

POUŽITÍ ANORGANICKÝCH A POLYMERNÍCH MEMBRÁN PRO PERVAPORACI

PETR UCHYTL

Ústav chemických procesů, Akademie věd České republiky,
Rozvojová 135, 165 02 Praha 6
e-mail UCHYT@ICPF.CAS.CZ

Došlo dne 10.VI.1999

Klíčová slova: pervaporace, anorganické membrány, polymerní membrány

Obsah

1. Úvod
2. Pervaporace
3. Transport látek v membránách při pervaporaci
 - 3.1. Anorganické membrány
 - 3.2. Polymerní membrány
4. Stanovení porézní struktury anorganických membrán
 - 4.1. Permeační metoda
 - 4.2. Kelvinova metoda
5. Stanovení difuzivity a sorpce v polymerních membránách
6. Porovnání pervaporace na anorganických a polymerních membránách
7. Závěr

1. Úvod

Při membránových separačních procesech dochází k dělení směsi v membráně, která představuje polopropustné prostředí. Rychlý rozvoj těchto technologií během posledních dvaceti let je dán zejména jejich ekonomickou výhodností.

Membránové separace jsou často tříděny do skupin podle typu použité membrány a podle hnací síly transportu. Podle typu rozlišujeme porézní, neporézní a kapalně membrány. Při mikrofiltraci, ultrafiltraci, nanofiltraci a reverzní osmóze je k dělení separované směsi použit tlakový gradient přes porézní membránu. Pro dělení plynů či par a pervaporaci jsou používány membrány neporézní nebo s velmi malými póry – s poloměrem kolem 0,5 nm. Hnací silou je rozdíl parciálního tlaku dělených složek. Neporézní membrány jsou používány i při dialýze a pertrakci, kde hnací silou procesů je koncentrační gradient, a při elektrodialýze, kde hnací silou procesu je gradient elektrického potenciálu. Speciálním druhem jsou kapalně membrány tvořené stabilní emulzí, která je zakotvena v pórech membrány. Tato emulze odděluje dvě mísitelné kapaliny na opačných stranách membrány a umožňuje přestup separované látky z jedné kapaliny do druhé.

Membrány se dále rozlišují podle materiálu, ze kterého jsou připraveny, na polymerní a anorganické. Mezi anorganické patří membrány keramické (na bázi aluminu nebo siliky),

zeolitové a kovové, např. palladiové. Kromě kovových jsou všechny anorganické membrány porézní.

Za jeden z nejperspektivnějších membránových procesů je považována pervaporace. Přestože se pervaporace již řadu let používá např. pro výrobu bezvodého ethanolu (tisíců tun ročně v západní Evropě, ve Spojených státech a Brazílii)¹, není tento jednostupňový separační postup běžně znám. Článek by měl přispět k seznámení čtenářů s tímto separačním procesem.

