

ABSTRAKT

Abstrakt

Cílem práce je vytvořit učební text pojednávající o dvousložkové difúzi. Tento materiál by měl jednoduchou a srozumitelnou formou vysvětlit základní pojmy související s touto problematikou a poukázat na základní operace a výrobní procesy založené na difúzi. Z tohoto důvodu je tento text rozdělen do čtyř částí, které obsahují vysvětlení principu difúze a jejího matematického vyjádření, principy základních difúzních operací a popis některých technických konstrukcí, které tyto difúzní operace realizují. V poslední části této práce je také uvedeno několik řešených i neřešených příkladů, které souvisí s difúzí a jejími veličinami.

Abstract

Target of the work is to create the study material about two-components diffusion. This material should clearly and understandable explain basic terms joined with this problem and point out at some basic operations and production processes connected with diffusion. For this reason is this work divided into four parts, which contains explanation of the diffusion principle and its mathematical expression, principles of basic diffusion operations and some descriptions of the technical constructions, which realization this diffusion operations. In the last part of this work are some worked examples and examples without solution, which are connected with diffusion and its quantities.

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce prof. Ing. Karlu Kolomazníkovi, DrSc za odborné rady a vedení mé bakalářské práce.

OBSAH

OBSAH	5
ÚVOD.....	7
I. TEORETICKÁ ČÁST	8
1 DIFÚZE	9
1.1 DIFÚZE.....	9
1.1.1 Pojem difúze a difúzní koeficient	9
1.1.2 Rozdělení mechanismů přenosu hmoty.....	15
1.1.3 Konvektivní přenos hmoty	17
1.1.4 Filmová teorie přenosu hmoty.....	17
1.1.5 Analogie mezi přenosem tepla a hmoty	18
1.2 ZÁKLADNÍ VELIČINY A VÝPOČTOVÉ VZTAHY	20
1.2.1 Způsoby vyjádření koncentrací	20
1.2.2 Způsoby vyjádření hmotového toku.....	21
1.2.3 Způsoby vyjádření rychlostí	21
1.2.4 Způsoby vyjádření hustot difúzních toků.....	22
1.3 FÁZOVÉ ROVNOVÁHY	23
1.3.1 Základní pojmy.....	23
1.3.2 Fázové pravidlo	24
1.3.3 Jednosložkové systémy	25
1.3.4 Způsoby vyjadřování složení fází.....	27
1.4 HMOTOVÁ BILANCE	28
1.5 FICKOVY DIFÚZNÍ ZÁKONY.....	31
1.5.1 První Fickův difúzní zákon	31
1.5.2 Druhý Fickův difúzní zákon.....	33
2 OPERACE SPOJENÉ S DIFÚZÍ	34
2.1 SORPČNÍ PROCESY	34
2.1.1 Absorpce.....	35
2.1.2 Adsorpce.....	35
2.1.3 Desorpce.....	36
2.2 SEPARAČNÍ METODY.....	37
2.2.1 Destilace a rektifikace	37
2.2.2 Extrakce.....	39
2.3 SUŠENÍ.....	40
3 TECHNICKÉ PROSTŘEDKY A ZAŘÍZENÍ VYUŽÍVAJÍCÍ DIFÚZNÍ POCHODY.....	42
3.1 DESTILAČNÍ ZAŘÍZENÍ	42
3.2 EXTRAKČNÍ ZAŘÍZENÍ.....	44

3.3	SUŠÁRNY	46
II.	VÝPOČTOVÁ ČÁST.....	47
4	PŘÍKLADY	48
4.1	ŘEŠENÉ PŘÍKLADY	48
4.2	NEŘEŠENÉ PŘÍKLADY	54
	ZÁVĚR	55
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	56
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	57
	SEZNAM OBRÁZKŮ	59
	SEZNAM TABULEK.....	60
	SEZNAM PŘÍLOH.....	61

ÚVOD

S difúzí, nebo také přenosem hmoty, se lze setkat v mnoha průmyslových odvětvích a to jak ve strojírenství, tak hlavně v chemickém průmyslu, potravinářském průmyslu, apod. Proto je také cílem této bakalářské práce vytvořit názorný, podrobný a jednoduchý učební text, který pojednává o difúzi a který by měl sloužit studentům fakulty technologické, především pak studentům oboru chemické a procesní inženýrství.

Zejména proto, že na difúzi a procesech spojených s difúzí je založena velká část mnoha výrobních procesů v mnoha různých oblastech lidské činnosti a protože se difúze vyskytuje i v oblastech, ve kterých bychom to nejméně čekali, rozhodl jsem se tuto práci rozdělit do čtyř, více, či méně obsáhlých částí.

První, nejobsáhlejší, část tohoto textu je soustředěna na jednoduchý a pokud možná co nejsrozumitelnější teoretický výklad samotné difúze. Tato část pojednává, mimo jiné, o jejích základech a mechanismech, základních veličinách i úzce souvisejícím tématu, jako jsou fázové rovnováhy. Samozřejmě také nesmí zůstat opomenut matematický popis difúze, vyjádřený zejména Fickovými difúzními zákony a také hmotovou bilancí.

Druhá část této práce velmi obecně a stručně pojednává o procesech spojených s difúzí, jejich principech a využití, doplněných velmi stručným matematickým popisem. Důležitými případy těchto procesů jsou například sušení, destilace, extrakce, sorpční pochody atd.

Ve třetí části jsou uvedeny některá schémata zařízení, které v běžné průmyslové a technické praxi realizují difúzní procesy.

Poslední, čtvrtá, část této práce obsahuje základní typy řešených příkladů, na kterých je vysvětlena základní problematika a postupy při výpočtech. Také je zde uvedeno několik neřešených příkladů, na kterých si studenti mohou ověřit své znalosti.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 DIFÚZE

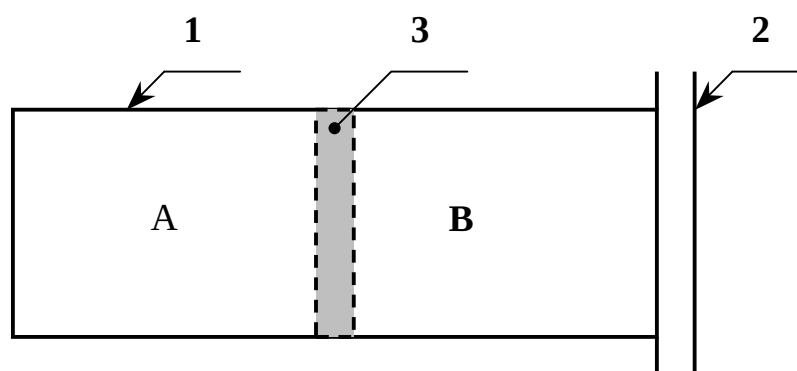
1.1 DIFÚZE

Difúze, nebo také **přenos hmoty**, je jev, se kterým se lze setkat v mnoha průmyslových odvětvích. A nejen v nich. Vždyť difúze je, aniž si to sami uvědomujeme, základní součástí našeho každodenního života. Jak je všeobecně známo, základním stavebním prvkem všech živých organismů na zemi jsou buňky. Buňka je vůči okolí ohraničená svým povrchem. Přesto však umožňuje výměnu látek, energie a informace. Pro příjem látek do buňky z vnějšího prostředí a pro regulaci tohoto procesu se v průběhu evoluce vyvinulo několik mechanismů. Mezi ty nejdůležitější patří mimo jiné i difúze. U některých rostlin je dokonce na difúzi a osmotických jevech založen veškerý vnitřní koloběh vody. Buňky a látková výměna mohou sloužit jen jako jeden z mnoha příkladů, kde všude se lze setkat s difúzí. Cílem této práce proto není jen vysvětlit pojem difúze, ale také poukázat na některé zajímavé skutečnosti s difúzí související.

1.1.1 Pojem difúze a difúzní koeficient

Difúze je, jak už bylo uvedeno, jev velmi častý. O to složitější je ovšem vysvětlit, co to difúze vlastně je. Podstatu difúze lze nejlépe vyjádřit na následujícím příkladu.

Nechť je ve válci 1 plyn *B* a v okolí absolutní vakuum. Bude-li deska 2, uzavírající válec, odkryta, začne plyn *B* expandovat do vakua a rychlost rozpínání plynu se bude blížit střední rychlosti molekul plynu.



Obr. 1. K určení pojmu difúze

Nyní se změní podmínky pokusu tak, že válec bude rozdělen přepážkou 3 na dvě části. Levá část válce bude naplněna plynem A a pravá část válce plynem B. Bude-li nyní odstraněna přepážka 3, začne se plyn A šířit i do pravé části válce a plyn B do levé. Šíření obou plynů bude v tomto případě probíhat značně pomaleji než při expanzi do vakua, protože molekuly jednoho plynu budou na své cestě narážet na molekuly druhého plynu a jejich dráha nebude proto přímá.

Tento přechod látek do nového prostředí, které tuto látku neobsahuje, je bržděn silami vnitřního tření a nazývá se difúzí. **Difúze probíhá směrem od vyšší koncentrace k nižší. Hnací silou difúze je gradient koncentrace, nebo také koncentrační spád,** $-\frac{dc}{dl}$, který představuje změnu koncentrace na jednotku dráhy difundující látky. Rychlost difúze je dána množstvím látky, které projde jednotkovou plochou za jednotku doby $-\frac{m}{A \cdot dt}$. K difúzi dochází nejčastěji mezi dvěma fázemi, které jsou v bezprostředním kontaktu. Difúze ovšem může probíhat i mezi fázemi, které jsou odděleny membránou, například osmóza, nebo uvnitř jedné fáze, například termodifúze.

Rychlost difúze je tím větší, čím větší je gradient koncentrace, což lze vyjádřit rovnicí:

$$\frac{m}{A \cdot dt} = -D \cdot \frac{dc}{dl} \quad (1)$$

kde m je množství látky $[kg]$, A je difúzní povrch $[m^2]$, τ je čas $[s]$, D je difúzní koeficient $[m^2/s]$, c je koncentrace $[kg/m^3]$ a l je vzdálenost $[m]$. Záporné znaménko před pravou částí rovnice znamená, že s rostoucí vzdáleností l klesá koncentrace c .

Množství látky prošlé difúzí m dostaneme vyjádřením z rovnice (1):

$$m = -D \cdot A \cdot \frac{dc}{dl} \cdot dt \quad (2)$$

Vyjádřením difúzního koeficientu z téže rovnice a provedením rozměrové analýzy můžeme určit rozměr difúzního koeficientu:

$$D = -\frac{m \cdot dl}{A \cdot dc \cdot dt} \quad (3)$$

$$[D] = \left[\frac{kg \cdot m}{m^2 \cdot \frac{kg}{m^3} \cdot s} \right] = \left[\frac{m^2}{s} \right] \quad (4)$$

[7]

Difúzní koeficient je fyzikální charakteristika dané látky, která vyjadřuje její schopnost pronikat do vnějšího prostředí. Je číselně rovna množství látky, které by přešlo za jednotku doby jednotkovou plochou při jednotkovém poklesu koncentrace plynu na jednotku vzdálenosti ve směru difúze.

