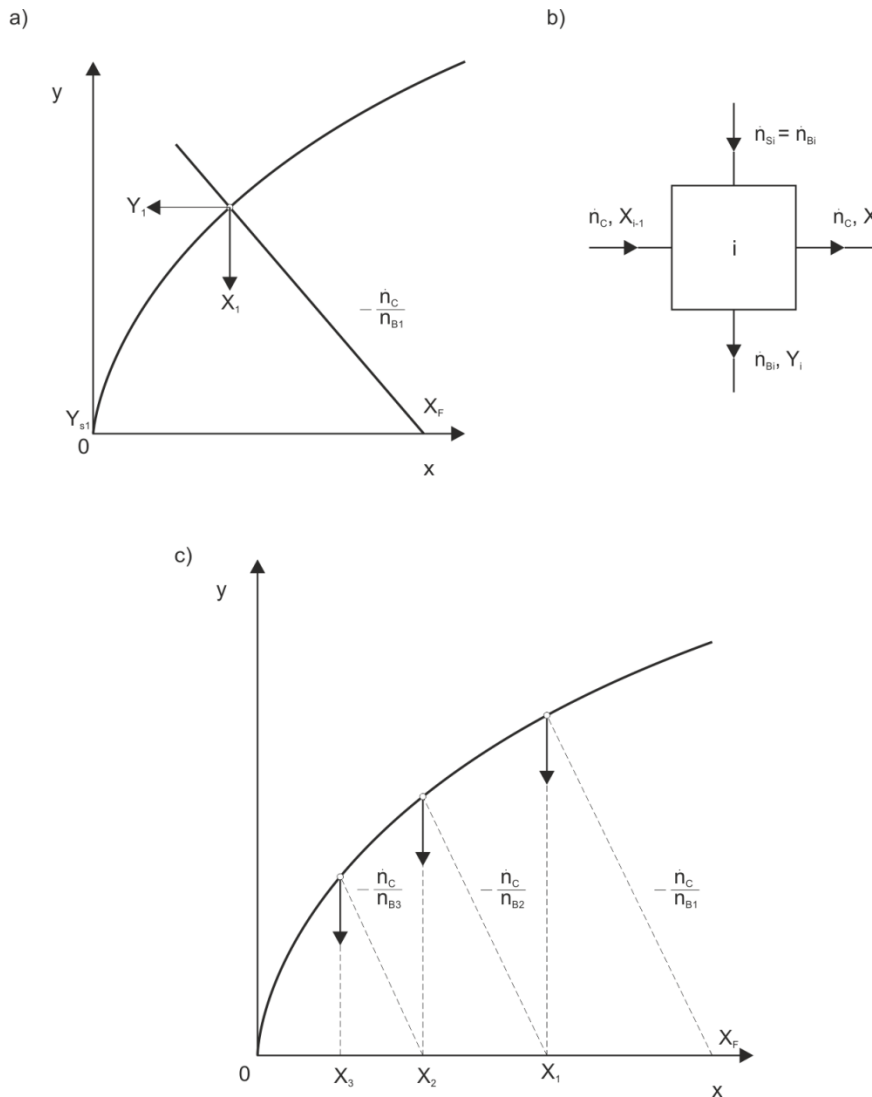
zbývají čtyři neznámé, máme tři rovnice.

Dodatečný vztah – rovnováha $y = F(x)$, ve formě rovnovážného využijeme při grafickém řešení.

Úpravami (vyjádření pomocí relativních zlomků) dostaneme

$$Y_1 = X_1 + (n_C/n_{B1})X_F. \quad (57)$$

Rovnice přímky, směrnice $-(n_C/n_{B1})$, pro $Y_1 = 0$ prochází bodem X_F



Obrázek 64. a) Grafické řešení jednostupňové extrakce a nemísitelnými rozpouštědly; b) Opakovaná extrakce – i-tý člen; c) Grafické řešení opakované extrakce.

Na předcházejících obrázcích je znázorněno grafické řešení, na Obrázek 64a řešení jednostupňové extrakce.

Na Obrázek 64b je poté znázorněn případ opakované extrakce, to znamená, že k původní násadě se postupně přidávají další dávky čerstvého extrakčního činidla.

Extrakce z tuhé fáze / vyluhování:

- neplatí předpoklad dokonalé nemísitelnosti
- tuhá fáze porézní, nelze dokonale oddělit tuhou a kapalnou fází.

Do bilancí se zavádí parametr ε = kg extrakčního činidla/kg inertu tuhé fáze.

Farmacie, léčivé rostliny, živočišné tkáně

Potravinářství

Historie - barvářství

Extrahovaná látka – součást stavby rostlinné/živočišné tkáně

Transport na povrch – extrakce do rozpouštědla

Intenzifikace –

- mechanické narušení – mletí, řezání
- vlhčení / bobtnání (narušení buněčných stěn)

Způsoby provedení:

- macerace
- digesce (za tepla)
- perkolace

Macerace: předvlhčený materiál se v extraktoru převrství rozpouštědlem, extrakčním činidlem a ponechá se stanovenou dobu vyluhovat.

Macerace může být jednostupňová nebo vícestupňová, v tomto případě se extrakční činidlo periodicky obměňuje.

Digesce proces probíhá za tepla.

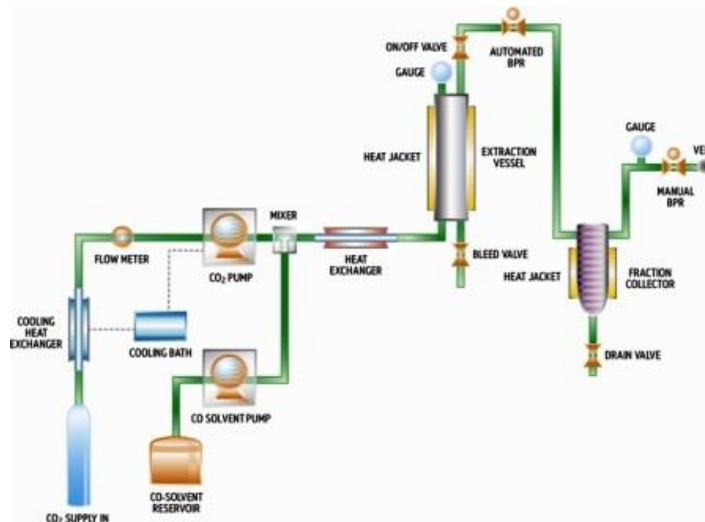
Perkolace: předvlhčený materiál se nejdříve maceruje a po určité době se začne extrakční činidlo odpouštět a zároveň se připouští rozpouštědlo čerstvé.

Tato metoda se může provozovat jako vsádkový nebo kontinuální proces (karuselový extraktor).

Superkritická extrakce:

Velmi zjednodušeně: tato metoda využívá vlastnosti plynů v tzv. nadkritické oblasti (SFC), tj. že plyn se za těchto podmínek (tlak, teplota) chová jako kapalina, může se tedy využít jako extrakční činidlo.

Z extraktu se po uvolnění tlaku získá přímo extrahovaná látka.



Obrázek 65. Superkritická extrakce (převzato z http://www.waters.com/waters/en_CZ/Supercritical-Fluid-Extraction-%28SFE%29-Systems/nav.htm?cid=10146521&xcid=x3105&locale=en_CZ)

Využití:

- Farmacie – nejen jako izolace, ale technologie využívající SCF i pro získávání látek se specifickou distribucí velikosti částic.

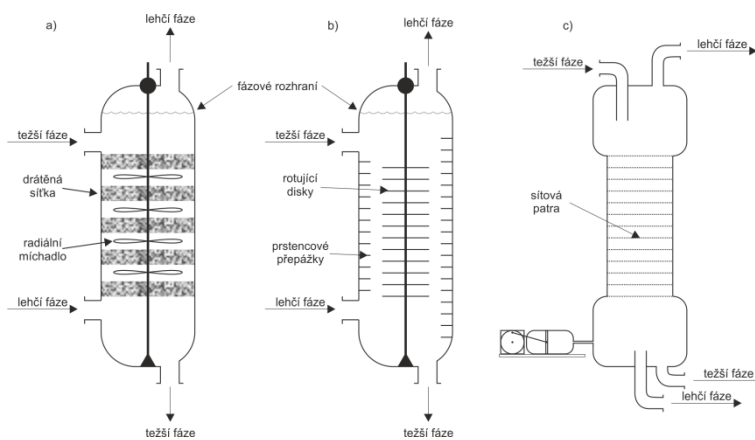
- Potravinářství:

- různé technologie od kávy bez kofeinu, sušený žloutku bez cholesterolu...
- extrakty z koření
- chmelový extrakt – (velký byznys)

(globalizovaný světový trh – nepřevážíme velké objemy chmele, koření... ale malé objemy extraktů)

Zařízení:

- kapalina – kapalina
 - vsádkové: míchaná nádoba, nejdřív se obě nemísitelné kapalné fáze smíchají, pak se nechají rozdělit
 - kontinuální



Obrázek 66. Kolonové extraktory; a) Scheibel, b) RDC, c) pulsační.

- tuhá látka kapalina
 - vsádkové
 - kontinuální



Obrázek 67. Příklad zařízení fy Samtech Extraktionstechnik GmbH, Kompletní zařízení, vsádková extrakce, regenerace rozpouštědla (převzato z www.samtech.at)

K regeneraci rozpouštědla je použita filmová odparka se stíraným filmem.

8.2. Sušení

- obecně děj, při kterém se odstraňuje kapalina obsažená v materiálu
- odstraňovaná kapalina = vlhkost, materiál, který sušíme = vlhký materiál

možnosti:

- mechanický: filtrace, odstředování, lisování
- fyzikálně – chemický: extrakce, absorpce
- tepelný: odpařování, kondenzace

k odpaření kapaliny z pevného materiálu je nutné dodat energii, podle toho

- kontaktní
- mikrovlnné – energie
- radiální – infračervené záření
- konvekční

V technologiích výroby čistých chemikálií resp. léčivých látek se nejčastěji využívají kontaktní nebo konvenční způsoby ohřevu.

Kontaktní – potřebná tepelná energie se dodává vedením, např. sušený materiál se umístí na vyhřívané plochy

Konvekční – sušený materiál je v přímém kontaktu se sušeným materiálem, cirkulující ohřátý vzduch, teplovzdušné sušárny.

Podle režimu sušení rozlišujeme vsádkové sušárny a kontinuální sušárny.