2. Pervaporace

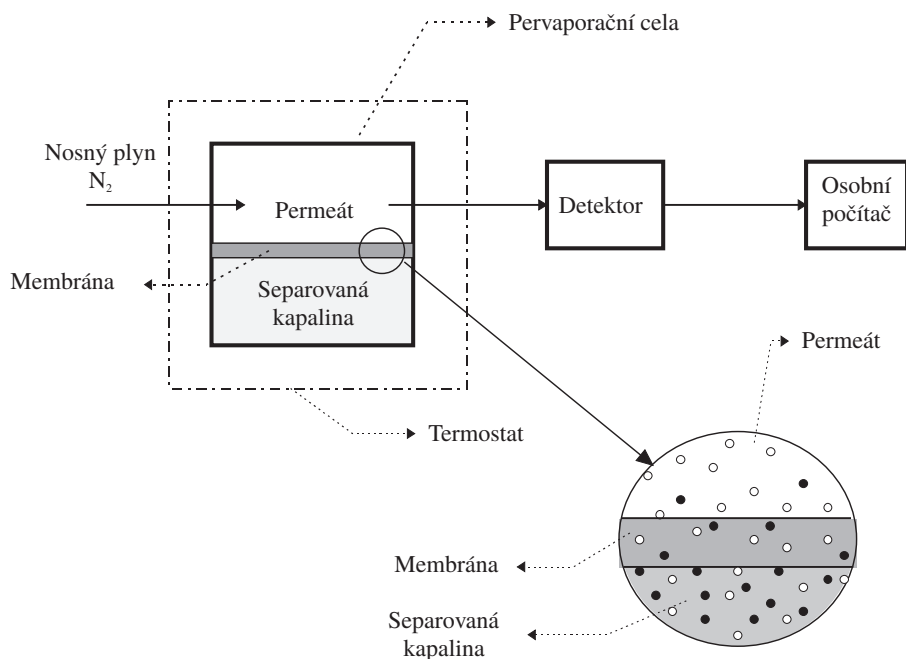
Pervaporace je separační proces, při kterém je kapalná směs dělena pomocí vypařování v membráně. Tento název byl zvolen pro zdůraznění faktu, že při separaci dochází k fázové změně dělených látek – z kapaliny na páru. Během pervaporace je na jedné straně membrány kapalná směs a na druhé straně buď vakuum (klasické uspořádání), či zde proudí nosný plyn (uspořádání „sweeping gas“). Hnací silou procesu je rozdíl chemických potenciálů dělených látek na opačných stranách membrány. Látky prošlé membránou jsou nazývány permeátem. Permeát je po opuštění pervaporační cely zkoncentrován. Dělený roztok ochuzený o přednostně permeující složku je označován jako retentát. Schéma jednoduchého pervaporačního zařízení typu „sweeping gas“ je na obr. 1.

V současné době se při pervaporaci používají téměř výlučně polymerní membrány. V dohledné době bude pravděpodobně možné využívat pro tento proces i membrány anorganické, které jsou již běžně používány při mikrofiltraci a ultrafiltraci, a to díky pokrokům v jejich přípravě. Předpokladem je úspěšné zvládnutí přípravy nanosené separační vrstvy s velmi malými póry. Velkou výhodou anorganických membrán v porovnání s polymerními je jejich chemická, tepelná, mechanická i biologická odolnost. Nevýhodou jsou vysoké náklady na výrobu spolu s jejich vysokou hmotností.

Pervaporace na polymerních membránách je průmyslově využívána zejména při dehydratacích alkoholů nebo jiných organických rozpouštědel¹. Intenzivně je studována možnost dalšího průmyslového použití v mnoha významných separačních procesech, např. při dehydrataci vodného roztoku kyseliny octové^{2,3}, dělení azeotropických systémů jako je např. systém methanol–methyl-terc. butylether⁴⁻⁸, separaci různých organických látek, např. směsi methanol–benzen a získávání vonných a aromatických látek z rostlinných materiálů v potravinářském průmyslu⁹⁻¹². Nejčastěji používanými typy polymerních membrán jsou membrány polyvinylalkoholové (pro dehydratace), silikonové (pro odstraňování organických látek z vody) a estery celulosy (pro dehydrataci a dělení organických sloučenin).

Veličinami určujícími obecně kvalitu separačních vlastností membrán je tok permeátu a separační faktor. Separační faktor α je definován jako podíl koncentrací látek A, B v permeátu (c_{a1} , c_{b1}) ku podílu jejich koncentrací v nástřiku (c_{a2} , c_{b2}).

$$\alpha = (c_{a1}/c_{b1}) / (c_{a2}/c_{b2}) \quad (1)$$



Obr. 1. Schéma pervaporační aparatury typu „gas sweeping“

Cílem současného výzkumu je připravit a pro separaci použít membrány s vysokým separačním faktorem a co nejvyšším tokem permeátu. Trendy těchto dvou veličin jdou téměř vždy proti sobě – s rostoucím tokem klesá hodnota separačního faktoru a opačně. Snaha o dosažení maximální hodnoty separačního faktoru je však pro většinu aplikací zbytečná, protože pohybuje-li se jeho hodnota v řádu stovek, je permeát prakticky čistá látka. Proto se zdá být rozumné připravovat membrány s hodnotou separačního faktoru právě dostačující pro získání látky o požadované čistotě a co největším tokem.