Hodnoty difúzních koeficientů se obvykle určují **pokusně**. Jejich hodnoty pro různé plyny a kapaliny bývají uvedeny ve fyzikálně chemických **tabulkách**. Pro názornost jsou zde uvedeny hodnoty difúzních koeficientů některých plynů (Tab. 1.).

Tab. 1. Hodnoty difúzních koeficientů pro plyny

plyn	difúzní koeficient D [m^2/hod]	
	ve vzduchu při 0°C	ve vodě při 20°C
dusík	0,0475	$6,9 \cdot 10^{-6}$
amoniak	0,0612	$6,6 \cdot 10^{-6}$
vodík	0,22	$1,9 \cdot 10^{-6}$
kyslík	0,064	$7,5 \cdot 10^{-6}$
oxid siřičitý	0,037	-
chlorovodík	0,0467	$8,3 \cdot 10^{-6}$ (při 12°C)

V tabulkách bývají hodnoty difúzního koeficientu tabelovány spolu se **Schmidtovým kritériem**:

$$Sc = \frac{n}{D} \quad (5)$$

Je to proto, že hodnota Schmidtova kritéria se s tlakem nemění vůbec a s teplotou se mění jen velmi málo. Proto lze toto kritérium využít k výpočtu difúzního koeficientu při různých tlacích a teplotách, pokud ovšem při těchto parametrech známe hodnotu kinematické viskozity ν .

Nemáme-li k dispozici pokusně zjištěnou hodnotu difúzního koeficientu, musíme k jeho zjištění použít **teoretický výpočet**. Pro jeho stanovení ovšem není známý žádný všeobecně platný vztah. Pro výpočet difúzního koeficientu existuje celá řada **empirických vztahů**, které se velmi dobře shodují s experimentem, jsou však rozdílné pro plyny, kapaliny a pevné látky.

Pro výpočet **difúzního koeficientu v plynech** můžeme použít následující vztah:

$$D = 2,45 \cdot 10^2 \cdot \frac{T^{\frac{3}{2}}}{P \cdot \left(V_A^{\frac{1}{3}} + V_B^{\frac{1}{3}} \right)^2} \cdot \sqrt{\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B}} \quad (6)$$

kde D je difúzní koeficient [m^2/s], T je absolutní teplota [K], P je celkový tlak [MPa], V_A a V_B jsou molekulární objemy plynů [m^3/mol], M_A a M_B jsou molekulární hmotnosti plynů [kg/mol].

Molekulární objemy ve výše uvedené rovnici je možné vypočítat sečtením atomových objemů prvků, z nichž se skládají molekuly difundujících látek.

Ve strojírenství je častou kombinací **vzduch-vodní pára**. V tomto případě určujeme difúzní koeficient podle vztahu:

$$D = 2,193 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1}{P} \cdot \left(\frac{T}{273,15} \right)^{1,8} \quad (7)$$

Difúzní koeficient v kapalinách bude mnohem nižší, než u plynů. je to proto, že koncentrace molekul u kapalin je mnohem větší než u plynů. Řádově se difúzní koeficient u kapalin pohybuje kolem $10^{-9} m^2/s$. Pro zředěné roztoky lze například použít tento vztah:

$$D = 4,67 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{T}{h_B} \cdot \frac{(A_{sp} \cdot M_B)^{0,5}}{V_A^{0,6}} \quad (8)$$

kde D je difúzní koeficient [m^2/s], η_B je dynamická viskozita rozpouštědla B [$(N.s)/m^2$], V_A je molový objem difundující látky A v kapalně fázi [m^3/mol], M_B je molová hmotnost rozpouštědla B [kg/mol], A_{sp} je asociační parametr rozpouštědla. [6]

Stanovení **difúzního koeficientu v pevných látkách** je při pórovité struktuře tělesa velmi obtížné. Pracuje se zde s tzv. efektivním difúzním koeficientem určeným na základě struktury pevné látky a přítomné tekutiny. U pevných látek, které nemají výrazně makropórovitou strukturu, je difúzní koeficient o několik řádů menší než u kapalin.

Hodnotu efektivního difúzního koeficientu lze vypočítat například podle vztahu:

$$D_{ef} = \frac{D}{\psi} \quad (9)$$

kde ψ je součinitel difúzního odporu. Je to číslo větší než jedna a závisí na teplotě, tlaku, porozitě a druhu materiálu. Hodnoty ψ jsou tabelizovány.

Další vztah pro výpočet efektivního difúzního koeficientu je:

$$D_{ef} = \frac{D \cdot \varepsilon}{\psi_s} \quad (10)$$

kde ε je porozita materiálu a ψ_s je součinitel klikatosti. [5]

1.1.2 Rozdělení mechanismů přenosu hmoty

Je-li řeč o difúzi, je nutné také rozlišovat mezi jednotlivými druhy difúze. Existuje několik základních skupin, do kterých můžeme difúzní pochody rozdělit na základě fyzikálních principů a mechanismů, na kterých jsou založeny.

Mechanismy přenosu hmoty lze tedy rozdělit do šesti základních skupin.

1. Koncentrační difúze

Hnací silou je v tomto případě **gradient koncentrace**, nebo také **gradient chemického potenciálu**. Koncentrační difúze patří k nejrozšířenějším mechanismům přenosu hmoty v technické praxi.

2. Termická difúze

Hnací silou termické difúze je **teplotní gradient**. V neizotermním poli binární směsi se molekuly jedné složky pohybují do oblasti s vyšší teplotou, molekuly druhé složky do oblasti chladnější. Důsledkem je vznik nehomogenního koncentračního pole, které umožňuje separaci obou složek (Na základě tohoto tzv. Soretova jevu pracují např. zařízení k separaci izotopů).

3. Tlaková difúze

Hnací silou je **tlakový gradient**.

4. Difúze účinkem vnějšího silového pole (kromě gravitačního)

Tato difúze nastává ve směsích, kde má vnější silové pole různé účinky na jednotlivé složky směsi (např. difúze iontů v elektrolytech).

5. Přenos hmoty konvekci

Tento typ přenosu nastává v pohybujícím se prostředí, hlavně v proudících tekutinách. Při přenosu hmoty konvekci mohou nastat, tak jako při přenosu tepla, dva případy:

- Nucená konvekce

Nucená konvekce nastává v deformovatelném prostředí, kde je složka nebo směs přemísťována **vyvolaným konvektivním tokem**. Tento tok může být vyvolán například čerpadlem.

- Přirozená konvekce

Přenos hmoty se také uskutečňuje konvektivním tokem, ale hnací silou je zde **gradient hustot** v tekutině.

6. Turbulentní přenos hmoty

Přenos hmoty se uskutečňuje **pohybem turbulentních vírů** v tekutině.

V průmyslové praxi je nejčastější **koncentrační difúze**, jejíž hnací silou je koncentrační spád, nebo také gradient koncentrace, a **konvektivní přenos hmoty** a to především přenos hmoty nucenou konvekci.

Pokud dochází k přenosu hmoty v nepohyblivých tekutinách, je hmota přenášena hlavně koncentrační difúzí v důsledku gradientu koncentrace. Při pohybu tekutiny se přenos hmoty uskutečňuje jak koncentrační difúzí, tak i konvektivním mechanismem přenosu. [12]

1.1.3 Konvektivní přenos hmoty

V mnoha případech při přenosu hmoty mezi fázemi, které jsou ve vzájemném styku, dochází i k jejich vzájemnému pohybu. Tento pohyb, respektive tok, může mít charakter **laminární** nebo **turbulentní**.

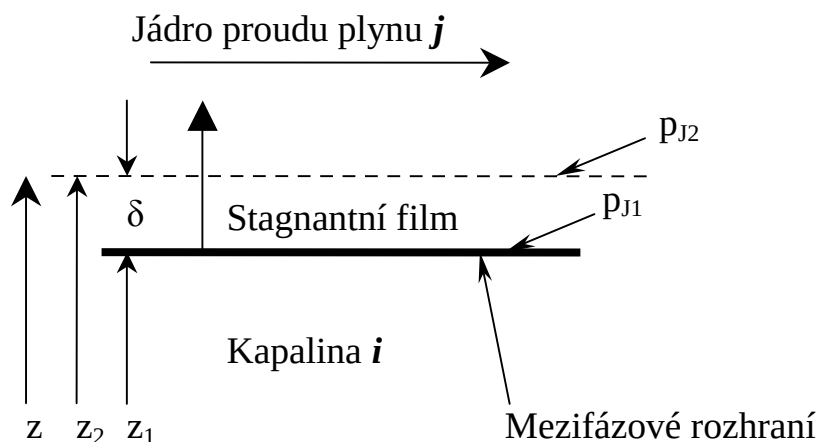
Při malých hodnotách Reynoldsova kritéria je tok složky podél fázového rozhraní **laminární**. Proudnic tekutiny jsou obvykle rovnoběžné s fázovým rozhraním. Přenos hmoty mezi fázemi má kolmý směr na toto rozhraní a tudíž je i kolmý na směr proudnic. Při těchto podmínkách pohyb fáze napomáhá přenosu hmoty a neurychluje tento proces. V případě laminárního proudění se přenos hmoty uskutečňuje mechanismem molekulární difúze napříč proudnic. Rychlost výměny látky je závislá na gradientu koncentrace a velikosti odporu při molekulární difúzi.

V **turbulentně** proudících fázích dochází k přenosu látky směrem k fázovému rozhraní jak molekulární difúzí, tak i důsledkem makroskopického děje, který je výsledkem vířivého pohybu tekutiny. Přenos hmoty je v tomto případě intenzivnější než při laminárním proudění, protože díky turbulenci se přemísťuje tekutina k fázovému rozhraní jako celek a výrazně tak přispívá k intenzivnější výměně přes toto rozhraní.

Postup při řešení úloh konvektivního přenosu hmoty je podobný postupu při řešení přenosu tepla konvekcí. Analyticky lze konvektivní přenos hmoty řešit jen pro laminární proudění a pouze v jednoduchých geometrických konfiguracích. Při řešení složitějších úloh, a těch je v praxi většina, se používá metod teorie podobnosti doplněných experimentem. [6]

1.1.4 Filmová teorie přenosu hmoty

Filmová teorie předpokládá, že celý difúzní odpor přenosu hmoty je kladen filmem o tloušťce δ nad mezifázovým rozhraním. Jedná se o pomyslný rozměr představující tloušťku stagnantní vrstvy plynu B mající takový difúzní odpor (molekulární přenos), jako je difúzní odpor odpovídající působení skutečného mechanismu, tj. konvektivního a molekulárního přenosu.