Sušený materiál je buď v klidu, nebo promíchávaný.

značení: A - odpařovaná kapalina, vlhkost

B - suchý plyn

C - suchá tuhá látka

Vlastnosti vlhkého vzduchu, vlhký teploměr

Teorie sušení rozpracovaná na systémy odpařovaná kapalina = voda, sušící plyn = vzduch

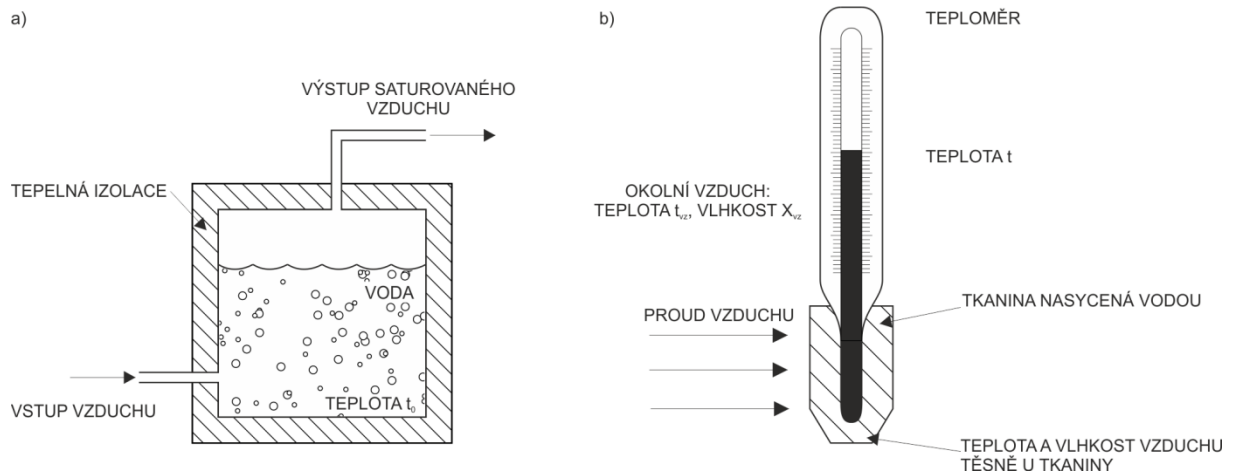
Opakování z fyzikální chemie:

Pojmy: Teplota adiabatického nasycení,

Teplota vlhkého teploměru,

Vlhkost vzduchu

$$U_A = m_A/m_B \quad (58)$$



Obrázek 68. a) teploty adiabatického nasycení; b) teploty vlhkého teploměru.

Vlastnosti sušeného materiálu

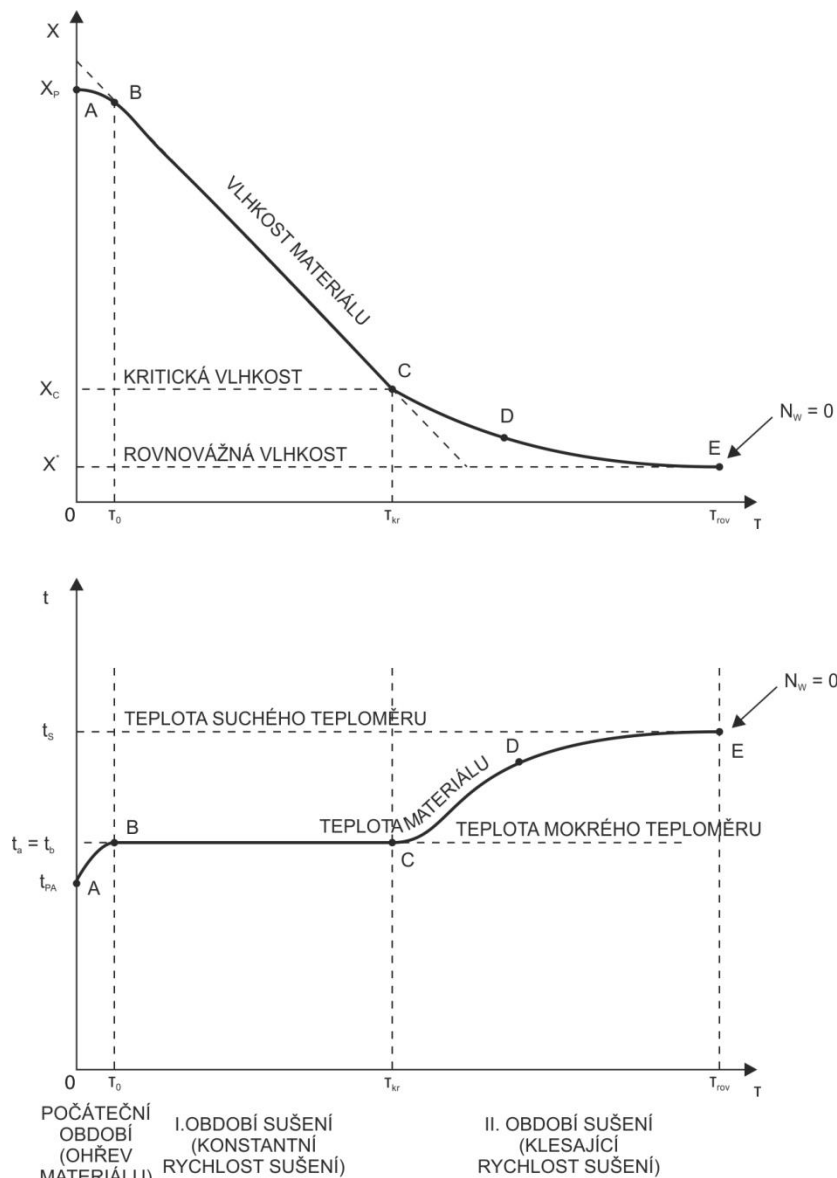
Vlhkost materiálu

$$W_A = m_A/m_C \quad (59)$$

Různá kritéria dělení vlhkosti:

- nevázaná: jen energii na odpaření,
- vázaná: kapilární efekt, adsorpce, chemicky. Navíc energie na porušení vazby
- volná: lze za daných podmínek odstranit
- rovnovážná: při daných podmínkách v materiálu zůstává, je závislá na vlastnostech sušícího vzduchu a sušeného materiálu

Popis průběhu sušení



Obrázek 69. Kvalitativní průběh závislosti obsahu vlhkosti v materiálu X a teploty t nadobě sušení τ .

Provedme nyní kvalitativní popis procesu sušení. Pro jednoduchost si představme, že budeme sušit jen jednu částici vznášející se v proudu sušícího vzduchu, který bude mít neměnné parametry (teplota, vlhkost) a bude proudit kolem částice konstantní rychlostí, třeba směrem vzhůru a rychlostí rovnou právě sedimentační rychlosti částice. Budeme dále předpokládat, že částice obsahuje jak nevázanou, tak vázanou vodu a materiál částice je celý pokryt tenkou vrstvou vody. Počáteční vlhkost částice má hodnotu X_p a teplota částice na počátku našeho děje je t_p . Z našeho hlediska je děj sušení periodický (alespoň tak to budeme v laboratoři provádět), takže si představíme, že v okamžiku $\tau = 0$ hodíme takovou částici s výše popsanými parametry (X_p, t_p) do proudu vzduchu s parametry ($t > t_p$ a $Y_A < Y_{Ai}$). Začne probíhat proces sušení. Pokud bychom měli možnost zjišťovat vlhkost částice a její teplotu v závislosti na čase, pak bychom kvalitativně dospěli k průběhům, které jsou zobrazeny na Obrázek 69.

Celý děj sušení lze rozdělit na tři období.

1. Počáteční období

Jakmile vznikne gradient teploty, částice se začne ohřívat z původní teploty t_p na teplotu vyšší, zároveň se z povrchu částice začne odpařovat vlhkost. Hybné síly dějů sdílení tepla a hmoty budou nenulové a začne klesat hodnota koncentrace vlhkosti v částici z hodnoty X_p na hodnotu nižší po úseku křivky sušení ($X = X(\tau)$) od bodu A k bodu B. Odpařováním vody z povrchu se bude zpomalovat proces nahřívání částice, neboť na odpaření se spotřebovává teplo dodávané ze sušícího vzduchu. Toto počáteční období je poměrně krátké.

2. I. období sušení (období konstantní rychlosti sušení)

Opustili jsme částici v podmínkách odpovídajícím bodu B na obou částech Obrázek 69. V tomto bodě dosáhla částice teploty adiabatického nasycení (pro systémy voda-vzduch je tato teplota rovna teplotě mokrého teploměru). V tomto stavu se teplota částice nebude měnit a všechno teplo dodávané sušícím vzduchem se bude spotřebovávat na odpařování nevázané vody z částice. Hybné síly v rovnicích budou neměnné a tudíž i rychlost sušení N_w bude konstantní ($dX/d\tau = \text{konst.}$; $X = X(\tau)$ je přímka). Tenze par vlhkosti nad povrchem materiálu bude v tomto období stejně velká jako tenze par nad čistou vodou o stejné teplotě t_a . Přesouváme se postupně z bodu B do bodu C křivky sušení. Hodnota vlhkosti v tomto bodě je rovna kritické vlhkosti X_C .

3. II. období sušení (období klesající rychlosti sušení)

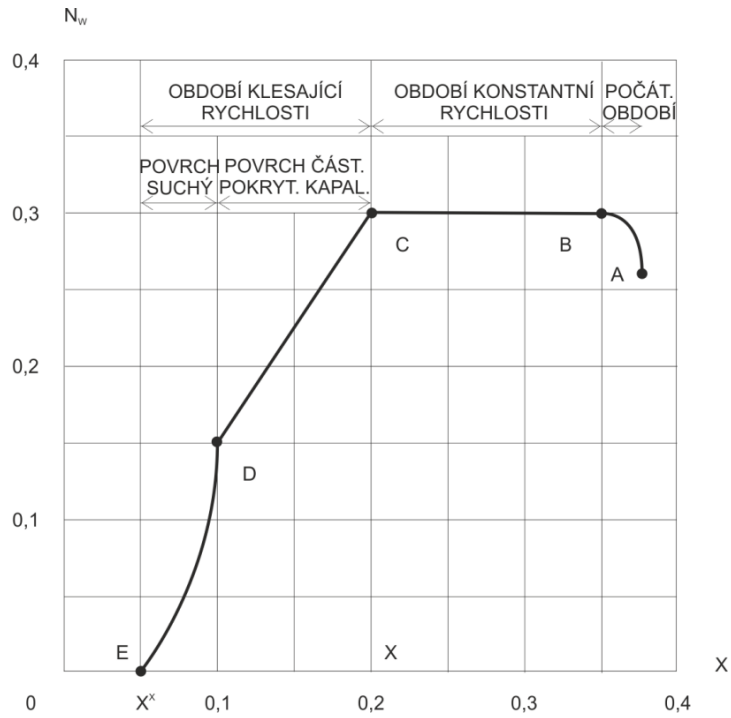
V okamžiku dosažení bodu C vyschne první část povrchu sušené částice a rychlost sušení se začne snižovat. Částice sama se začne ohřívat a její teplota se zvýší nad teplotu mokrého teploměru. Tím klesá hybná síla děje sdílení tepla a zpomaluje se i sdílení hmoty (snižují se hodnoty P_{Ai} a Y_{Ai}). V bodě E dosáhne teplota částice teploty sušícího vzduchu t_s a vlhkost částice je rovna rovnovážné vlhkosti X^* . Děj sdílení tepla a hmoty se zastavuje $N_w = 0$, částici nelze v daném prostředí vysušit více.

Tyto zákonitosti, které jsme popsali pro jednotlivou částici, platí i pro soubory částic tj. sypké materiály.

V I. období sušení závisí rychlost sušení na teplotě, vlhkosti a hmotnostním průtoku vzduchu, ale nezávisí na druhu, výšce vrstvy a okamžité vlhkosti materiálu.

Křivku sušení tj. závislost $X = X(\tau)$ je prakticky vždy pro daný materiál a podmínky sušení nutno stanovit experimentálně. Z takto získané závislosti je možno určit závislost rychlosti sušení na obsahu vlhkosti v materiálu (křivka rychlosti sušení $N_w = N_w(X)$). Ukázka typického průběhu této křivky je na Obrázek 70.