3. Transport látek v membránách při pervaporaci

Mechanismus transportu dělených látek při pervaporaci v anorganických membránách je jiný než v polymerních. Vzhledem k tomu, že transport v membránách není dosud dokonale popsán, jsou dále v případě anorganických membrán uvedeny spíše faktory, které transport látek ovlivňují. V případě polymerních membrán je popsán sorpčně-difuzní mechanismus¹, který je nejčastěji používán.

3.1. Anorganické membrány

Separací vlastnosti anorganických membrán jsou dány zejména velikostí pórů dělicí vrstvy. Na separaci mají také vliv vzájemné interakce mezi materiálem membrány a molekulami dělených látek: jejich význam vzrůstá s klesající velikostí pórů. Při pervaporaci je anorganická membrána z jedné strany ve styku kapalnou směsí, která je kapilárními silami vtažena do pórů. Směs se vypařuje a na druhou stranu membrány difunduje plynný permeát. Jestliže nedochází k interakcím mezi molekulami plynu a materiálem membrány, je tok plynu dán součtem dvou příspěvků – Poiseuillova a Knudsenova.

Poiseuillův příspěvek převládá ve velkých pórech a je neselektivní: pokud převažuje, nedochází k dělení permeující směsi. V menších pórech (poloměr menší než 20 nm, záleží též na tlaku v pórech) se uplatňuje převážně Knudsenova difuze. Separací účinnost je však velmi nízká, úměrná převrácenému poměru odmocnin molárních hmotností dělených látek. Je zajímavé, že v případě vícevrstevných membrán závisí velikost toku plynu na jeho směru¹³⁻¹⁶. Hodnota toku plynu ve směru od nosiče k separační vrstvě je nižší než pro směr opačný. Tento efekt je způsoben závislostí toku plynu na velikosti pórů. Velikost rozdílu mezi toky v opačných směrech závisí kromě porozity vícevrstvé membrány na tlakových podmínkách a druhu permeujícího plynu.

Má-li mít anorganická membrána při pervaporaci či při dělení plynů dobré separační vlastnosti, nemůže být separace založena pouze na difuzním procesu. Rozměr pórů pro pervaporační membránu by měl být srovnatelný s velikostí dělených molekul (poloměr pórů kolem 0,5 nm) a separační vrstva nesmí obsahovat defekty. Transport v pórech o této velikosti je významně ovlivněn interakcemi mezi molekulami dělené směsi a materiálem stěn pórů.

Ideální separační režim by nastal v případě, kdy by separační vrstva membrány měla velikost pórů takovou, že by membrána pracovala jako síto – pouze jeden druh molekul dělené směsi by mohl procházet póry.

3.2. Polymerní membrány

Pro popis transportu látek v polymerní membráně je většinou používán sorpčně-difuzní model¹. Ten předpokládá, že separace látek probíhá ve třech následujících krocích, kterými jsou sorpce látek v membráně, difuze a posléze desorpce látek na opačné straně membrány. Uvažuje se, že sorpce i desorpce probíhá v porovnání s difuzí velmi rychle, takže určujícím krokem procesu je difuze.

Hodnota separačního faktoru a toku látek membránou je funkcí jejich rozpustnosti a velikosti jejich difuzních koeficientů v polymeru. Při sorpci látky s vyšší afinitou k polymeru membrány však může docházet k botnání a tedy expanzi jeho řetězců, což umožňuje i zvýšenou sorpci druhé separované složky. Ve zbotnalém polymeru se mění hodnota difuzních koeficientů i o několik řádů¹⁷⁻¹⁹. Z toho důvodu nelze spolehlivě předpovědět separační účinnost membrány na základě informací o pervaporaci čistých složek.