Obr. 2. Schéma přenosu hmoty podle filmové teorie

Odvozením a matematickými úpravami lze získat rovnici popisující hustotu toku hmoty přes mezifázové rozhraní:

$$N_i = \frac{D_{ij}}{R \cdot T \cdot d} (p_{J1} - p_{J2}) \quad (11)$$

kde D_{ij} je difúzní koeficient, $R = 8,314 \text{ kJ/(kg.mol.K)}$, T je absolutní teplota, δ je tloušťka filmu a p_{J1} a p_{J2} jsou parciální tlaky působící na rozhraní filmu. [5]

1.1.5 Analogie mezi přenosem tepla a hmoty

Souvislosti mezi přenosem tepla a hmoty jsou patrné z tvaru Fourier-Kirchhoffovy rovnice a druhého Fickova zákona. Tvarově jsou si i podobné základní vztahy popisující konvektivní přenosy:

$$n = b_c \cdot (c_1 - c_2) \quad (12)$$

$$q = a \cdot (T_1 - T_2) \quad (13)$$

Lze také vytipovat i tvarově podobná kritéria podobnosti:

pro přestup tepla Nu, Re, Pr, Fo

pro přenos hmoty Sh, Re, Sc, Fo_D

Pokud budeme chtít výsledky získané při přenosu tepla použít při výpočtech přenosu hmoty, musíme respektovat následující zásady:

- musí být zachována úplná geometrická podobnost
- většina vztahů pro přestup tepla byla odvozena za podmínek, kdy nedocházelo k přenosu hmoty a proto odpovídají případům přenosu hmoty při malých hustotách toku hmoty
- fyzikální parametry složek směsi jsou konstantní
- ve sledovaných systémech nejsou zdroje vzniku vlastností
- vliv disipace mechanické energie a vliv záření je zanedbatelný

Tato analogie je ale i tak použitelná jen ve speciálních případech, protože počet omezujících faktorů je příliš velký. [6]

1.2 ZÁKLADNÍ VELIČINY A VÝPOČTOVÉ VZTAHY

Vzhledem k tomu, aby nedošlo v textu k nedorozumění a nepřesnostem je nutné také uvést základní vztahy pro výpočet jednotlivých veličin nejčastěji používaných v oboru přenosu hmoty.

1.2.1 Způsoby vyjádření koncentrací

Hmotový zlomek složky i , a_i :

$$a_i = \frac{m_i}{\sum_{i=1}^k m_i} \quad (14)$$

kde m je hmotnost $[kg]$

Molární zlomek složky i , x_i :

$$x_i = \frac{n_i}{\sum_{i=1}^k n_i} \quad (15)$$

kde n je látkové množství $[mol]$

Objemová koncentrace složky i , c_i podle hmotnosti:

$$c_i = \frac{m_i}{V} \quad (16)$$

kde m_i je hmotnost složky i ve směsi $[kg]$ a V je celkový objem směsi $[m^3]$

Objemová koncentrace složky i , c_{ni} podle látkového množství:

$$c_{ni} = \frac{n_i}{V} \quad (17)$$

kde n_i je látkové množství složky i ve směsi [mol] a V je celkový objem směsi [m^3]

Relativní hmotový zlomek složky i , Y_i :

$$Y_i = \frac{m_i}{m_j} \quad (18)$$

kde m_i je hmotnost složky i [kg] a m_j je referenční hmotnost [kg]

Pro dvousložkovou difúzi platí pro hmotové i molární zlomky následující vztahy:

$$a_1 + a_2 = 1 \quad (19)$$

$$x_1 + x_2 = 1 \quad (20)$$

[14]

1.2.2 Způsoby vyjádření hmotového toku

Hustota hmotového toku složky i , M_i :

$$M_i = c_i \cdot v_i \quad (21)$$

kde c_i je koncentrace složky i [kg/m^3] a v_i je průměrná rychlost částic [m/s]

Hustota látkového toku složky i , N_i :

$$N_i = c_{ni} \cdot v_n \quad (22)$$

kde c_{ni} je koncentrace složky i [$kmol/m^3$] a v_n je průměrná rychlost částic [m/s]

[14]

1.2.3 Způsoby vyjádření rychlostí

Protože ve směsi mají jednotlivé částice různou rychlost, zavádí se průměrné rychlosti, které obecně popisují rychlosti částic v celé směsi.

Průměrná rychlost částice obsahující k složek podle hmotnosti, v :

$$v = \sum_{i=1}^k v_i \cdot a_i \quad (23)$$

kde v_i je průměrná rychlost částic [m/s] a a_i je hmotový zlomek složky i [1]

Průměrná rychlost částice obsahující k složek podle látkového množství, v_n :

$$v_n = \sum_{i=1}^k v_i \cdot x_i \quad (24)$$

kde v_i je průměrná rychlost částic [m/s] a x_i je molární zlomek složky i [1]

Rychlost složky i vzhledem k průměrné rychlosti směsi podle hmotnosti, v_{dif} :

$$v_{dif} = v_i - v \quad (25)$$

Rychlost složky i vzhledem k průměrné rychlosti směsi podle látkového množství, v_{nidif} :

$$v_{nidif} = v_i - v_n \quad (26)$$

[14]

1.2.4 Způsoby vyjádření hustot difúzních toků

Hustota difúzního toku podle hmotnosti, J_i :

$$J_i = c_i \cdot v_{dif} = c_i \cdot (v_i - v) \quad (27)$$

kde J_i je hustota difúzního toku podle hmotnosti [$kg/(m^2 \cdot s)$], c_i je objemová koncentrace složky i [kg/m^3], v_{dif} je rychlost složky i (v_i) vzhledem k průměrné rychlosti (v) [m/s].

Tato rovnice představuje hmotnostní průtok složky i procházející za jednotku času jednotkovou plochou a je vztažena k pohybu složky i ve směsi, ne k pevnému souřadnému systému. [14]

Hustota difúzního toku podle látkového množství, J_{ni} :

$$J_{ni} = c_{ni} \cdot v_{nidif} = c_{ni} \cdot (v_i - v_n) \quad (28)$$

kde J_{ni} je hustota difúzního toku podle látkového množství [$kmol/(m^2 \cdot s)$], c_{ni} je objemová koncentrace složky i podle látkového množství [kg/m^3], v_{nidif} je rychlost složky i (v_i) vzhledem k průměrné rychlosti (v_n) podle látkového množství [m/s]. [14]

1.3 FÁZOVÉ ROVNOVÁHY

Difúzní procesy jsou charakterizovány přechodem látky mezi fázemi a proto jsou v této kapitole také zmíněny **fázové rovnováhy**, které s difúzí úzce souvisí. Především jsou zde vysvětleny některé **základní pojmy** a **fázové pravidlo**.

1.3.1 Základní pojmy

Velmi důležitou vlastností látek je jejich **skupenství**. Látky se vyskytují ve třech skupenstvích: plynném, kapalném a pevném. Za určité teploty a tlaku může daná látka existovat ve dvou, nebo i ve třech skupenstvích vedle sebe (například led, voda a vodní pára), přičemž v tomto případě existuje každé skupenství nezávisle na druhých.

Jednotlivá skupenství dané látky, která jsou součástí jednoho systému, jsou stejnorodá a vzájemně oddělena rozhraními, lze od sebe mechanicky oddělit. Takové skupenství se nazývají **fázemi**. Rozeznáváme plynnou, kapalnou a pevnou fázi.

Fáze, které jsou fyzikálně **stejnorodé**, čili **homogenní**, mohou být buď **jednoduché**, nebo **složené**. Složené fáze se mohou například skládat ze vzájemně rozpustných plynů tvořících **homogenní směs**.

Ve složitějších směsích se může vyskytovat několik fází stejného skupenství. Například dvě vzájemně nerozpustné kapaliny mohou tvořit dvě kapalně oddělené viditelným rozhraním. Každá z obou kapalných fází přitom může být čistá kapalina, nebo se může skládat z několika složek.

Jednotlivé složky směsi jsou přitom takové látky, jejichž koncentraci v různých fázích dané směsi můžeme nezávisle měnit.

Je-li v daném systému pouze jedna fáze, pak se takový systém nazývá **stejnorodý**, nebo také **homogenní**. Skládá-li se systém z několika fází, nazývá se **nestejnorodý**, čili **heterogenní**. Jestliže se v heterogenním systému vyskytuje jedna fáze v jemně rozptýleném stavu, říká se takové fázi **dispergovaná** neboli **vnitřní**. Druhá fáze, která obklopuje částice dispergované fázi je **disperzní**, neboli **vnější** fáze. [7]

1.3.2 Fázové pravidlo

Daná fáze může v homogenním, nebo heterogenním systému existovat jen za určitých podmínek. Při změně těchto podmínek se naruší rovnováha systému a dojde ke změně fází, nebo přechodu látky z jednoho stavu do druhého. **Fázové pravidlo** určuje zda daná fáze může existovat v rovnováze s jinými fázemi.

Podmínky, za kterých mohou být jednotlivé fáze systému v rovnováze se mohou měnit. Ze všech možných se budou dále uvažovat jen tři proměnné. Teplota, tlak a koncentrace.

Počet proměnných, které lze měnit, aniž tím bude způsoben vznik, nebo zánik nějaké fáze, se nazývá **počet stupňů volnosti**.

Bude-li počet stupňů volnosti označen jako V , počet fází systému jako P a počet složek systému jako C , lze formulovat fázové pravidlo takto:

$$C + 2 = P + V \quad (29)$$

Fázové pravidlo určuje nejen podmínky existence fází, ale i jejich nejvyšší možný počet v daném systému. Toto si lze nejlépe předvést na následujícím příkladu.

V jednosložkové směsi ledu, vody a vodní páry je počet složek $C = 1$ a počet fází $P = 3$. Podle fázového pravidla pak bude počet stupňů volnosti tohoto systému:

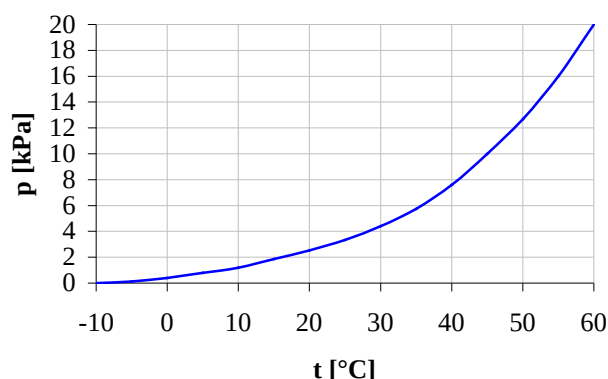
$$V = C + 2 - P = 1 + 2 - 3 = 0 \quad (30)$$

Nemá-li tento systém žádný stupeň volnosti, tedy je **nonvariantní**, mohou vedle sebe existovat všechny tři fáze jen za zcela určité teploty a tlaku. Jakákoliv změna těchto veličin bude mít za následek zánik jedné z fází. [7]

1.3.3 Jednosložkové systémy

Skládá-li se systém z jedné složky a jedné fáze, má podle fázového pravidla dva stupně volnosti. Jednosložkový systém se dvěma fázemi, což může být jakákoliv čistá kapalina se svou nasycenou párou, má jeden stupeň volnosti. To znamená, že každé hodnotě tlaku nasycené páry čisté kapaliny odpovídá jediná teplota a naopak každé teplotě odpovídá jediná hodnota tlaku.