Zde můžeme opět rozlišit tři období sušení tj. počáteční, I. a II. období sušení. V I. období tzv. období konstantní rychlosti sušení nabývá rychlost sušení N_w nejvyšší hodnoty pro dané podmínky sušení nezávisle na vlastnostech materiálu.



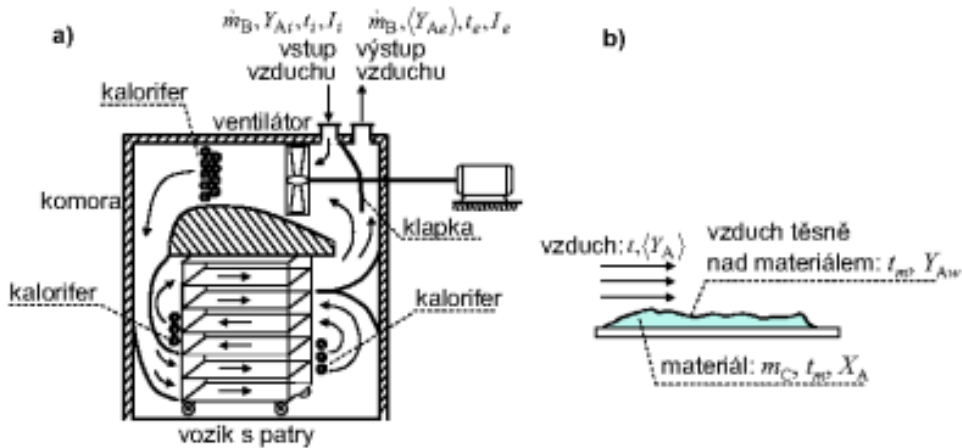
Obrázek 70. Závislost rychlosti sušení na obsahu vlhkosti materiálu (křivka rychlosti sušení).

Druhy sušáren:

Schematické znázornění některých typů sušáren:

Periodická konvekční sušárna:

Sušený materiál – vsádkově
 Sušící vzduch – kontinuálně

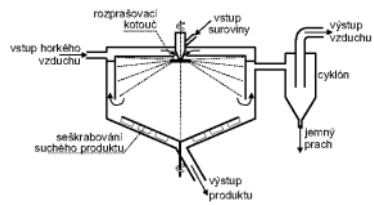


Obrázek 71. a) Komorová vsádková sušárna; b) Schéma sušení materiálu ve vsádkové sušárně (převzato z Šnita D.: Chemické inženýrství I. 1. vyd. VŠCHT v Praze, Praha 2006. ISBN 80-7080-589-7).

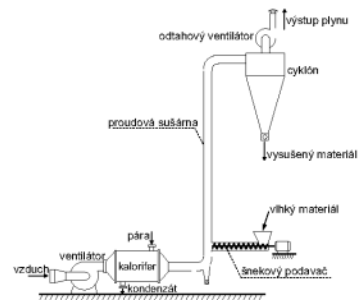
Rozprašovací sušárna

- kontinuální, konvekční

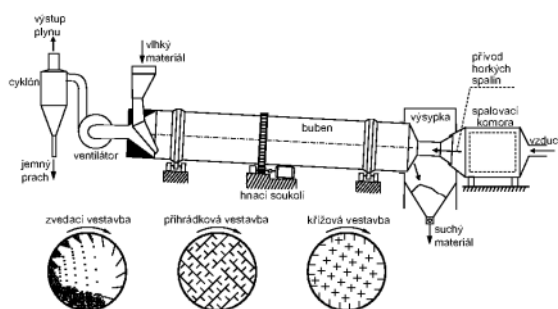
a)



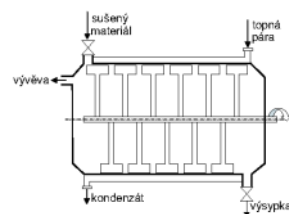
b)



c)



d)



Obrázek 72. Typy sušáren; a) rozprašovací; b) proudová pneumtická; c) rotační bubnová s ukázkami vestavby bubnu; d) lpatková (převzato z Šnita D.: Chemické inženýrství I. 1. vyd. VŠCHT v Praze, Praha 2006. ISBN 80-7080-589-7).

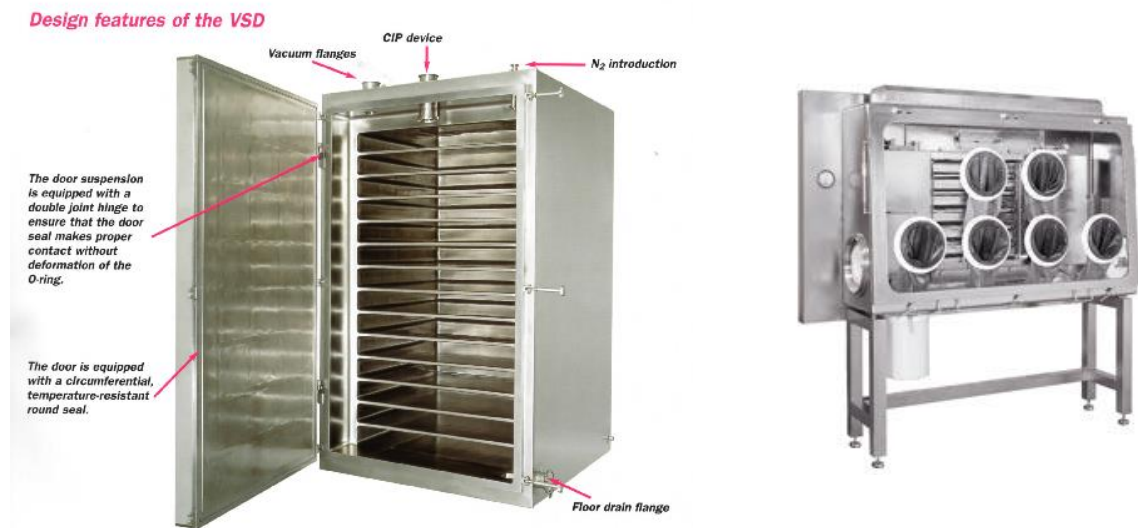
Další ukázky sušáren:

Typy sušáren používané při výrobě API:

- zařízení omezující manipulaci obsluhy s produktem, sušící fitr, sušící odstředivka SULTRADE, WALDNER – nádoba sušárny jako kontejner
- vakuové sušárny:
 - o skříňové, EUROVENT (Každá police zvlášť) ITALVACUUM PINK, kombinace teplovzdušná vakuová,
 - o míchané ROSENMUND ITALVACUUM, planetární systém
- teplovzdušné PINK, uzavřený okruh, snížení VOC

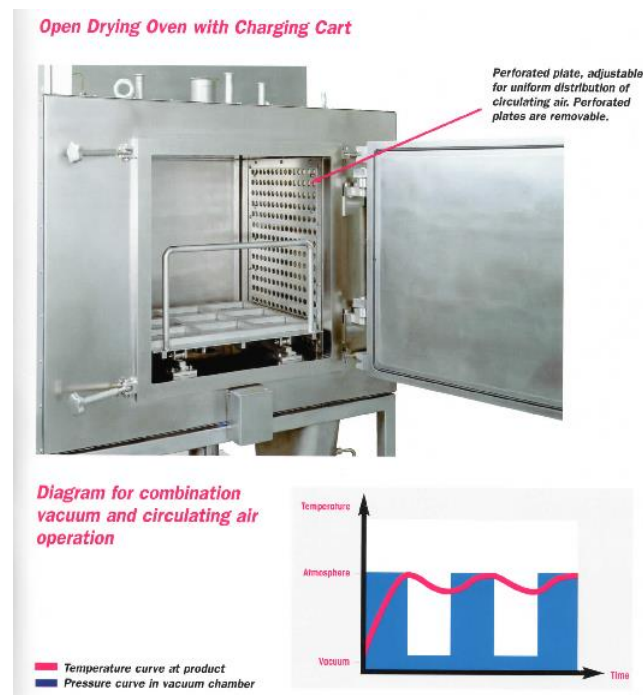
Příklady sušárny fy PINK:

- a) vakuová sušárna, kontaktní, vyhřívané police. Vakuová sušárna s izolátorem (rukávovým boxem) pro pracování vysoce účinných léčivých látek.



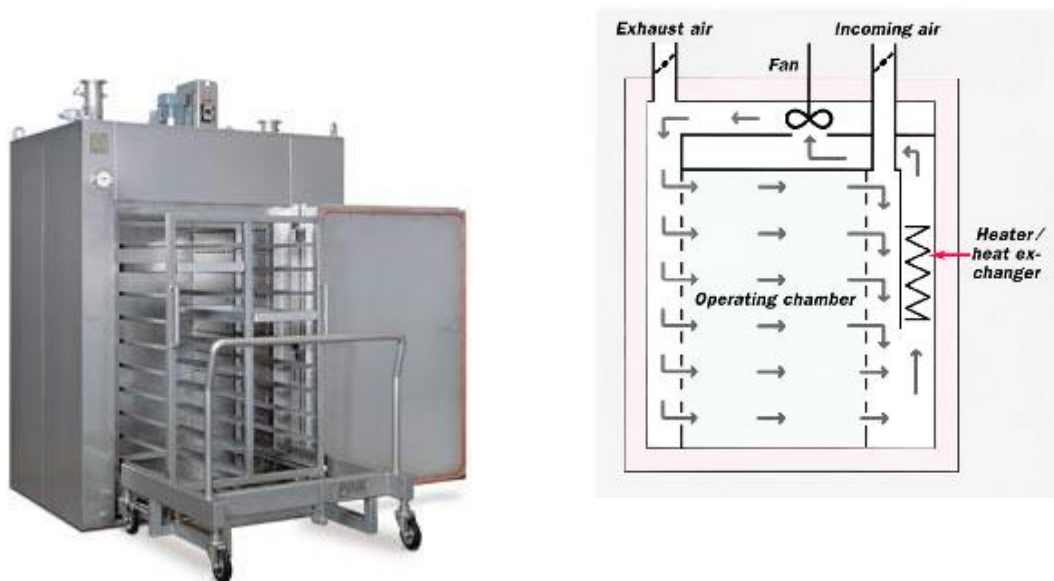
Obrázek 73. Vakuová sušárna (převzato z www.pink.de).

- b) Kombinace vakuové a teplovzdušné sušárny: materiál se vyřeje cirkulujícím teplým vzduchem a pak se prostor sušárny vyvakuuje. Tento cyklus se opakuje.