Podle typu polymerní membrány a dělené směsi se hodnota separačního faktoru pro látku preferenčně procházející membránou pohybuje od jednotek až do několika tisíc. Hustota toku permeátu polymerní membránou má většinou hodnotu do 1 kg na metr čtvereční membrány za hodinu. Pokud nedojde ke kvalitativnímu skoku ve vývoji polymerních membrán, není další výrazné zlepšování jejich separačních vlastností příliš pravděpodobné.

4. Stanovení porézní struktury anorganických membrán

Anorganické membrány jsou prakticky vždy nehomogenní – jsou tvořeny více vrstvami. Separační vrstva, která je připravována tak, aby byla co nejtenší pro dosažení vysokého toku, je nanášena na nosič. Nosič, který má funkci podložky zajišťující dobrou mechanickou odolnost membrány, je materiál s vysokou porozitou a velkými póry. Jeho odpor vůči toku permeátu je ve většině případů zanedbatelný ve srovnání s odporem separační vrstvy. U membrán s velmi malými póry, určených např. pro pervaporaci a dělení plynů, není možné nanést separační vrstvu přímo na nosič. Příprava membrány vyžaduje ještě nanést několik mezivrstev mezi vlastní separační vrstvu a nosič. Lze říci, že každou další nanášenou vrstvou lze poloměr póru zmenšit asi desetinásobně.

Z předchozího textu vyplývá, že za účinnost separačního procesu odpovídá do značné míry porézní struktura membrán. Získat údaje o porézní struktuře bývá složité. Zvláště komplikovaná situace nastává při charakterizaci separační vrstvy u vícevrstvých membrán. Některé metody běžně používané pro stanovení strukturních vlastností porézního materiálu, jako je rtuťová porozimetrie či adsorpce dusíku, lze použít jen omezeně²⁰, protože nejsou schopny rozlišit mezi porézní strukturou nosiče a separační vrstvy. Strukturní vlastnosti separační vrstvy se stanovují pomocí kapalné porometrie, permeace plynů, filtrace modelových směsí či elektronové mikroskopie²⁰. V případě membrán s velmi malými póry lze využít metody kondenzace par např. vody v pórech (Kelvinova metoda)²¹.

Protože se naše pracoviště již řadu let zabývá charakterizací porézní struktury anorganických membrán^{13-16,20,22}, budou v následujícím textu dvě nejvhodnější metody popsány podrobněji. Jednou z nich je permeace plynů, druhou pak poměrně nová, velmi efektivní, ale zatím málo využívaná Kelvinova metoda. Každá z těchto metod má uplatnění pro jinou velikost pórů – permeační metoda je vhodná do poloměru kolem 50 nm, Kelvinova pro póry s poloměrem pod 20 nm.

4.1. Permeační metoda

Permeační metoda je založena na měření závislosti průtoku plynu porézním prostředím na průměrném tlaku plynu

v tomto prostředí. Tok plynu neadsorbujícího se na stěnách pórů, Q_i , je součtem Knudsenova a Poiseuilleova příspěvku. Pro hodnotu „normalizovaného“ toku plynu typu i, $Q_i/(A\Delta P)$, jednovrstvou anorganickou membránou za předpokladu monodisperzního prostředí s rovnoběžnými válcovitými póry platí následující vztah:

$$Q_i/(A\Delta P) = 1/(aM_i^{1/2}) + (P_1 + P_2)/(2b\eta_i) \quad (2)$$

kde A je plocha membrány, $\Delta P = P_1 - P_2$ je tlakový spád v membráně, M_i je molekulová hmotnost plynu a η_i je jeho viskozita. Parametry rovnice (2) a , b charakterizují porézní strukturu a dále v sobě zahrnují experimentální teplotu a tlak, při kterém je měřen průtok plynu prošlého vrstvou. Z naměřené závislosti „normalizovaného“ toku plynu na průměrném tlaku v membráně $((P_1 + P_2)/2)$ se lineární regresí vyhodnotí parametry a , b . Hodnota poloměru průměrného póru se získá ze vztahu

$$r = ka / b \quad (3)$$

Pro měření průtoku plynu membránou při atmosférickém tlaku a při teplotě 293 K je hodnota parametru $k = 420$.