Pro každou kapalinu lze tedy sestavit takzvanou **křivku tlaku par**. Jako příklad je zde uvedena křivka tlaku nasycené vodní páry (Obr. 3.).



Obr. 3. Křivka tlaku nasycené vodní páry

Při výpočtech rozdělování homogenních směsí je nutné znát křivky tlaků par čistých kapalin tvořících směs. Tyto křivky se většinou sestavují na základě pokusných dat a bývají uvedeny ve fyzikálně chemických tabulkách.

Pokud se stane, že pokusná data nejsou k dispozici, je nutné vypočítat tlak par teoreticky. Teoreticky lze vyjádřit závislost tlaku par na teplotě **Clausius-Clapeyronovou rovnicí**:

$$\frac{dP}{dT} = \frac{r}{A \cdot (V - V_0) \cdot T} \quad (31)$$

kde p je měrný tlak [kg/m^2], r je výparné teplo [$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{mol})$], $A = \frac{1}{427}$ je tepelný ekvivalent mechanické práce [$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{m})$], T je absolutní teplota páry [K], V je molární objem páry [$\text{m}^3/(\text{kg} \cdot \text{mol})$], V_0 je molární objem kapaliny [$\text{m}^3/(\text{kg} \cdot \text{mol})$].

V malém rozmezí teplot můžeme uvažovat výparné teplo r za konstantní. Rozdíl objemů $V - V_0$ je přibližně roven V , protože objem kapaliny V_0 je obvykle v poměru k objemu páry V zanedbatelný. Mimo to platí pro jeden $\text{kg} \cdot \text{mol}$ rovnice:

$$A \cdot P \cdot V = R \cdot T \quad (32)$$

kde $R = 8,314 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{mol} \cdot \text{K})$

Za těchto předpokladů má Clausius-Clapeyronova rovnice tvar:

$$\frac{dP}{dT} = \frac{r}{\frac{R \cdot T^2}{P}} \quad (33)$$

nebo po úpravě:

$$\frac{dP}{P} = \frac{r}{T} \cdot \left(\frac{dT}{T^2} \right) \quad (34)$$

Po integraci této rovnice v mezích od P_1 do P_2 a od T_1 do T_2 dostaneme:

$$\ln \frac{P_2}{P_1} = \frac{r}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \quad (35)$$

Podle pravidla o lineárnosti chemicko technických funkcí lze sestavit diagram závislosti tlaku par kterékoliv látky na tlaku par nějaké standardní látky. [7]

1.3.4 Způsoby vyjadřování složení fází

Složení kapalně fáze se obvykle udává koncentracemi jednotlivých složek roztoku vyjádřenými hmotnostními zlomky nebo hmotnostními procenty.

Při rozboru a výpočtech difúzních procesů bývá výhodnější vyjadřovat složení roztoku ne v hmotnostních, ale v molárních koncentracích složek.

Způsoby vyjadřování koncentrací jsou uvedeny v kapitole 1.2.1 Způsoby vyjádření koncentrací. [7]

1.4 HMOTOVÁ BILANCE

Tak jako v oblasti přenosu tepla a přenosu hybnosti může se i zde provést **hmotová bilance** složky i v konečně velkém kontrolním objemu V , který je pevně spojen se souřadným systémem x, y, z . Bilanční rovnice má poté obecný tvar, který lze slovně popsat jako:

Rychlost akumulace složky i v kontrolním objemu V	+	Výsledná rychlost přívodu složky i povrchem objemu	-	Rychlost vzniku složky i uvnitř objemu V	= 0
--	---	--	---	--	-----

Matematickými úpravami je možné dojít k obecné bilanci platné pro jakýkoliv kontrolní objem:

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \nabla \cdot M_i - r_i = 0 \quad (36)$$

kde c_i je objemová koncentrace složky i [kg/m^3], M_i je hustota hmotového toku složky i [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] a r_i je rychlost vzniku složky i [$\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$]. Složka r_i se objevuje především tam, kde je přenos hmoty spojen s chemickými reakcemi.

Analogicky je možné napsat bilanční rovnici pro molární jednotky:

$$\frac{\partial c_{ni}}{\partial t} + \nabla \cdot N_i - r_{ni} = 0 \quad (37)$$

Bilanční rovnici přenosu hmoty složky i lze také psát ve tvaru:

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = -\nabla \cdot (c_i \cdot v) - \nabla \cdot J_i + r_i \quad (38)$$

Po dosazení za J_i a za předpokladu, že hodnoty ρ a D_{ij} budou konstantní vyjde tato rovnice:

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + v \cdot \nabla \cdot c_i = D_{ij} \cdot \nabla^2 \cdot c_i + r_i \quad (39)$$

Je patrné, že rovnice má podobný tvar jako Fourier–Kirchhoffova rovnice pro přenos energie (je-li ve Fourier-Kirchhoffově rovnici zanedbám člen vyjadřující disipaci mechanické energie). **Tato podobnost je základem analogie mezi přenosem tepla a hmoty.** Vzhledem ke zjednodušení je dobré shody obou teorií dosaženo pro děje probíhající při konstantních teplotách a nízkých koncentracích.

Rovnice (39) je parciální diferenciální rovnice, která je navíc nelineární. Pro řešení této rovnice je zapotřebí několik okrajových podmínek. Okrajové podmínky jsou velmi podobné okrajovým podmínkám pro sdílení tepla. Nejčastěji používané okrajové podmínky jsou:

1. **Okrajová podmínka prvního druhu**, kdy je v určitém místě zařízení předepsána koncentrace. Může to být kterákoliv koncentrace definovaná v kapitole 1.2.1 Způsoby vyjádření koncentrací.
2. **Okrajová podmínka druhého druhu**, která předepisuje v určitém místě hodnotu molárního nebo hmotnostního toku složky i .

3. **Okrajová podmínka třetího druhu** je pro soustavy obtékané tekutinou, kdy je některá ze složek po průchodu mezifázovým rozhraním odváděna difúzním nebo konvektivním mechanismem. Okrajovou podmínku pro mezifázové rozhraní kolmé na osu x lze psát takto :

$$N_{ix} = k_c \cdot (c_{nix} - c_{nif}) \quad (40)$$

kde k_c je difúzní koeficient pro konvektivní přenos hmoty v m/s , c_{nix} je molární koncentrace na povrchu tělesa, c_{nif} je molární koncentrace složky i v hlavním, neovlivněném proudu tekutiny.

Podobné vyjádření lze dostat i pro hmotnostní toky:

$$n_{ix} = k_c \cdot (c_{ix} - c_{if}) \quad (41)$$

4. Je **dána rychlost chemické reakce** u povrchu. V případě zániku složky A chemickou reakcí prvního řádu lze psát:

$$N_{ix} = k \cdot c_{nix} \quad (42)$$

Tato rovnice vyjadřuje, že rychlost zániku je úměrná koncentraci u povrchu, konstanta úměrnosti k je rychlostní konstanta chemické reakce prvního řádu. [12]

1.5 FICKOVY DIFÚZNÍ ZÁKONY

Fickovy difúzní zákony jsou nejdůležitějším matematickým vyjádřením difúze. Tyto diferenciální rovnice vyjadřují závislost hustoty toku na koncentraci látky a jsou pojmenovány podle svého objevitele **Adolfa Eugena Ficka**.

Adolf Eugen Fick (1829-1879) byl německý lékař a matematik. Narodil se 3.9.1829 jako nejmladší z pěti dětí. Jeho otec byl stavební inženýr a on sám se už v mládí projevil jako mimořádný matematický talent. Fick sám chtěl ve studiu tohoto oboru pokračovat i na univerzitě, ale jeho stráž bratr jej přesvědčil, aby se raději stal lékařem.

V roce 1847 Fick nastoupil na lékařskou fakultu na univerzitě v Marlburgu. Tam také přijal názor, že medicína a život samotný má základy v matematice, fyzice a chemii, což byla pro Ficka příležitost skloubit svou životní vášeň s oborem, kterým se zabýval. Část svých studií absolvoval také v Berlíně, ale nakonec se vrátil do Marlburgu, kde také v roce 1851 získal diplom. V letech 1852–1868 působil Fick na univerzitě v Zurichu, kam také spadá nejdůležitější část jeho práce. Poslední část svého života Fick prožil ve Vídni.

Adolf Eugen Fick byl vynikající vědec. Jeho největší přínos vědě ale paradoxně nespočívá v jeho studiích difúze, ale v jeho lékařských studiích. [13]

1.5.1 První Fickův difúzní zákon

Aby bylo možné určit koncentrační pole musí být znám vztah mezi hustotou toku a koncentrací, tzv. **konstitutivní rovnice**. Tato rovnice se označuje jako **První Fickův difúzní zákon**. Podle tohoto zákona existuje lineární vazba mezi hustotou difusního toku a gradientem koncentrace. Pro hustotu difúzního hmotnostního toku složky i ve dvousložkové směsi lze podle tohoto zákona psát :

$$J_i = -D_{ij} \cdot \nabla c_i = c \cdot D_{ij} \cdot \nabla a_i \quad (43)$$

kde D_{ij} je difúzní koeficient složky i do složky j .

V případech, kdy je konstantní hustota směsi ρ lze psát:

$$J_i = -D_{ij} \cdot \nabla c_i \quad (44)$$

Pro hustotu toku složky j lze analogicky psát :

$$J_j = -r \cdot D_{ji} \cdot \nabla w \quad (45)$$

Pro difúzní koeficienty D_{ij} a D_{ji} v plynech platí :

$$D_{ij} = D_{ji} \quad (46)$$

Pro hustotu difusního molárního toku složky i ve dvousložkové směsi lze psát První Fickův difúzní zákon ve tvaru:

$$J_{ni} = -D_{ij} \cdot \nabla c_{ni} = c_n \cdot D_{ij} \cdot \nabla x_i \quad (47)$$

Při konstantní molární koncentraci c_n se tato rovnice zjednoduší na tvar:

$$J_{ni} = -D_{ij} \cdot \nabla c_{ni} \quad (48)$$

Zvláštní význam pro odvození dalších vztahů má tvar Fickova zákona vyjádřený N_i , molární hustotou toku látky:

$$N_i = x_i \cdot (N_i - N_j) - c_n D_i \cdot \nabla x_i \quad (49)$$

1.5.2 Druhý Fickův difúzní zákon

Základní rovnice přenosu hmoty dostaneme po dosazení Fickova zákona do bilance složky i :

$$\frac{\partial c_{ni}}{\partial t} = -\nabla \cdot (\mathbf{u} \cdot c_i) + \nabla \cdot (c_n \cdot D_{ij} \cdot \nabla x_i) + r_{ni} \quad (50)$$

V případě konstantních hodnot c_n a D_{ij} přejde rovnice (50) do formy:

$$\frac{\partial c_{ni}}{\partial t} = -\mathbf{u} \cdot \nabla c_i - c_i \nabla \cdot \mathbf{u} + D_{ij} \nabla^2 c_{ni} + r_{ni} \quad (51)$$

Podobně při $\mathbf{u} = 0$ a bez chemické reakce přejde rovnice (51) do tvaru:

$$\frac{\partial c_{ni}}{\partial t} = D_{ij} \nabla^2 c_{ni} = c_n \cdot D_{ij} \cdot \nabla^2 x_i \quad (52)$$

Analogicky pro složku j lze psát:

$$\frac{\partial c_{nj}}{\partial t} = D_{ij} \nabla^2 c_{nj} = c_n \cdot D_{ij} \cdot \nabla^2 x_j \quad (53)$$

Rovnice (52) a (53) jsou označovány jako **Druhý Fickův difúzní zákon**.