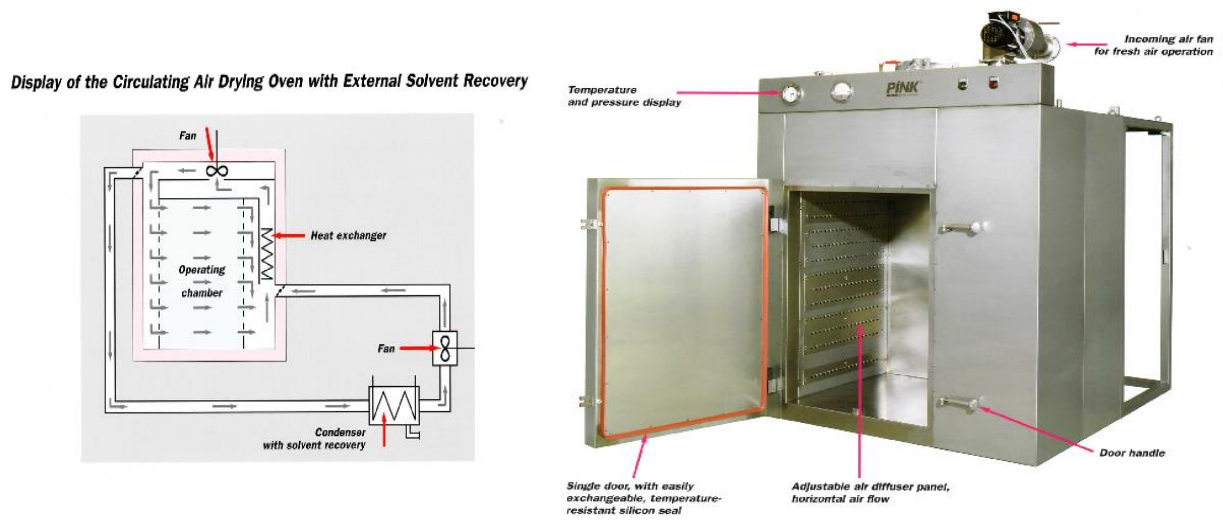
Obrázek 74. Kombinace vakuové a teplovzdušné sušárny (převzato z www.pink.de).

c) Teplovzdušná sušárna



Obrázek 75. Teplovzdušná sušárna (převzato z www.pink.de).

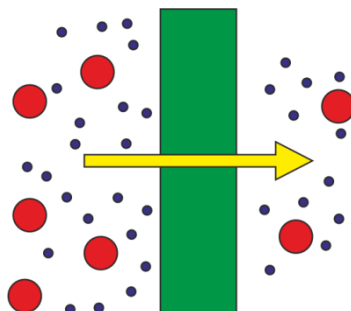
d) Teplovzdušná sušárna se systémem regenerace rozpouštědla



Obrázek 76. Teplovzdušná sušárna se systémem regenerace rozpouštědla (převzato z www.pink.de).

9. MEMBRÁNOVÉ PROCESY

Obsáhlá, různorodá problematika, široké uplatnění v praxi (výroba pitné vody – odsolení mořské vody, příprava čisté vody ve farmaceutickém průmyslu, membránové sušení plynů, dělení azeotropických směsí pervaporací, dialyzační procesy...)



Problematika membránových technologií je velmi rozsáhlá, zabývá se jednak charakterizací a přípravou membrán, jednak mechanismy transportu hmoty membránou. Na tomto místě jenom základní poznatky.

Membránové technologie se používají k separaci složek tekutých homogenních nebo heterogenních směsí (kapalných roztoků a směsí, plyných směsí, suspenzí pevných částic v kapalině), v případě suspenzí pevných částic v oblasti částic mikroskopických rozměrů (řádově mikrony).

Při dělení se směs přivádí na vstupní stranu membránového modulu, působením hybné síly (tlakový rozdíl, koncentrační rozdíl, elektrický potenciál) procházejí (*permeují*) některé nebo všechny složky směsi membránou a tak vzniká jeden produkt membránového dělení – *permeát*. Část původní směsi zadržena nad vstupním povrchem membrány tvoří druhý produkt – *retentát*.

Pojmy: permeát, retentát

Princip a třídění membránových separačních procesů:

- do membrány vstupují a membránou procházejí všechny složky dělené směsi,
- do membrány vstupují a membránou procházejí některé složky, ostatní jsou úplně zadrženy

Prostup materiálu membránou závisí od složení dělené směsi a vlastností membrány.

Membrána porézní

Membrána neporézní

Hybné síly:

Tlakový resp. koncentrační rozdíl, elektrické pole.

Pro jednotlivé membránové technologie jsou parametry znázorněny v tabulce:

Proces	Retentátová fáze	Permeátová fáze	Hybná síla
Mikrofiltrace	kapalina [*])	kapalina [*])	Δp
Ultrafiltrace	kapalina [*])	kapalina [*])	Δp
Nanofiltrace	kapalina [*])	kapalina [*])	Δp
Reversní osmóza (hyperfiltrace)	kapalina	kapalina	Δp
Separace plynů	plyn	plyn	Δp_i
Pervaporace	kapalina	plyn	Δc_i
Dialýza	kapalina	kapalina	Δc
Osmóza	kapalina	kapalina	Δc
Elektrodialýzy	kapalina	Kapalina	$\Delta \phi$

Typy membrán

Biologické: mikrobiální, rostlinné a živočišné buňky.

Syntetické:

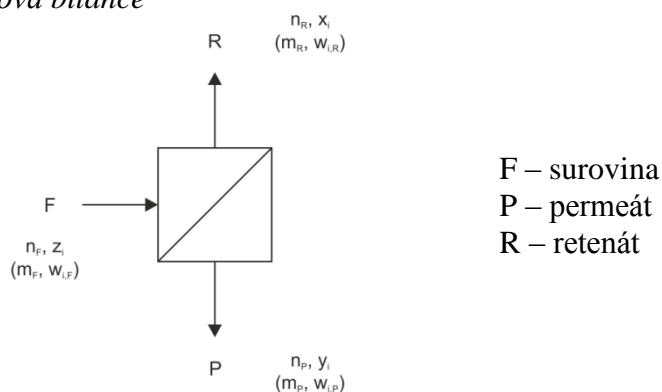
kapalné – zakotvená kapalná membrána, emulzní kapalná membrána

pevné:

- anorganické – kovové, křemičité materiály
- organické – polymerní materiály

Membrány se uspořádávají do membránových modulů: planární modul, spirálový modul, kapilární trubkový modul.

Materiálová bilance



(studenti si doplní bilanci proudů, bilanci látkového množství látky i)

Jednotlivé typy membránových separačních procesů:

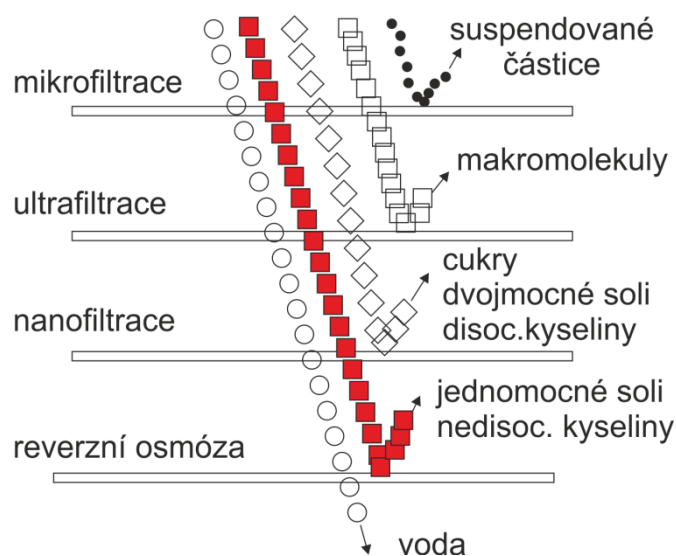
Mikrofiltrace, ultrafiltrace, nanofiltrace:

Hybná síla – tlakový rozdíl

Mikrofiltrace – oddělují se částice 0,01 – 10 mikronů,

Ultrafiltrace – dělení směsí rozpuštěných makromolekulárních látek, na základě rozdílných velikostí molekul

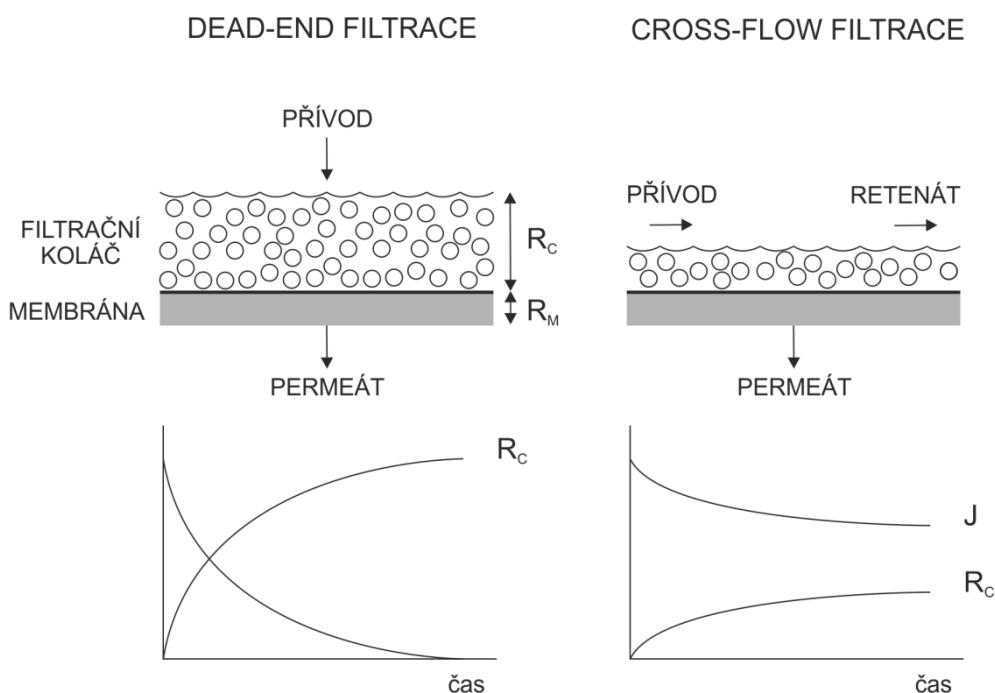
Nanofiltrace – pevné částice 1 – 10 nm. Dají zachytit vícemocné kationy od jednomocných – změkčování vody.



Obrázek 77. Schematické znázornění mikrofiltrace, ultrafiltrace, nanofiltrace a reverzní osmózy.

Způsoby uspořádání toku proudů při membránových filtračních technologiích:

- podélný, tangenciální tok retentátového proudu (cross flow filtration)
- uzavřený výstup retentátu (dead-end filtration)

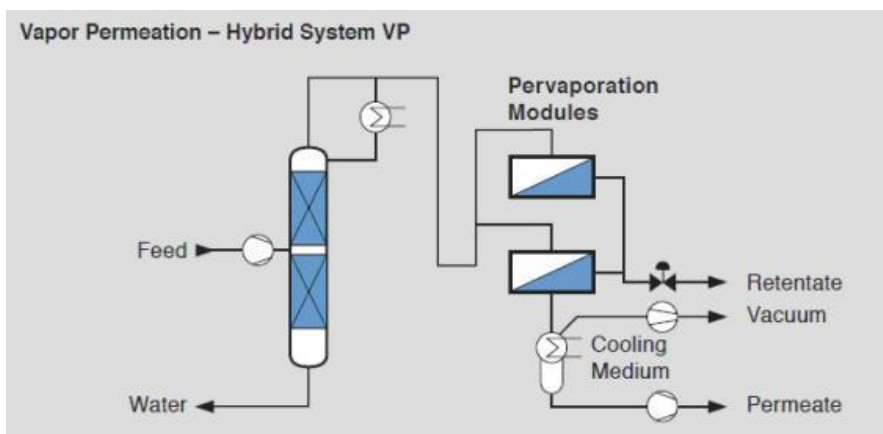


Obrázek 78. Srovnání Dead-End filtrace a Cross-Flow filtrace.