Pro určení koncentračních polí je třeba znát ještě okrajové podmínky. Jedná se okrajové podmínky prvního, druhého a třetího druhu, definované v kapitole 1.4. HMOTOVÁ BILANCE. [5]

2 OPERACE SPOJENÉ S DIFÚZÍ

V průmyslové praxi se využívá celá řada procesů a postupů, které jsou přímo, nebo nepřímo spojené s difúzí. Proto je v této části obsažen stručný výčet základních pojmů a popis některých základních operací spojených s difúzí.

2.1 SORPČNÍ PROCESY

Sorpčními procesy lze obecně nazvat všechny děje, při kterých dochází k zachycování okolní látky pevnou látkou a při kterých nelze rozhodnout, má-li toto zachycování okolní látky na pevné látce **fyzikální**, nebo **chemickou podstatu**. Sorpční procesy jsou **selektivní**. To znamená, že každý absorbent a adsorbent pohlcuje jen některé látky a jiné vůbec ne, nebo jen velmi málo.

Sorpční procesy lze rozdělit na **absopci** a **adsorpci**. Děj opačný, to znamená uvolnění vázané látky, se nazývá **desorpce**. Okolní látce, se říká **absorbát**, nebo **adsorbát**. Látka, ke které se okolní částice poutají se nazývá **absorbent**, nebo **adsorbent**. Pevná látka, jak je v této kapitole uváděno z důvodu zjednodušení výkladu, ale není podmínkou. Obecně se může jednat o jakékoliv skupenství látky.

Zachycuje-li se okolní látka na pevnou látku pomocí van der Waalsových sil, nazývá se tento děj **fyzisorpce**. Okolní látka se může poutat k pevné látce jen při teplotách menších, než je kritická teplota okolní látky. Pokud se okolní látka poutá k pevné látce chemickými vazbami, nazývá se tento děj **chemisorpce**. Chemisorpce je mnohem silnější než fyzisorpce a okolní látka je k pevné látce poutána většinou kovalentními vazbami. To také znamená, že při chemisorpci dochází k chemické reakci a vzniku nové látky. [9]

2.1.1 Absorpce

Absorpce je děj, při kterém okolní látka, absorbát, prostupuje celou hmotou do absorbentu, takže vytvoří jakýsi roztok. Prakticky se jedná o rozpouštění plynů v kapalině. Přímoúměrnost mezi koncentrací okolního plynu a jeho parciálním tlakem nad kapalinou našel W. Henry a podle svého autora se nazývá Henryho zákon. S dostatečnou přesností ale platí jen pro malé tlaky plynu a pro malé koncentrace. Platí:

$$p = H \cdot c \quad (54)$$

kde p je parciální tlak nad kapalinou, H je Henryho konstanta, c je koncentrace pohlčeného plynu. [9]

2.1.2 Adsorpce

Adsorpce je děj, při kterém dochází ke změně koncentrace některé ze složek, jen na mezifázovém rozhraní. Je-li tato koncentrace vyšší než v okolí, nazývá se **pozitivní adsorpcí**, je-li nižší, jedná se o **negativní adsorpci**. Prakticky je adsorbentem vždy pevná látka a adsorbátem plyn, nebo kapalina.

Množství adsorbované látky se vzrůstajícím tlakem roste a s rostoucí teplotou klesá. Závislost adsorbované množství látky na tlaku, nebo na koncentraci, popisují adsorpční izotermy. Jsou to empirické vztahy a je to například Freundlichova izoterma:

$$a = k \cdot p^{\frac{1}{n}} \quad (55)$$

kde a je množství adsorbované látky, k je konstanta závislá na teplotě, druhu absorbátu i absorbentu, p je tlak v soustavě a n je číslo vždy větší než 1 a s rostoucí teplotou se blíží k 1.

Langmuirova izoterma:

$$A = \frac{a \cdot p}{1 + b \cdot p} \quad (56)$$

kde A je množství adsorbované látky, p je tlak v soustavě, a a b jsou konstanty pro danou soustavu vyjadřující míru adsorbovatelného množství látky na daný materiál. [9]

2.1.3 Desorpce

Desorpce je opakem absorpce a adsorpce. To znamená, že působením kinetické energie, nebo nárazem jiné částice s vyšší kinetickou energií se uvolňuje plyn z kapaliny, nebo se porušují vazby zachycené složky s pevnou látkou. [9]

2.2 SEPARAČNÍ METODY

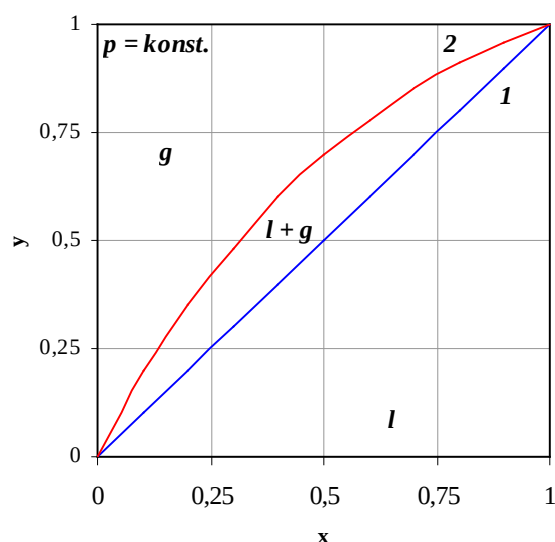
Při zpracovávání látek ve výrobě, nebo i konečné produkty mnoha výrobních procesů jsou směsi látek, které je od sebe potřeba rozdělit. Používá se k tomu několik metod, které se používají v různých obměnách. [10]

2.2.1 Destilace a rektifikace

Destilace je proces, při kterém se rozdělovaná kapalná směs ohřívá k varu. Vzniklé páry jsou pak odváděny a nechávají se zkondenzovat. Tím se získává kapalina, která má odlišné složení, než měla původní směs. Mnohonásobným opakováním tohoto procesu lze dosáhnout téměř úplného rozdělení na čisté složky.

Destilovat se nechávají roztoky, ve kterých je rozpouštědlo i rozpuštěná látka těkavé, protože tento **proces je založen na různé těkavosti kapalin tvořících směs**. Při stejné teplotě mají tyto složky různé napětí par. **Složení páry a tedy i kondenzátu se pak bude lišit od složení původní směsi**. Pára bude obsahovat více těkavější složky a poměrné zastoupení obou složek v páře bude poměr jejich těkavostí. Při destilaci dochází k částečnému, nebo úplnému rozdělení látek a ve většině případů jsou produktem destilace jak kondenzát, tak i neodpařený zbytek.

Pro řešení destilačních procesů má v praxi největší význam závislost složení plynné fáze na kapalně fázi. Této závislosti říkáme **x-y diagram** a sestavuje se za stálé teploty, nebo tlaku. Obr. 4 znázorňuje x-y diagram za konstantního tlaku. Protože většina destilačních zařízení pracuje v praxi za stálého tlaku, je tento typ x-y diagramu nejpoužívanější. [10]



Obr. 4. *x-y diagram za stálého tlaku*

kde g je pára, l je kapalina, p je tlak, x je obsah těkavější složky v kapalině, y je obsah těkavější složky v páře, 1 je křivka varu směsi a 2 je kondenzační křivka. [14]

Podle způsobu provedení destilace a rozdělení těkavosti, je možné rozdělit destilační procesy do několika skupin:

1. Jednoduchá destilace

Této metody se využívá k dělení směsí, skládajících se ze složek s velkým rozdílem těkavostí. Používá se jí hlavně k hrubému dělení směsí, nebo k čištění látek od příměsí, pryskyřice, nečistot apod.

2. Vakuová destilace a destilace přehánění vodní parou

Tento způsob destilace se používá pro dělení směsí, skládajících se z málo těkavé složky a netěkavé složky, kdy je nebezpečí rozkladu jedné z nich. Rozdělení se dosahuje snížením bodu varu málo těkavé složky.

3. Sublimace

Používá se k čištění málo těkavých tuhých látek, obsahujících příměsi netěkavých látek. Jednotlivé složky přecházejí přímo z pevné do plynné fáze.

4. Rovnovážná destilace

Jedná se o jednoduchou destilaci, kdy pára a kapalina jsou v neustálém rovnovážném styku. Používá se především z energetických důvodů při chlazení na nízké teploty. [14]

5. Rektifikace

Je to velmi rozšířený způsob. Jedná se vlastně o několikanásobnou destilaci, kdy na sebe jednotlivé stupně přímo navazují. Odcházející páry přicházejí do styku se stékající kapalinou, získanou částečnou kondenzací par. [14]

Opačným procesem destilace je **parciální kondenzace**. Jedná se o částečné zkapalnění parní směsi, při kterém se složení kondenzátu značně liší od složení par. Nejdůležitější vlastností látek v tomto procesu je jejich těkavost. [14]

S tématem destilace také úzce souvisí pojem **kondenzace**. Jedná se o zkapalňování plynů, které dosáhneme snížením kinetické energie molekul plynu. Toho lze docílit buďto dostatečným zvýšením tlaku, nebo snížením teploty, nebo obojím. Důsledkem kondenzace plynu je také náhlá a velká změna objemu kondenzované látky. [9]

2.2.2 Extrakce

Extrakce je částečné, nebo úplné rozdělení směsí látek, které mají **různou rozpustnost v různých rozpouštědlech**. Tato metoda je založena na schopnosti látek, přítomných v dotýkajících se fázích v různých koncentracích, difundovat z jedné fáze do

druhé. Při extrakci se směs zpracovává rozpouštědly tak, aby složka, která má být ze směsi oddělena přešla do roztoku. Fáze, které případně vzniknou vzájemným působením rozpouštědla a extrahované směsi se od sebe rozdělují usazováním a dekantací, filtrací, odstředováním, přidáním látek, které způsobují rozvrstvení roztoku na dvě kapalně fáze, tzv. **vysolováním**, nebo přidáním látek, které způsobují vyloučení pevné fáze, tzv. **krystalizací**. K získání složky v čistém stavu je nutné získaný roztok s extrahovanou složkou ještě destilovat, nebo krystalizovat, nebo obě operace současně a ze získaných krystalů odstranit zbytek rozpouštědla filtrací, odstředováním a sušením. [9]

Při extrakci bývá většinou potřeba oddělit od sebe kapalnou a tuhou fázi. K tomu se používá několika metod, které tyto dvě fáze od sebe oddělují. **Usazování** a **dekantace** je proces, při kterém se pevná látka se nechá usadit a kapalina se pak opatrně odlije, nebo odsaje. Při **filtraci** se oddělují dvě fáze přes propustný materiál, kterým prochází jen jedna fáze. Využívá se přitom tíhy vlastní kapaliny, nebo rozdílu tlaků na obou stranách filtru. Dalším způsobem oddělení dvou fází je **odstředování**. Používá se především tam, kde nelze použít filtraci. Tato metoda je závislá na rozdílu hustot obou fází, na jejich odstředivé síle a na poloměru a frekvenci otáčení. **Krystalizace** lze také dosáhnout **odpařením** části rozpouštědla tak, že se začnou krystaly pevné látky sami vylučovat v důsledku snížení rozpustnosti. [10]

2.3 SUŠENÍ

Sušení je proces, při kterém se pomocí tepelné energie odstraňuje z materiálu vlhkost ve formě par. Sušení je difúzní proces, protože vlhkost přechází z vnitřních vrstev na povrch materiálu a z povrchu materiálu vypařováním vlhkosti volně do okolí.

Sušení se dělí na přirozené a umělé. **Přirozené sušení** znamená, že materiál necháme pouze na vzduchu, bez jakéhokoliv dalšího ovlivňování, nebo regulace tohoto procesu. Přirozené sušení trvá ovšem velmi dlouho a materiál má i po skončení tohoto procesu relativně velkou konečnou vlhkost. Proto se v průmyslové praxi používá téměř výhradně sušení umělé. **Umělé sušení** znamená, že k materiálu se přivádí sušící prostředek, například kouřové plyny, vzduch, pára atd., který když pohltí vlhkost je odváděn

speciálními zařízeními. Tento proces má oproti přirozenému sušení tu výhodu, že jej lze regulovat, trvá podstatně kratší dobu a poskytuje materiály s relativně malou konečnou vlhkostí.

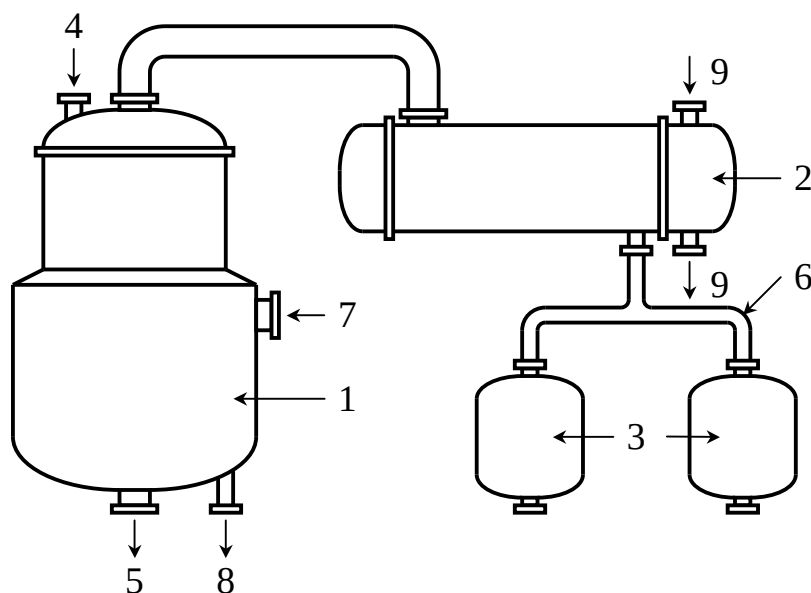
Jako i jiné procesy, má sušení svou statiku a kinetiku. **Statika sušení** určuje vztah mezi počátečními a konečnými parametry. Statika sušení umožňuje vypočítat složení materiálu, spotřebu sušícího prostředku a spotřebu tepla. Určuje se z materiálové a tepelné bilance. **Kinetika sušení** určuje závislost mezi změnou vlhkosti materiálu v čase a mezi parametry sušícího procesu. [7]

3 TECHNICKÉ PROSTŘEDKY A ZAŘÍZENÍ VYUŽÍVAJÍCÍ DIFÚZNÍ POCHODY

Při zpracovávání materiálů a ve výrobě se používá mnoho různých zařízení, využívajících difúzní pochody. Mezi ty nejvíce využívané patří různé konstrukce destilačních a extrakčních zařízení a sušáren.

3.1 DESTILAČNÍ ZAŘÍZENÍ

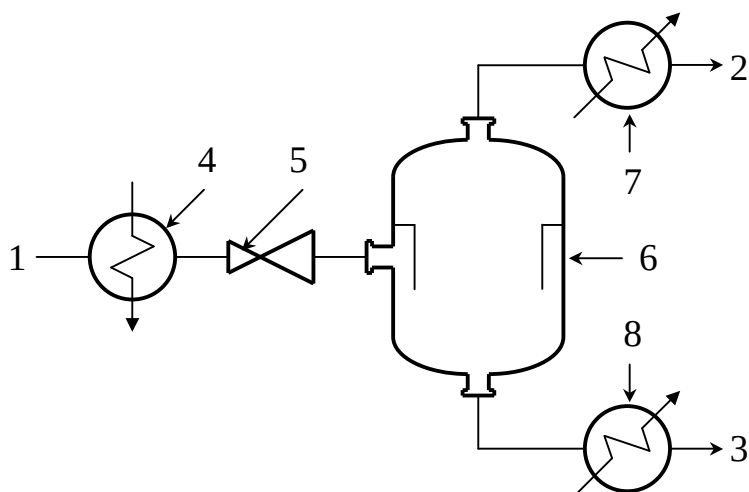
Diferenciální destilace. V průmyslu se využívá k dělení jednotlivých složek z vícesložkových směsí. Jedná se o přetržitou operaci, ze které můžeme destiláty odebrat odděleně.



Obr. 5. Schéma diferenciální destilace

kde 1 – destilační kotel; 2 - kondenzátor; 3 - předloha; 4 - surovina; 5 - zbytek; 6 - destilát; 7 – topná pára; 8 - kondenzát; 9 – chladicí voda [14]

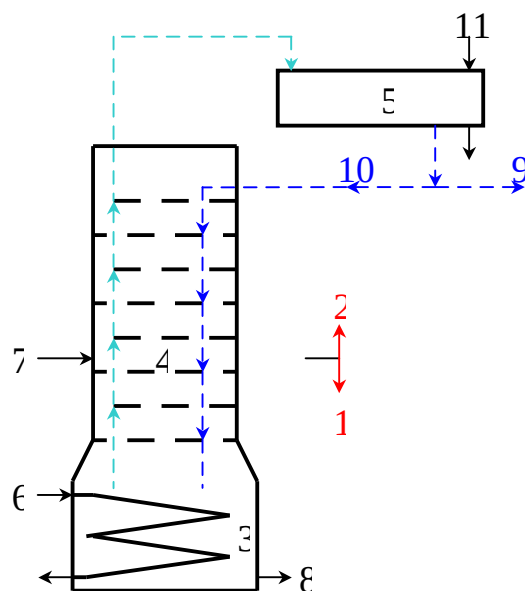
Rovnovážná destilace. Je to kontinuální operace. Množství přiváděné směsi je regulováno regulačním ventilem. Směs se předeheřeje na žádanou teplotu a po separaci žádané složky je odváděn jak kondenzát, tak i zbytek po destilaci.



Obr. 6. Schéma rovnovážné destilace

kde 1 - nástřik; 2 - destilát; 3 - zbytek; 4 - předeheřivač; 5 – regulační ventil; 6 - separátor; 7 - kondenzátor; 8 – chladič zbytku. [14]

Rektifikační kolona. Tyto kolony mají výbornou účinnost. Je to velmi rozšířený způsob. Jedná se vlastně o několikanásobnou destilaci, kdy na sebe jednotlivé stupně přímo navazují. Odcházející páry z každého stupně přicházejí v dalším patře kolony do styku se stékající kapalinou, získanou částečnou kondenzací par. Tato směs prochází destilací a páry odcházejí do dalšího patra, kde se celý proces opakuje. Tímto způsobem lze získat velmi čistou látku. [9]

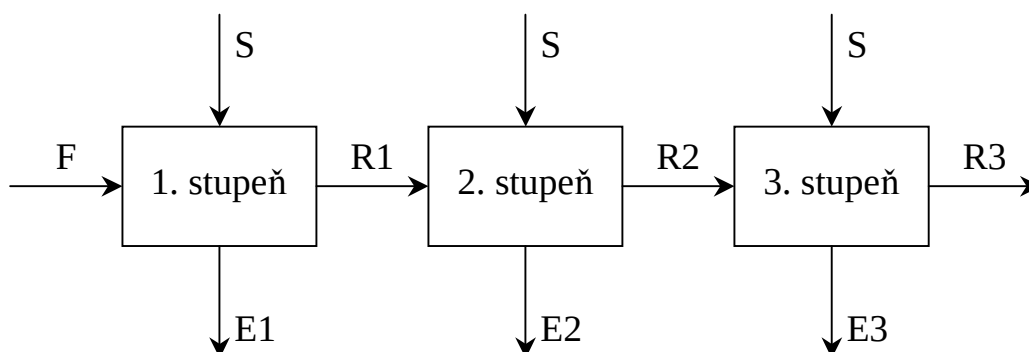


Obr. 7. Schéma rektifikační kolony

kde 1 – ochuzovací část kolony; 2 – obohacovací část kolony; 3 - vařák; 4 – nástřikové patro; 5 - kondenzátor; 6 – topná pára; 7 - nástřik; 8 - zbytek; 9 - destilát; 10 – zpětný tok; 11 – chladicí voda. [14]

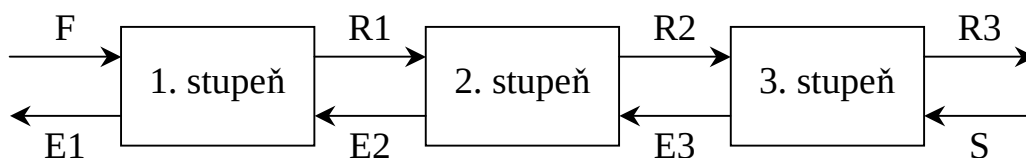
3.2 EXTRAKČNÍ ZAŘÍZENÍ

V praxi jsou dva typy extrakce. Přetržitá a nepřetržitá. **Přetržitá extrakce** bývá realizována jako stupňovitá extrakce s postupným přidáváním rozpouštědla, nebo jako stupňová protiproudá extrakce. **Nepřetržitá extrakce** bývá realizována v tzv. extrakčních kolonách.