Pervaporace

Hnací síla – rozdíl koncentrace

Dělená kapalná směs se na vstupu zahřeje k bodu varu směsi (při daném tlaku), přivede se na retentátovou stranu membrány. Složky směsi se rozpouštějí a difundují skrz membránu, na permeátové straně se odpařují (odpařování je podporováno snížením tlaku – zdroj vakua, kondenzace par)



Obrázek 79. Pervaporační systém (převzato z <http://www.sulzer.com/>).

Reverzní osmóza

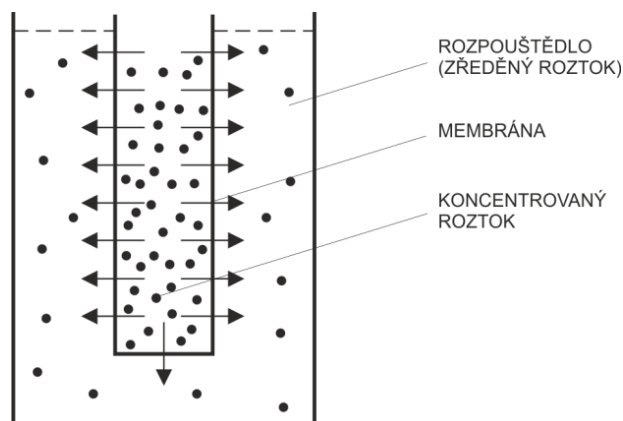
Odděluje se rozpouštědlo od roztoku nízkomolekulárních látek (solí). Odsolování mořské vody, příprava čisté vody (PW).

Obdoba ultrafiltrace, nanofiltrace, vysoké tlakové rozdíly.

Reverzní osmóza se označuje jako „obrácená osmóza“. Umístíme-li na jednu stranu polopropustné membrány čisté rozpouštědlo a na druhou stranu koncentrovaný roztok, přechází rozpouštědlo přes membránu a zředí roztok. Tlak rozpouštědla se nazývá osmotický tlak. Působíme-li opačně tlakem vyšším než osmotickým na koncentrovaný roztok, obrátíme tok rozpouštědla.

Dialýza

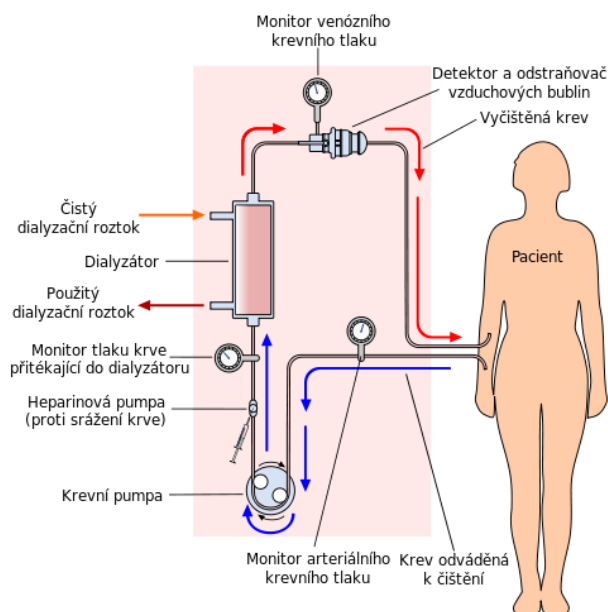
Neporézní membrána, propustná pro nízkomolekulární rozpuštěné látky. Hybná síla – koncentrační gradient



Obrázek 80. Uspořádání vsádkové dialýzy.

Neporézní membrána odděluje dva roztoky s odlišnou koncentrací, resp. roztok a čisté rozpouštědlo. Tímto způsobem se např. čistí roztoky látek s vysokou molekulární hmotností (např. bílkovin) od nízkomolekulárních látek (např. solí).

Umělá ledvina odstranění škodlivých látek z krve.



Obrázek 81. Schéma hemodialýzy (převzato z <http://cs.wikipedia.org/wiki/Hemodialýza>).

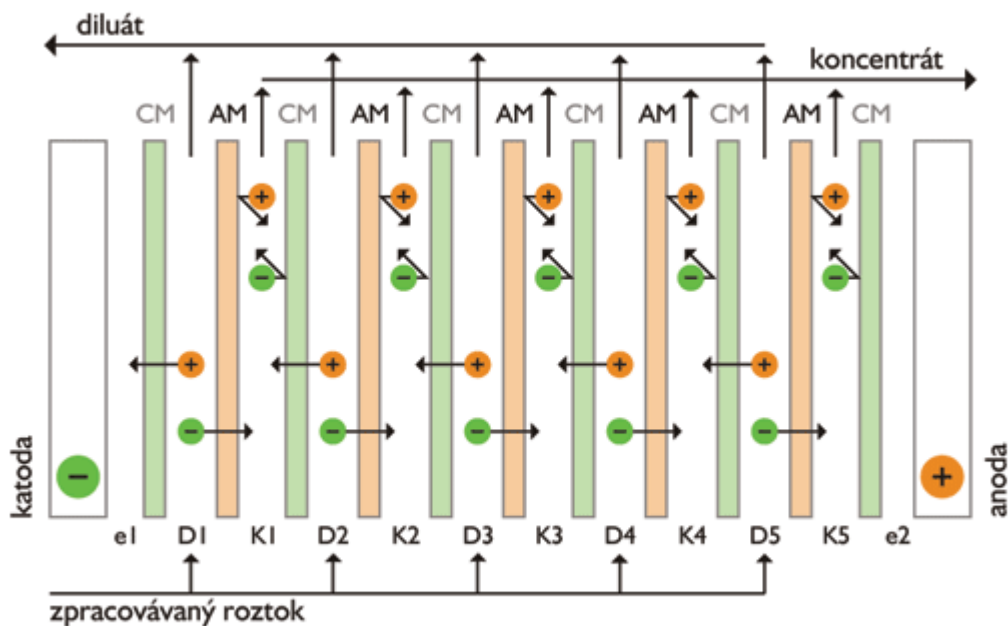
Princip elektrodialýzy podle www.mega.cz:

Elektrodialýza (ED) patří do skupiny tzv. elektromembránových procesů, při kterých dochází k separaci záporně nabitých částic od kladně nabitých podle jejich migrace k příslušným elektrodám. K řízení této migrace slouží iontoměničové membrány, kterými je transportován jen určitý druh iontů, podle jejich náboje.

Princip elektrodialýzy

Při elektrodialýze působí stejnosměrné elektrické pole na pohyb disociovaných složek solí ve vodném roztoku tak, že kationty pohybující se ke katodě jsou propouštěny katexovými membránami a zadržovány anexovými membránami, zatímco anionty přitahované k anodě jsou propouštěny anexovými membránami a zadržovány na katexových membránách. Vhodnou kombinací katexových a anexových membrán dochází k dělení iontů ve vstupním roztoku a vytváří se proud odsolený, tzv. *diluát* a proud koncentrovaný, tzv. *koncentrát*. Proces elektrodialýzy probíhá ve vlastním elektrodialyzéru, což je zařízení tvořené stahovacími deskami s elektrodami a svazkem, který je složen z ionexových membrán a rozdělovačů. Schematické znázornění elektrodialýzy je uvedeno na následujícím Obrázek 82.

Elektrodialýza - schematické znázornění separačního procesu



CM - kationová membrána, D - diluátová komora, e1, e2 - elektrodové komory,
AM - anionová membrána, K - koncentrátová komora

Obrázek 82. Elektrodialýza - schematické znázornění separačního procesu (převzato z <http://www.mega.cz/elektrodialyza.html>).

Cíle elektrodialýzy

Cílem elektrodialýzy může být získání produktů jen z jedné části roztoku (diluátu nebo koncentrátu), v některých případech jsou však kladeny kvalitativní požadavky na oba produkty (zvláště při zpracování odpadních vod), např. když diluát musí splňovat podmínky pro vypouštění do vodoteče a koncentrát mít maximálně výhodné parametry pro další zpracování.

Výhody použití elektrodialýzy

- variantnost provozu ED systému
- snadná obsluha zařízení ED
- demineralizace biologických roztoků bez vlivu na kvalitu a množství bílkovin a uhlovodíků
- energeticky výhodné separace bez fázových přeměn a přídavných chemikálií

Příklady možností použití elektrodialýzy

- farmaceutický průmysl
 - čištění fermentačních roztoků, sér a vakcín
- chemický průmysl
 - separace anorganických a organických roztoků
 - čištění organických látek, např.: aminokyselin
 - čištění odpadních vod, příp. recyklace chemických látek
- potravinářský průmysl
 - demineralizace mléčné syrovátky

- stabilizace vína
 - odsolování ovocných šťáv
- další použití
 - odsolování/zakoncentrování mořské a brakické vody a vod průmyslových
 - recyklace a regenerace galvanických lázní
 - čištění zasolených důlních vod

10. CHEMICKÉ REAKTORY

V každé chemické technologii je základní/nejvýznamnější zařízení pro provedení chemické reakce chemický reaktor.

Celý technologický proces se skládá v podstatě ze tří typů zařízení:

- úprava vlastností proudů (tepelné výměníky, mlýny, drtiče, odparky, sušárny, směšovače, rozpouštěcí nádoby, atd.)
- separace fází, složek (cyklony, filtry, odstředivky, usazovány, extraktory, destilační zařízení, absorbery, atd.)
- vlastní průběh chemické reakce (reaktory).

Při návrhu technologického procesu je návrh chemického reaktoru stěžejním krokem, podle typu reaktoru se přizpůsobí ostatní operace (úprava proudů, separační zařízení)

V chemickém reaktoru při průběhu chemické reakce dochází k přeměně surovin na produkt, tento proces je doprovázen přestupem tepla, jedná se tedy o značně komplikované zařízení. Nauka o chemických reaktorech představuje vlastní, složitou disciplínu.

Vzhledem k rozsahu tohoto kurzu si uvedeme jen některé, základní poznatky.

Chemické reaktory můžeme dělit podle různých hledisek, základní jsou:

- počet fází:
reaktory homogenní, je přítomna jedna fáze (zpravidla kapalina)
reaktory heterogenní (plyn – kapalina, plyn – tuhá fáze, kapalina – kapalina...).
- Důležitou skupinu tvoří **katalytické reaktory** – tuhá fáze = katalyzátor
- způsob provozování:
vsádkové, kontinuální, polokontinuální (kombinované). Použití resp. výhodnost jednotlivých typů je potřeba posuzovat vždy pro daný konkrétní případ. Výhodou kontinuálních reaktorů je, že se snadněji regulují, na druhé straně vsádkové jsou univerzální.

V technologiích kvalifikované chemie se uplatňuje hledisko provedení reakce při hraničních podmínkách – v tomto režimu se daří udržovat průtočné reaktory malých objemů. Uplatňuje se i bezpečnostní hledisko (malý objem = malé riziko).

U kontinuálních reaktorů se uplatňují ještě další hlediska:

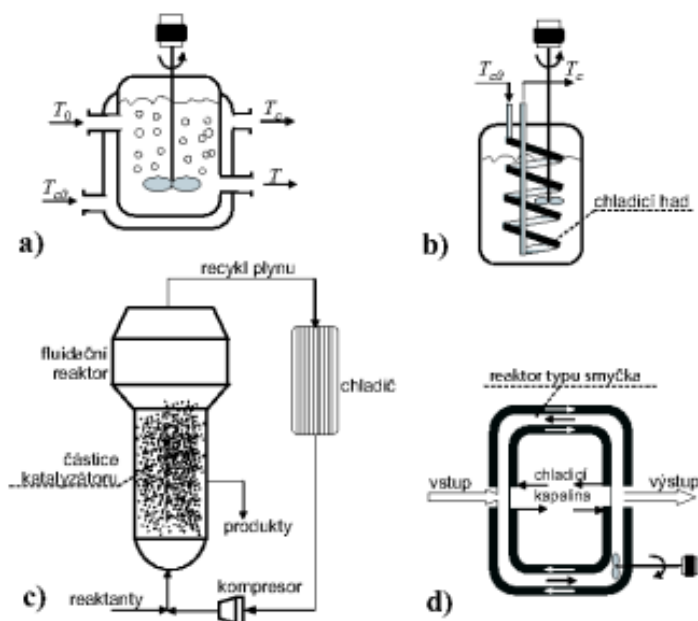
- charakter toku materiálu zařízením, existují dva teoretické modely: ideálně promíchávaný reaktor, reaktor s pístovým tokem. Modelu s pístovým tokem se nejvíc přibližuje trubkový reaktor s vrstvou katalyzátoru. Určitým přiblížením je kaskáda průtočných míchaných reaktorů (čím vyšší počet členů kaskády, tím větší přiblížení).

- způsob odvodu tepla:
dva teoretické modely:
 - veškeré teplo uvolněné reakcí se odvede chladicím systémem – **izotermní reaktor**
 - uvolněné teplo se neodvádí, spotřebuje se na ohřátí reakční směsi – **adiabatický reaktor**

Poznámka: při návrhu reaktoru/přenos, zvětšování měřítka je důležité si uvědomit, že objem reaktoru roste s třetí mocninou rozměru, kdežto teplosměnná plocha pouze s druhou mocninou!

Způsoby chlazení: pláštěm reaktoru (duplikace), vnitřní chladicí had, vnější, vysunutý výměník.

Na následujícím Obrázek 83 jsou schematicky znázorněny některé typy reaktorů stejně jako různé způsoby temperace reaktorů:

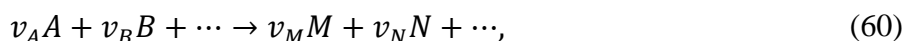


Obrázek 83. Některé typy reaktorů a způsobu chlazení; a) průtočný míchaný reaktor chlazený pláštěm; b) vsádkový míchaný reaktor chlazený vnitřním hadem; c) fluidační reaktor s chlazením recyklu plynů; d) reaktor typu smyčka chlazený pláštěm (převzato z Šnita D.: Chemické inženýrství I. 1. vyd. VŠCHT v Praze, Praha 2006. ISBN 80-7080-589-7).

Pro chemicko-inženýrský popis se využívají idealizované (zjednodušené) modely:

- ideálně míchaný vsádkový reaktor
- ideálně míchaný průtočný reaktor
- reaktor s pístovým tokem

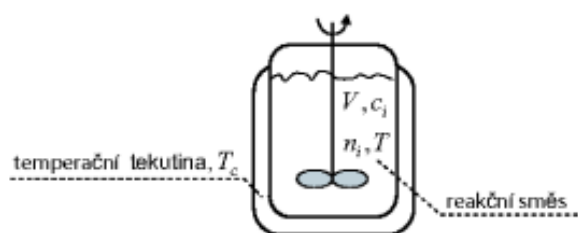
Pro popis a řešení modelů je potřeba znalosti z oblasti chemické reakční kinetiky. Výše uvedené teoretické modely mohou studenti nalézt v literatuře popsány pro nevratnou chemickou reakci typu



kde v_i jsou stechiometrické koeficienty. Pro pochopení popisu teoretických modelů je potřeba znalost základních pojmů z chemické reakční kinetiky, jako je reakční rychlost, stupeň přeměny (konverze), reakční teplo...

V následujícím oddíle si uvedeme jen základní charakteristiky jednotlivých modelů:

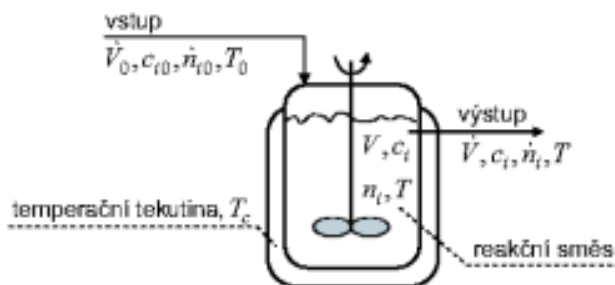
a) *Ideálně míchaný vsádkový reaktor:*



Obrázek 84. Ideálně míchaný vsádkový reaktor (převzato z Šnita D.: Chemické inženýrství I. 1. vyd. VŠCHT v Praze, Praha 2006. ISBN 80-7080-589-7).

- složení nezávisí na místě reaktoru
- složení závisí na čase
 - dynamický systém
 - bilance ve formě diferenciálních rovnic
- základní rozdělení podle tepelného režimu
 - s výměnou tepla (zvláštní případ – izotermní)
 - adiabatické

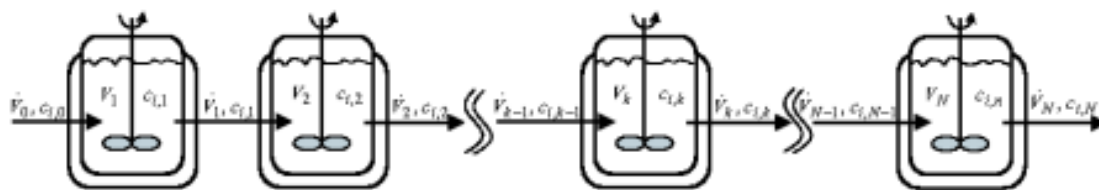
b) *Ideálně míchaný průtočný reaktor:*



Obrázek 85. Průtočný ideálně míchaný reaktor (převzato z Šnita D.: Chemické inženýrství I. 1. vyd. VŠCHT v Praze, Praha 2006. ISBN 80-7080-589-7).

- neexistují místní rozdíly ve složení nebo teplotě, teplota a koncentrace složek ve výstupním proudu je stejná jako teplota a koncentrace složek v reakční směsi v reaktoru,
- existuje ustálený stav
- skoková změna koncentrace u nástřiku

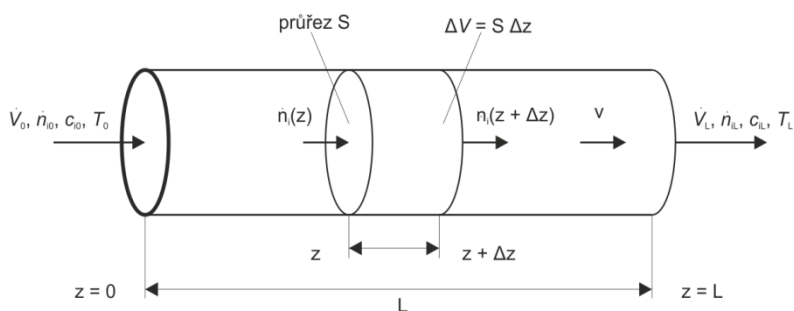
Řada chemických procesů v chemickém průmyslu realizována v kaskádách průtočných ideálně míchaných reaktorů. Výhodou je snadnější řízení teploty (menší objemy reakční směsi), rychlejší odvod reakčních produktů a tím posunutí rovnováhy ve prospěch žádaného produktu (vratné reakce), postupné přidávání velmi reaktivní suroviny...



Obrázek 86. Kaskáda průtočných ideálně míchaných reaktorů (převzato z Šnita D.: Chemické inženýrství I. 1. vyd. VŠCHT v Praze, Praha 2006. ISBN 80-7080-589-7).

Pro velký počet členů kaskády se tento model blíží trubkovému reaktoru s pístovým tokem.

c) Trubkový reaktor s pístovým tokem



- složení závisí na délkové souřadnici reaktoru
- složení v daném místě často nezávisí na čase
 - ustálený stav v čase
 - bilance ve formě diferenciálních rovnic
- časté použití s výměnou tepla

Porovnání základních modelů reaktorů – doba potřebná k dosažení určité konverze (pro reakci kladného řádu):

- potřebné doby ve vsádkovém reaktoru a reaktoru s pístovým tokem jsou stejné
- potřebná doba v průtočném míchaném reaktoru je delší,
- u vsádkového reaktoru je navíc potřeba počítat s operačním časem (k výměně vsádky)

Průtočné chemické reaktory se často realizují i s využitím zařízení pro jiné operace, např.:

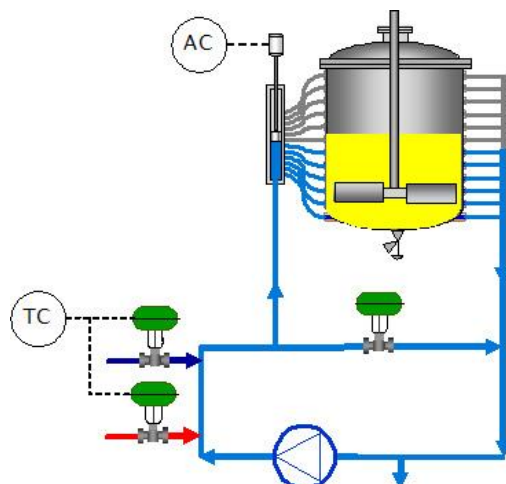
- aparáty se stíraným filmem (filmová odparka)
- rotační diskový extraktor
- odstředivé čerpadlo (míchaný průtočný reaktor)



Obrázek 87. Příklady vsádkových míchaných reaktorů (převzato z <http://en.wikipedia.org>).

Vsádkový míchaný reaktor chlazený:

- a) dvojitým pláštěm
- b) navařenou „půltrubkou“



Obrázek 88. Vsádkový míchaný reaktor (převzato z Chemical Engineering Magazine, Access Intelligence, LLC).

Vsádkový míchaný reaktor chlazený duplikací – systém COFLUX (temperuje se jen využívaná část teplosměnné plochy).



Obrázek 89. Míchaný vsádkový reaktor ve „pharma“ provedení (převzato z <http://www.tectrion.de/>).

Vzhledem k rozsahu tohoto kurzu není možné se touto problematikou podrobně zabývat. Zájemci naleznou informace v odborné literatuře.

Mikroreaktory

V poslední době se vývoj chemických reaktorů ubírá i alternativním směrem, který spočívá v uplatnění kontinuálního uspořádání a pracuje s mikroobjemy. Tento směr je taky označován jako „*flow chemistry*“.

Jednotliví výrobci používají různé konstrukce. Z hlediska širokého spektra zpracovávaných materiálů v oblasti kvalifikované chemie je výhodný směr, který používá jako materiál sklo, skleněné desky rozměru cca formátu A6, vlastní reaktor je vytvořen tak, že do dvou desek se vytvoří vlastní kanálky reaktoru (směšovače, temperační zóny, reakční zóny...), zrcadlově, do každé desky polovina profilu a deska se spojí při vysoké teplotě.