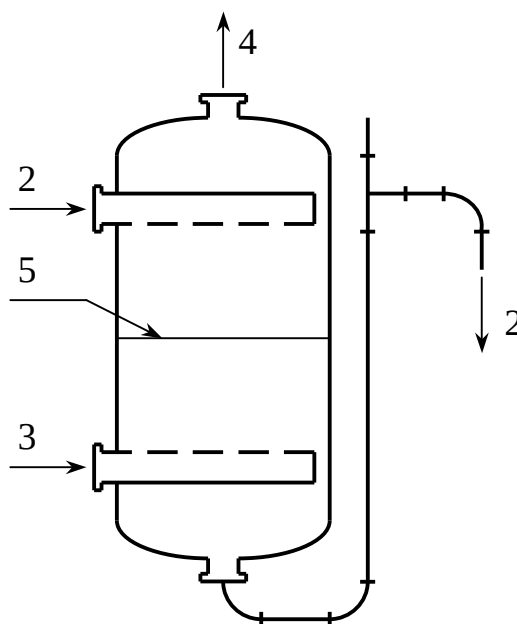
Obr. 8. Blokové schéma stupňové extrakce s postupným přidáváním rozpouštědla

kde E – extrakt (extrakční činidlo obohacené o extrahovanou složku); F - surovina; R – rafinát (ochuzená surovina); S – extrakční činidlo. [14]



Obr. 9. Blokové schéma stupňové protiproudé extrakce

kde E – extrakt (extrakční činidlo obohacené o extrahovanou složku); F - surovina; R – rafinát (ochuzená surovina); S – extrakční činidlo. [14]

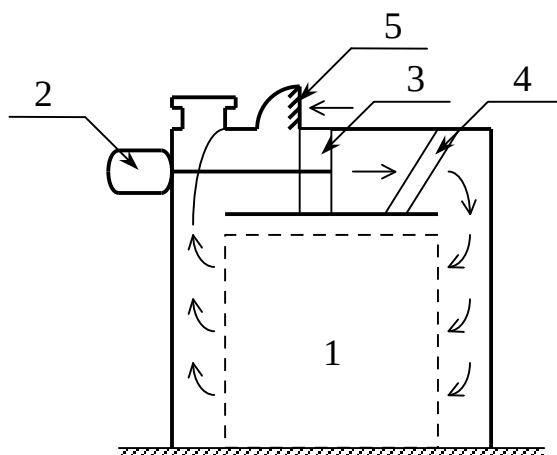


Obr. 10. Schéma extrakční kolony

kde 1 – vstup těžší kapaliny; 2 – výstup těžší kapaliny; 3 – vstup lehčí kapaliny; 4 – výstup lehčí kapaliny; 5 - rozhraní. [14]

3.3 SUŠÁRNY

Při konstrukci sušáren se v praxi přihlíží k různým aspektům a nich i závisí použitý typ sušárny. Mezi tyto aspekty například patří druh sušícího prostředí, jestli je materiál v klidu, nebo v pohybu, provozní tlak, proudění sušícího prostředí kolem sušeného materiálu atd. Na základě těchto parametrů se ve výrobě používají různé konstrukce sušáren, jako je skříňová sušárna, tunelová sušárna, lopatková sušárna, bubnová sušárna a mnoho jiných. Jako příklad ze všech možných typů konstrukcí lze uvést například **skříňovou sušárnu** (Obr. 11.). V této sušárně je materiál uložen v klidu a do sušárny je nasávám přes nastavovací klapky ohřátý vzduch, který se nechá proudit přes tepelný výměník kolem sušeného materiálu, dokud se nedosáhne požadované vlhkosti.



Obr. 11. Schéma skříňové sušárny

kde 1 – sušený materiál; 2 – motor ventilátoru; 3 - ventilátor; 4 – tepelný výměník; 5 – nasávací klapky. [14]

II. VÝPOČTOVÁ ČÁST

4 PŘÍKLADY

V oblasti difúze se lze setkat s mnoha typy více, či méně obtížných příkladů. Tato kapitola je zaměřena spíše na ty jednodušší příklady, pro pochopení základních typů úloh.

4.1 ŘEŠENÉ PŘÍKLADY

Příklad 1: Přepočít koncentrací

Přepočítejte molární koncentraci na molární podíl v binární plynné směsi, i, j . Jsou dány molární koncentrace c_{ni} složky i , hustota směsi ρ a molární hmotnosti obou složek M_i , M_j .

Řešení:

Analogicky z rovnice (15) lze psát:

$$x_{ni} = \frac{c_{ni}}{c_{ni} + c_{nj}} \quad (57)$$

Rovnici (17) lze také psát ve tvaru:

$$c_{nj} = \frac{r_j}{M_j} = \frac{r - r_i}{M_j} = \frac{r - c_{ni} \cdot M_i}{M_j} \quad (58)$$

Dosazením rovnice (55) do (56) a úpravou vyjde požadovaný vztah pro přepočet:

$$x_{ni} = \frac{c_{ni}}{c_{ni} + \frac{r - c_{ni} \cdot M_i}{M_j}} = \frac{c_{ni} \cdot M_j}{r + c_{ni} \cdot (M_j - M_i)} \quad (59)$$

[5]

Příklad 2: Difúze směsi čpavku a dusíku

Čpavek difunduje trubicí dlouhou $\delta = 8 \text{ cm}$ obsahující dusík při teplotě $T = 25 \text{ °C}$ a celkovém tlaku $p = 100 \text{ kPa}$. Parciální tlak amoniaku na jednom konci trubky je $p_{J1} = 10 \text{ kPa}$ a na druhém konci $p_{J2} = 2 \text{ kPa}$. Oba konce trubice ústí do dobře promíchávaných prostorů. Určete difúzní koeficient čpavku v dusíku při dané teplotě a tlaku, je-li molární hustota toku amoniaku $N_i = 9,27 \cdot 10^{-7} \text{ kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$.

Řešení:

Při řešení se vychází z rovnice (11), ze které se vyjádří difúzní koeficient:

$$D_{ij} = \frac{R \cdot T \cdot d \cdot N_i}{p_{J1} - p_{J2}} \quad (60)$$

$$D_{ij} = \frac{8134 \cdot 298 \cdot 0,08 \cdot 9,28 \cdot 10^{-7}}{10000 - 2000} = 2,3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \quad (61)$$

Difúzní koeficient čpavku v dusíku je při 25 °C a tlaku 100 kPa $2,3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. [5]

Příklad 3: Sublimace naftalenové kuličky

Kulička naftalenu ($C_{10}H_8$) o průměru $d = 20 \text{ mm}$ bude sublimovat v suchém stagnantním vzduchu při teplotě $T = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a tlaku $p = 100 \text{ kPa}$. Difúzní koeficient $D = 6,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, tenze par naftalenu při teplotě $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ je $p_{A1} = 8,5 \text{ Pa}$ a jeho hustota je $\rho = 1168 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Za jak dlouho kulička zcela odsublimuje? Rovnice pro sublimaci kulových částic je:

$$2 \cdot D \cdot c \cdot t \cdot \ln \frac{1-x_2}{1-x_1} = c_n (r_0^2 - r^2) \quad (62)$$

Řešení:

Hodnota x_1 se vypočítá jako:

$$x_1 = \frac{p_{A1}}{p} = \frac{8,5}{1 \cdot 10^5} = 8,5 \cdot 10^{-5} \quad (63)$$

Molární koncentrace pevného naftalenu c_n bude:

$$c_n = \frac{\rho}{M} = \frac{1168}{128,2} = 9,1 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3} \quad (64)$$

Koncentrace c se určí ze stavové rovnice:

$$p = c \cdot R \cdot T \quad (65)$$

$$c = \frac{p}{R \cdot T} = \frac{1 \cdot 10^5}{8314 \cdot 293} = 4,1 \cdot 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3} \quad (66)$$

Při určení času se vychází z rovnice (62), do které se dosadí za $r = 0$, $x_2 = 0$. Hodnota r_0 je počáteční poloměr kuličky, tedy 10 mm.

$$t = \frac{c_n(r_0^2 - r^2)}{2 \cdot D \cdot c \cdot \ln \frac{1-x_2}{1-x_1}} \quad (67)$$

$$t = \frac{9,1(1 \cdot 10^{-2})^2}{2 \cdot 6,5 \cdot 10^{-6} \cdot 0,041 \cdot \ln \frac{1}{1-8,5 \cdot 10^{-5}}} = 2,01 \cdot 10^7 \text{ s} = 5579,2 \text{ hod} = 232,5 \text{ dne} \quad (68)$$

Naftalenová kulička odsublimuje přibližně za 232,5 dne. [5]

Příklad 4: Difúzní koeficient NaCl v solném roztoku

U vzorku surové kůže byla provedena měření viz. Tab. 2. Vypočtěte difúzní koeficient NaCl v solném roztoku, je-li tloušťka vzorku $b = 0,0046 \text{ m}$, plocha vzorku $S = 0,0051 \text{ m}^2$, hmotnost vzorku $m = 0,029 \text{ kg}$, porozita $\varepsilon = 0,5$, teplota lázně $T = 23 \text{ }^\circ\text{C}$, objem lázně $V = 0,0005 \text{ m}^3$.

Tab. 2. Pokusně naměřené hodnoty

t [min]	m [g]	t [min]	m [g]	t [min]	m [g]
1	0,68	36	4,24	144	8,1
4	1,6	49	4,7	187	9,3
9	2,4	64	5,3	212	9,9
16	3,04	81	6,0	1440	13,9
25	3,65	100	6,5	2880	14,1

Nejdříve se vypočítá objem sušiny:

$$V_s = S \cdot b \quad (69)$$

$$V_s = 0,0046 \cdot 0,0051 = 2,35 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \quad (70)$$

Námokové číslo Na vyjadřující množství kapaliny, kterou je vzorek schopen nasát:

$$Na = \frac{V}{V_s} \quad (71)$$

$$Na = \frac{5 \cdot 10^{-4}}{2,35 \cdot 10^{-5}} = 21,31 \quad (72)$$

Výpočet koeficientu α :

$$a = \frac{Na}{e} = \frac{21,31}{0,5} = 42,62 \quad (73)$$

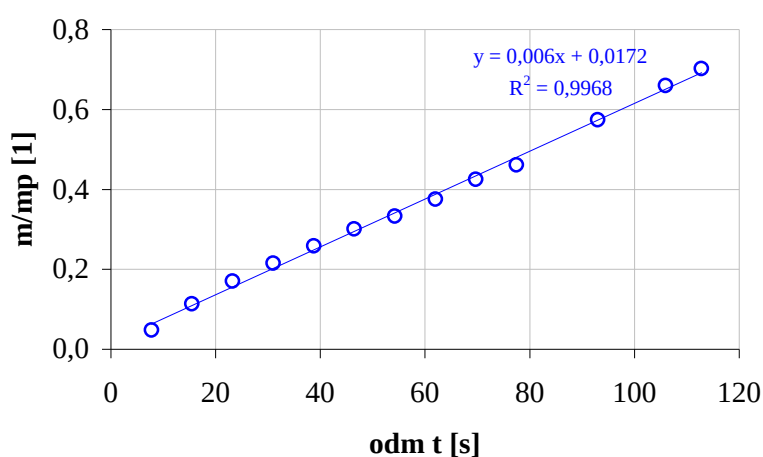
Výpočet rychlostního parametru λ :

$$k = \frac{2}{\sqrt{p}} \cdot \frac{1+a}{a} \cdot \sqrt{l} \Rightarrow l = \left(\frac{k \cdot \sqrt{p} \cdot a}{2 \cdot (1+a)} \right)^2 \quad (74)$$

kde k je směrnice závislosti poměrné hmotnosti m/m_p na odmocnině času t , m_p je konečná hmotnost vzorku zjištěná při měření:

Tab. 3. Závislost poměrné hmotnosti m/m_p na odmocnině času t

odm t [s]	m/m_p [1]	odm t [s]	m/m_p [1]	odm t [s]	m/m_p [1]
7,75	0,05	38,73	0,26	69,71	0,43
15,49	0,11	46,48	0,30	77,46	0,46
23,24	0,17	54,22	0,33	92,95	0,57
30,98	0,22	61,97	0,38	105,92	0,66

Obr. 12. Závislost poměrné hmotnosti m/m_p na odmocnině času t

Směrnice: $k = 0,006$

$$l = \left(\frac{0,006 \cdot \sqrt{p} \cdot 42,62}{2 \cdot (1 + 42,62)} \right)^2 = 2,7 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1} \quad (75)$$

Difúzní koeficient D se odvodí ze vztahu pro rychlostní parametr λ :

$$l = \frac{D}{\left(\frac{b}{2}\right)^2} \Rightarrow D = l \cdot \left(\frac{b}{2}\right)^2 \quad (76)$$

$$D = 2,7 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{4,6 \cdot 10^{-3}}{2} \right)^2 = 1,43 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \quad (77)$$

Difúzní koeficient $NaCl$ v solném roztoku je $D = 1,43 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

4.2 NEŘEŠENÉ PŘÍKLADY

Příklad 1: Akumulace prachu v plicích

Předpokládá se, že člověk stráví na pracovišti celkem 2 000 pracovních hodin za rok. Koncentrace prachu ve vzduchu je $1 \cdot 10^{-6}$ hmotnostního procenta a každou hodinu projde jeho plícemi 600 g vzduchu. Kolik prachu se ročně akumuluje v jeho plicích, předpokládá-li se, že nepoužíval žádnou ochrannou masku a jeho plíce pracovali se 100% filtrační účinností? [5]

($m = 1,2 \text{ g}$)

Příklad 2: Difuzivita vodní páry ve vzduchu

Vypočítejte difúzní koeficient vodní páry o teplotě 160°C ve vzduchu při tlaku 100 kPa . [2]

($D = 5,03 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)

Příklad 3: Difuzivita oxidu uhličitého v kyslíku

Difúzní koeficient oxidu uhličitého v kyslíku při teplotě 100°C a tlaku $46,6 \text{ kPa}$ je $4,75 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Vypočítejte, čemu se rovná hodnota difúzního koeficientu této směsi při teplotě 0°C a tlaku $0,1 \text{ MPa}$. [2]

($D = 1,39 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)

ZÁVĚR

Tato práce vznikla s cílem vytvořit jednoduchý učební text o problematice difúze. Snaží se vysvětlit, co to difúze vlastně je a vyjmenovává i základní pojmy, které souvisejí s difúzí. Výklad je soustředěn na koncentrační difúzi a také lehce zasahuje i do konvektivního přenosu hmoty, ale difúze jako taková může fungovat na několika fyzikálních principech a rozepisovat každý z nich by bylo obtížné a zdlouhavé. Koncentrační difúze je však nejčastějším případem přenosu hmoty, ať už jako přirozený přírodní pochod, nebo proces navržený a realizovaný člověkem, a proto je tento text zaměřen téměř výhradně k tomuto tématu.

Výkladem difúze ale tato práce nekončí. Rozhodne-li se někdo přečíst tento text, měl by také získat přehled i o tom, k čemu difúze také je a jaké operace jsou na ní založeny. Tyto pochody jsou zde vysvětleny spíše encyklopedicky, aby se čtenář případně dokázal rychle zorientovat v daném tématu. Sami o sobě to jsou totiž velmi obsáhlá témata, které není možné podrobně rozepsat v několika odstavcích. Na tyto operace navazuje i další kapitola, ve které jsou uvedena schémata těch nejběžnějších zařízení, realizujících difúzní pochody.

Závěrem se tu nachází také několik příkladů, vracejících se k první části této práce, k difúzním veličinám a způsobům jejich výpočtů. Tyto příklady byly vybrány z doporučené literatury a početně ověřeny. Příklady patří mezi jednodušší případy výpočtů pro snazší pochopení difúzní problematiky.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Kolomazník, K.: Teorie technologických procesů II, VUT Brno, FT Zlín, I. vydání, 1975
- [2] Míka, V. a kol.: Chemicko-inženýrské výpočty II, VŠCHT Praha, III. vydání, 1996, ISBN-80-7080-255-3
- [3] Míka, V. a kol.: Chemické inženýrství Díl 2, VŠCHT Praha, II. vydání, 1997
- [4] Kolat, P.: Přenos tepla a hmoty, FS, VŠB-TU Ostrava, 2001
- [5] Šesták, J.; Rieger, F.: Přenos hybnosti, tepla a hmoty, ČVUT Praha, III. vydání, 2004
- [6] Vacek, V.; Hlavačka, V.: Přenos tepla a hmoty, ČVUT Praha, 1990
- [7] Kasatkin, A. G.: Základní pochody a přístroje chemické technologie II, Technicko-vědecké vydavatelství Praha, 1952
- [8] Kolomazník, K.: Analýza dynamických systémů, VUT Brno, FT Zlín, 1988
- [9] Schlemmer, J., Valter, V.: Fyzikální chemie, SNTL Praha, II. vydání, 1957
- [10] Klouda, P.: Fyzikální chemie, Nakladatelství Pavel Klouda, I. vydání, 1997, ISBN-80-902155-2-1
- [11] Harenberg, B.: Kronika techniky, Fortuna Print Praha, I. vydání, 1993
- [12] Vít, T.: Základy přenosu tepla a hmoty III [online]. [cit. 2005-5-13]. Dostupný z WWW:
<http://www.kez.vslib.cz/web/hlavni/hlavni.php>
- [13] *The Physics of Life : Adolf Eugene Fick* [online]. [cit. 2005-5-14]. Dostupný z WWW:
<http://opus.utah.edu/~smith/Courses/666/lecture4/fick.html>
- [14] *Výuka FT : Procesní inženýrství II* [online]. [cit. 2005-3-14]. Dostupný z WWW:
<http://vyuka.ft.utb.cz/course/view.php?id=23>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

a	hmotový zlomek	[1]
A	plocha	[m ²]
A _{sp}	asociační parametr rozpouštědla	[1]
c	koncentrace	[kg.m ⁻³]
D	difúzní koeficient	[m ² .s ⁻¹]
J	hustota difúzního toku	[kg.m ⁻² .s ⁻¹]
k _c	konvektivní difúzní	[m ² .s ⁻¹]
l	délka	[m]
m	hmotnost	[kg]
M	hustota hmotového toku	[kg.m ⁻² .s ⁻¹]
M _{A,B}	molekulární hmotnost	[m ³ .mol ⁻¹]
n	látkové množství	[mol]
N	hustota molárního toku	[mol.m ⁻² .s ⁻¹]
Nu	Nusseltovo číslo	[1]
p	parciální tlak	[Pa]
P	absolutní tlak	[Pa]
Pr	Prandtlovo číslo	[1]
r	rychlost vzniku složky	[kg.m ⁻³ .s ⁻¹]
R	univerzální plynová konstanta	R = 8,314 kJ.kg ⁻¹ .mol ⁻¹ .K ⁻¹
Re	Reynoldsovo číslo	[1]
Sc	Schmidtovo číslo	[1]
Sh	Sherwoodovo číslo	[1]
V	objem	[m ³]
V _{A,B}	molekulární objem	[kg.mol ¹]

Y	relativní hmotový zlomek	[1]
α	součinitel přestupu tepla	$[\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}]$
β_c	součinitel přenosu hmoty	$[\text{m.s}^{-1}]$
δ	tloušťka mezní vrstvy	[m]
ε	porozita	[1]
η	dynamická viskozita	$[\text{N.s.m}^{-2}]$
ρ	hustota	$[\text{kg.m}^{-3}]$
ψ	součinitel difúzního odporu	[1]
ψ_s	součinitel klikatosti	[1]

Indexy:

A, B, i, j	složky A, B, i, j
ef	efektivní hodnoty
f	vztahuje se k hlavnímu proudu
n	podle molární hmotnosti
x	vztahuje se k rozhraní mezi fázemi

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. K určení pojmu difúze	10
Obr. 2. Schéma přenosu hmoty podle filmové teorie	18
Obr. 3. Křivka tlaku nasycené vodní páry.....	26
Obr. 4. x-y diagram za stálého tlaku	38
Obr. 5. Schéma diferenciální destilace	42
Obr. 6. Schéma rovnovážné destilace	43
Obr. 7. Schéma rektifikační kolony	44
Obr. 8. Blokové schéma stupňové extrakce s postupným přidáváním rozpouštědla.....	44
Obr. 9. Blokové schéma stupňové protiproudé extrakce	45
Obr. 10. Schéma extrakční kolony.....	45
Obr. 11. Schéma skříňové sušárny.....	46
Obr. 12. Závislost poměrné hmotnosti m/m_p na odmocnině času t	53

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Hodnoty difúzních koeficientů pro plyny	12
Tab. 2. Pokusně naměřené hodnoty	51
Tab. 3. Závislost poměrné hmotnosti m/m_p na odmocnině času t	53
Tab. 4. Tabulka pro přepočet koncentrací.....	62

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Přepočet koncentrací.....	62
--	----

PŘÍLOHA P I: PŘEPOČET KONCENTRACÍ

Tab. 4. Tabulka pro přepočet koncentrací

Hledá se	a_i	x_i	c_i	c_{ni}
Dáno				
a_i	-	$\frac{a_i}{M_i \sum_{i=1}^k \frac{a_i}{M_i}}$	$a_i r$	$r \frac{a_i}{M_i}$
x_i	$\frac{x_i M_i}{\sum_{i=1}^k x_i M_i}$	-	$r \frac{M_i}{M} x_i$	$r \frac{x_i}{M}$
c_i	$\frac{c_i}{\sum_{i=1}^k c_i}$	$\frac{c_i}{M_i \sum_{i=1}^k \frac{c_i}{M_i}}$	-	$\frac{c_i}{M_i}$
c_{ni}	$\frac{c_{ni}}{\sum_{i=1}^k c_{ni} M_i}$	$\frac{c_{ni}}{\sum_{i=1}^k c_{ni}}$	$c_{ni} M_i$	-