Obrázek 90. Příklad mikroreaktoru (převzato z <http://store.micronit.com/>).

Více např. na <http://www.ltf-gmbh.com/ltf/company.html>, stránky výrobce skleněných mikroreaktorů LTF (Little Things Factory).

Výhody mikroreaktorů:

- intenzivní míchání
- pracuje se s malými objemy reaktantů – zvýšení bezpečnosti
- intenzivnější přestup tepla – u mikroreaktorů je výhodnější poměr objemu temperované kapaliny a teplosměnné plochy
- průběh reakce se lépe kontroluje – to přináší vyšší kvalitu produktu, nižší podíl vedlejších produktů,

Další výhodou je v rozdílném postupu zavádění do výrobního měřítka:

Klasický: laboratorní výzkum, pilot plant, výroba

Mikroreaktory: laboratorní výzkum, produkční měřítka se dosáhnou znásobením počtu mikroreaktorů. Tento postup znamená zkrácení (= **zlevnění**) předvýrobní etapy.

Více můžete najít v článku časopisu *Pharmaceutical Engineering* – Asano, Y., Togashi, S., Tsudome, H., Murakami, S., *Microreactor Technology: Innovations in Production Processes*, Vol. 30, No. 1, 2010, pp. 1-9.

11. MECHANICKÉ OPERACE

11.1. Mletí

Mletí je proces, při němž se částice pevných surovin zmenšují na potřebnou velikost, která je nejvhodnější pro účelnou aplikaci.

Ve farmaceutickém průmyslu je velikost částic účinné látky důležitá jednak pro vlastní technologický proces výroby lékové formy jednak pro hodnotu tzv. biologické dostupnosti – využitelnosti účinné látky např. v tabletě léku.

Mletí může být nezbytné pro následné ovlivnění vlastností surovin při výrobě lékové formy.

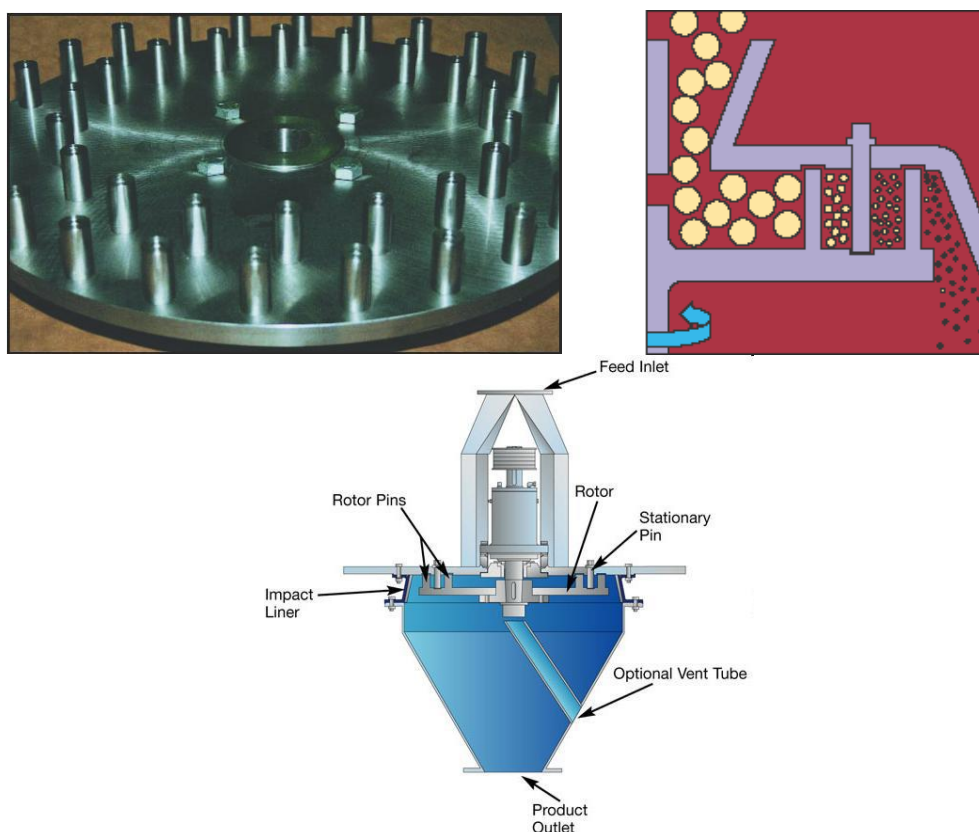
Při výrobě účinných látek se uplatňuje kategorie **jemné mletí**. Podle výrobce mlecích zařízení (firma Hosokawa Alpine) se podle velikosti částic mletého produktu rozlišuje:

Středně jemné	500-1000 μm
Jemné	150-500 μm
Jemnější	50-150 μm
Superjemné	10-50 μm
Ultrajemné	2-10 μm

Pro první čtyři skupiny se používají úderové mlýny (*impact mills*). K rozmělnění mletého materiálu dochází kontaktem částic mletého materiálu s rotorem mlýna a statorem.

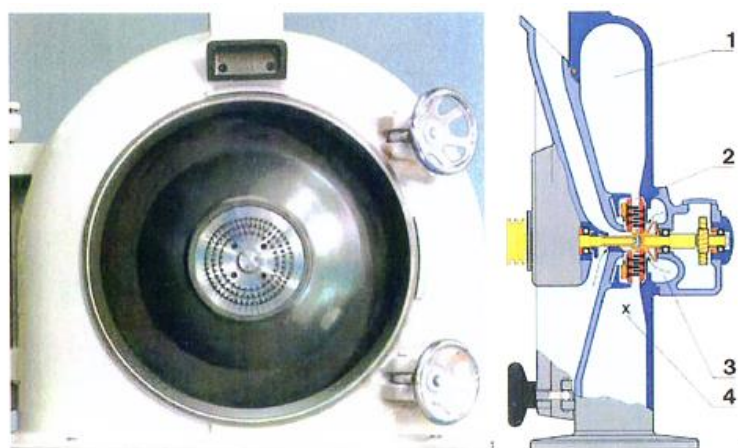
Podle typu rotor může být s kyvnými lopatkami, pevnými lopatkami, kolíky, ...

Na následujícím Obrázek 91 je schéma a princip činnosti kolíkového mlýnu (typ s rotorem i statorem opatřeným kolíky) a fotografie disku s kolíky.



Obrázek 91. Schéma kolíkového mlýnu společnosti Sturtevant Inc.

Na dalším Obrázek 92 je speciální provedení úderového mlýna fy **ALPINE**, který má širší mlecí komoru. Tato úprava je výhodná pro zpracování látek náchylných k lepení pomletých látek na stěny mlecí komory.

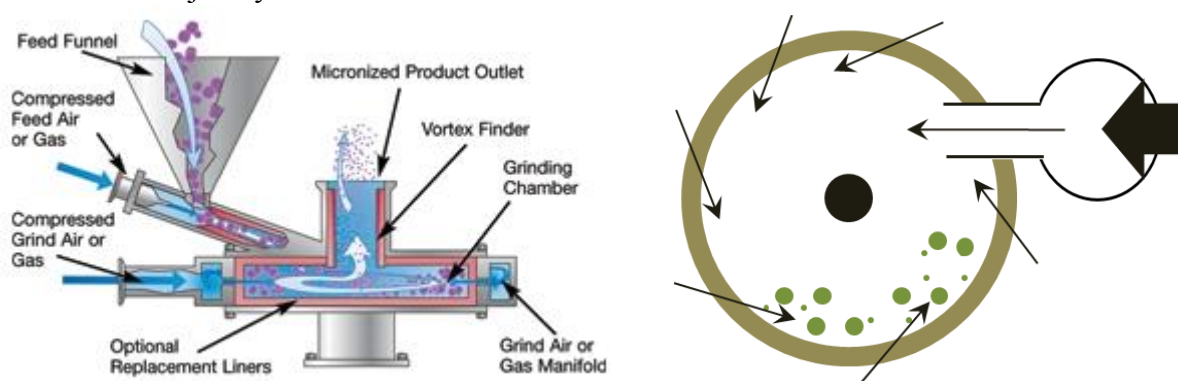


Obrázek 92. Provedení úderového mlýnu firmy ALPINE.

Poslední kategorie, ultrajemné mletí se označuje také jako **mikronizace** a používají se tryskové mlýny (*jet mills*).

K rozměňování částic mletého materiálu dochází nárazy jednotlivých částic mezi sebou. Potřebná energie je částicím dodávána prostřednictvím stlačeného mlecího plynu. Používá se vzduch, v případě potřeby ochrany produktu před oxidací se používá dusík.

Na následujícím Obrázek 93 Obrázek 93 je schéma tryskového mlýnu a princip rozměňování následkem vzájemných kolizí částic.



Obrázek 93. Tryskový mlýn a jeho princip (převzato z <http://www.sturtevantinc.com/micronizer.php>).

11.2. Sítování

Sítování je proces, při kterém dochází průchodem přes standardizovaná síta k dělení zpracovávaného materiálu na frakce s definovanou distribucí velikosti částic. Požadavek na dodržení specifikace distribuce velikosti částic je častým požadavkem výrobců konečných lékových forem na výrobce farmaceutických účinných látek.

Zařízení používaná pro operaci sítování ve farmaceutickém průmyslu je možné rozdělit na dva základní typy:

- bubnové sítovačky
- rotační sítovačky

Princip bubnové síťovačky je znázorněn na následujícím schématu fy *Allgaier* (viz Obrázek 94):



Obrázek 94. Bubnová síťovačka firmy ALLGAIER.

Pohyb sít potřebný k vyvolání frakcionace je složitý. Je vyvolán sofistikovaným pohonem a amplitudy jednotlivých kmitů se dají nastavit.

Bubnová síťovačka může být vybavena jedním nebo více sítí. Při zpracování látek náchylných k nalepování na síto se používají různé principy čištění sít – pomocí ultrazvuku, proudu tlakového plynu, působením inertních tělísek na síto.

Princip funkce rotační síťovačky spočívá v tom, že zpracovávaný materiál se zavádí dovnitř rotujícího síta ve tvaru válce. Z toho plyne, že toto zařízení neumožňuje dělení na více frakcí. Na následujícím Obrázek 95 je schematické znázornění principu, příklad síťovačky fy *Kemutec* v provedení pro farmaceutický průmysl a znázornění snadné výměny síta.



Obrázek 95. Rotační síťovačka firmy KEMUTEC.

12. ZÁKLADY „SPRÁVNÉ VÝROBNÍ PRAXE“, POŽADAVKY NA VÝBĚR ZAŘÍZENÍ PRO PRODUKCI LÉČIVÝCH LÁTEK

Správná výrobní praxe (SVP) – Good Manufacturing Practice (cGMP)

(v této přednášce budou studenti heslovitě seznámeni se zásadami SVP. Průběžně je tato problematika glosována během celého cyklu přednášek)

Správná výrobní praxe je filozofií, jejímž primárním smyslem je ochrana zdraví široké veřejnosti.

Dnešní podoba pravidel SVP vychází ze skutečnosti, že farmaceutická výroba je jedna z nejlukrativnějších oblastí a „obchod se zdravím“ se stal předmětem rozsáhlého a masového podnikání.

SVP představuje v demokratickém státě systém ochrany občana, kde stát plní funkci legislativní, kontrolní a represivní.

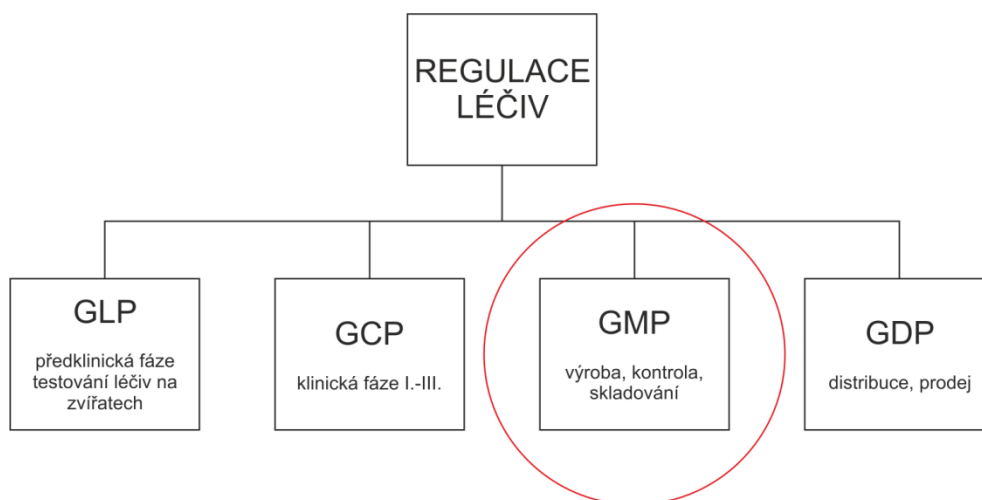
Poznámka: *c* v anglické zkratce znamená *current* = filozofie Správné výrobní praxe se neustále vyvíjí, uplatňují se nové poznatky.

Dva nejdůležitější přístupy:

- *systém americký*
Základem amerického systému je federální zákon „Federal Food, Drug and Cosmetic Act“.
Na dodržování dohlíží federální úřad pro správu potravin a léčiv – Food and Drug Administration (FDA).
- *systém evropský*
Komise evropských společenství přijala Směrnici 65/65EEC The Rules governing medicinal products for human use in the European Community, která je základem pro utváření národních verzí legislativ v jednotlivých členských státech. Na tuto základní směrnici navazuje celá série směrnic a doporučení.

V ČR - Zákon o léčivech v r. 1998 (specifikum: pod pojmem *léčivo* zahrnuje jak *léčivou látku*, tak *léčivý přípravek*).

- Státní ústav pro kontrolu léčiv (SÚKL)



Tzv. „Zákon 5 P správné výrobní praxe“:

<i>People</i>	<i>Pracovníci</i>
<i>Products</i>	<i>Produkty</i>
<i>Premises</i>	<i>Provozy</i>
<i>Processes</i>	<i>Postupy</i>
<i>Procedures</i>	<i>Popisy</i>

Vyjadřuje podstatu, že při řešení každého úkolu souvisejícího s jakostí produktu se musíme zabývat minimálně těmito pěti oblastmi.

Správná výrobní praxe pro léčivé látky (Active Pharmaceutical Ingredients, API)

FARMACEUTICKÝ VÝROBCE × CHEMICKÁ FIRMA = výrobce API

Mezinárodní konference pro harmonizaci (ICH – International Conference on Harmonization) – pokyn ICH Q7A „Good Manufacturing Practice For Active Pharmaceutical Ingredients“ byl vydán v r. 2000. Tento pokyn převzala EU do svých pravidel.

V ČR pokyn SÚKLu.

VYR-26 verze 2 : Pokyny pro správnou výrobní praxi při výrobě léčivých látek.

<http://www.sukl.cz/leciva/vyr-26-verze-2>

Pokyn VYR-26 verze 2 je překladem The Rules Governing Medicinal Products in the European Union, Volume 4, EU Guidelines to Good Manufacturing Practice, Part II, Basic Requirements for Active Substances used as Starting Materials, ve znění platném k 31. 7. 2010. Anglická verze tohoto dokumentu je dostupná na http://ec.europa.eu/health/files/eudralex/vol-4/2007_09_gmp_part2_en.pdf. Rozsah pokynů je zřejmý z obsahu, uvedeného dále.

Obsah pokynů:

1. Úvod
 - 1.1 Cíl
 - 1.2 Rozsah
2. Řízení jakosti
 - 2.1 Principy
 - 2.2 Řízení rizik pro jakost
 - 2.3 Odpovědnosti jednotky jakosti
 - 2.4 Odpovědnost za činnosti výroby
 - 2.5 Interní audity (vnitropodnikové kontroly)
 - 2.6 Přezkoumání jakosti produktu
3. Pracovníci
 - 3.1 Kvalifikace pracovníků
 - 3.2 Osobní hygiena zaměstnanců
 - 3.3 Konzultanti
4. Budovy a zařízení
 - 4.1 Návrh a výstavba
 - 4.2 Technické vybavení
 - 4.3 Voda
 - 4.4 Vyčleněné prostory
 - 4.5 Osvětlení
 - 4.6 Kanalizace a odpady
 - 4.7 Sanitace a údržba
5. Výrobní zařízení
 - 5.1 Návrh a konstrukce
 - 5.2 Údržba a čištění zařízení
 - 5.3 Kalibrace
 - 5.4 Systémy řízené počítačem (automatizované systémy)
6. Dokumentace a záznamy
 - 6.1 Systém dokumentace a specifikace
 - 6.2 Záznamy o čištění a používání zařízení
 - 6.3 Záznamy o surovinách, meziproduktech a materiálech určených ke značení a balení léčivých látek

- 6.4 Řídicí pokyny pro výrobu (Řídicí záznamy o výrobě a kontrole)
- 6.5 Záznamy o výrobě šarží (Záznamy o výrobě a kontrole šarží)
- 6.6 Záznamy o laboratorních kontrolách
- 6.7 Kontrola záznamů o výrobě šarže
- 7. Skladové hospodářství
 - 7.1 Obecné kontroly
 - 7.2 Přejímka a karanténa
 - 7.3 Odběr vzorků a zkoušení příchozích výrobních materiálů
 - 7.4 Skladován
 - 7.5 Přehodnocení
- 8. Výroba a průběžné výrobní kontroly
 - 8.1 Výrobní operace
 - 8.2 Časové limity
 - 8.3 Odběr vzorků z výroby a průběžné výrobní kontroly
 - 8.4 Mísení šarží meziproductů či léčivých látek
 - 8.5 Kontrola kontaminace
- 9. Balení a označování totožnosti léčivých látek a meziproductů
 - 9.1 Obecně
 - 9.2 Materiály pro balení
 - 9.3 Vydávání a kontrola štítků
 - 9.4 Operace balení a značení
- 10. Skladování a distribuce
 - 10.1 Skladové postupy
 - 10.2 Distribuční postupy
- 11. Laboratorní kontroly
 - 11.1 Obecné kontroly
 - 11.2 Zkoušení meziproductů a léčivých látek
 - 11.3 Validace analytických postupů
 - 11.4 Analytický certifikát
 - 11.5 Monitorování stability léčivých látek
 - 11.6 Stanovení data expirace a data přezkoušení
 - 11.7 Referenční vzorky
- 12. Validace
 - 12.1 Validační politika

- 12.2 Validáčn dokumentace
- 12.3 Kvalifikace
- 12.4 Pstupy k procesn validaci
- 12.5 Program procesn validace
- 12.6 Periodick posouzení validovaných systémů
- 12.7 Validace istn
- 12.8 Validace analytických metod
- 13. Kontrola změn
- 14. Zamtnut a opakovan pouzt materiálů
- 14.1 Zamtnut
- 14.2 Opakovan zpracování
- 14.3 Prepracovn
- 14.4 Regenerace materiálů a rozpouštědel
- 14.5 Vracen
- 15. Reklamace a stahování
- 16. Smluvní výrobci (včetně kontrolních laborator)
- 17. Výrobci provádějící opakovan balení a znaen a distributor
- 17.1 Platnost
- 17.2 Dohledatelnost distribuovaných leivch látek a meziproduktů
- 17.3 Řzen jakosti
- 17.4 Opetovn balení a znaen a uchovávání leivch látek a meziproduktů
- 17.5 Stabilita
- 17.6 Předávání informací
- 17.7 Vyřzovn reklamací a stahování
- 17.8 Postup pro vrcen leiv látky či meziprodukty
- 18. Zvlstn pokyny pro leiv látky vyrbn z bunench kultur/fermentací
- 18.1 Obecn
- 18.2 Udrzba bunench bank a vedení záznamů
- 18.3 Bunen kultura/fermentace
- 18.4 Sběr, izolace a purifikace
- 18.5 Kroky odstranění/inaktivace virů
- 19. Leiv látky pro pouzt v klinickm hodnocen
- 19.1 Obecn
- 19.2 Jakost

19.3 Zařízení a prostory

19.4 Kontrola surovin

19.5 Výroba

19.6 Validace

19.7 Změny

19.8 Laboratorní kontroly

19.9 Dokumentace

20. Definice pojmů

Technickou problematikou Správné výrobní praxe se zabývá organizace ISPE.

Organizace ISPE

- Organizace „International Society for Pharmaceutical Engineering“ (ISPE , www.ispe.org)
- vznikla koncem 80. let, především společnost technických specialistů.
- úzké spojení s FDA,
- organizuje řadu expertních skupin, jejichž cílem je vydávání pokynů (guides):
- *Baseline® Guides*
- *ISPE Guides*
- *GAMP5® and GAMP Good Practice Guides*
- *ISPE Good Practice Guides*
- *ISPE PQLI® Good Practice Guides*
- *Pokyny ISPE se zabývají technickými aspekty GMP a slouží jako doporučení*

Zařízení pro výrobu API, požadavky na prostředí

- Základními principy se zabývají zmíněné pokyny ISPE, není cílem popsat konstrukční detaily ale zdůraznit základní principy.
- Základní dělení:
- procesní systémy,
- pomocné procesní systémy,
- systémy technického vybavení

Procesní systémy (přímý kontakt s produktem)

- výrobní zařízení
- CIP/SIP systémy
- dusík
- čistá pára
- výroba a distribuce vody
- přívod rozpouštědel
- Výrobní zařízení:
- Musí být zajištěno
- dokonalé technické řešení (materiál, drsnost povrchu, spoje, potrubní rozvody)
- spolehlivost
- zabránění kontaminacím
- dokonalé vyčištění zařízení

Pomocné procesní systémy (není přímý kontakt s produktem)

- vzduch pro výrobní proces,
- ohřívací a chladičí systémy,
- procesní vakuové systémy,
- odvzdušnění

Systémy technického vybavení

- systémy páry a horké vody
- kapalina pro mechanické ucpávky
- vzduch pro ovládání a pohon přístrojů
- dýchaný vzduch
- nevýrobní voda

Požadavky na prostředí, vzduchotechnika

- ***Požadavky na prostředí***
- podle úrovně uplatňování GMP
- obyčejné,
- chráněné,
- kontrolované (čisté prostory)

- ***Vzduchotechnika***
- systémy HVAC (topení, ventilace, klimatizace)
- čisté prostory