V případě dvouvrstvé membrány (nosič a separační vrstva) je použití permeační metody složitější¹⁶. Nejprve je zapotřebí z nezávislých permeačních měření charakterizovat porézní strukturu nosiče, pak změřit permeaci plynu přes celou membránu. Po dosazení strukturních parametrů nosiče a změřených dat permeace plynu přes obě vrstvy do matematického modelu lze stanovit strukturní parametry separační vrstvy.

4.2. Kelvinova metoda

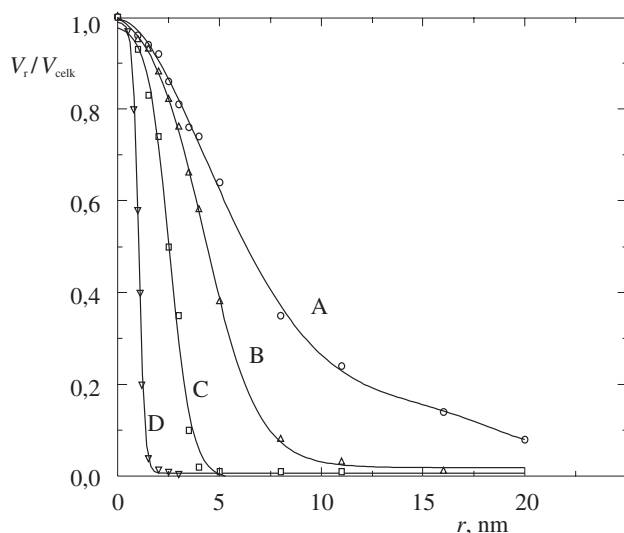
Metoda spočívá na měření závislosti průtoku plynu membránou na koncentraci par vody obsažených v plynu. Nejprve se změří průtok čistého (suchého) plynu. Poté se měří průtok plynu s nízkým obsahem par vody (kolem 1–2 %). Voda zkondenzuje v nejmenších pórech, čím tyto póry uzavře pro průtok plynu a jeho tok přes membránu klesá. S postupně se zvyšujícím obsahem vody v permeujícím plynu se uzavírají větší a větší póry a dále klesá průtok plynu. Popsaná metoda umožňuje získat distribuci velikostí pórů.

Metoda je nazývána podle Kelvina, který jako jeden z prvních popsal podmínky kondenzace par v pórech. Za předpokladu, že kapalina dokonale smáčí stěny póru, má Kelvinova rovnice následující tvar:

$$P' = P^0 \exp(-2\gamma V_m / (rRT)) \quad (4)$$

kde P' je tlak par nad meniskem, P^0 je tlak nasycených par pro danou teplotu T , γ je povrchové napětí kapaliny, V_m je její molární objem, r je poloměr póru a R je plynová konstanta. Je-li tlak par kapaliny za dané teploty v póru vyšší než P' , dochází k její kondenzaci.

Přes některé teoretické výhrady – Kelvinova teorie byla odvozena pro póry, jejichž rozměr je mnohonásobně větší než rozměr molekuly – je tento postup vhodný pro charakterizaci porézního prostředí s velmi malými póry, a to zejména při kontrole změny velikosti pórů v separační vrstvě, která je připravována postupným nanášením několika solí. Příklad zachycení změn distribuce velikostí pórů silika-zirkoniové



Obr. 2. Změny distribuce pórů silika-zirkoniové membrány po nanesení solu A, B, C, D. V_r/V_{celk} je podíl objemu pórů s poloměrem větším než r k celkovému objemu pórů. Experimentální data byla získána Kelvinovou metodou

membrány použité pro separaci kapalné směsi methanol–methyl-terc. butylether²¹ je možné pozorovat na obr. 2.

Při porovnávání porézní struktury získané pomocí rozdílných metod je třeba si uvědomit, že každá metoda je založena na odlišných fyzikálních principech a při vyhodnocování se zavádějí různé zjednodušující předpoklady. Proto není možné očekávat stejné výsledky²⁰.

5. Stanovení difuzivity a sorpce v polymerních membránách

V případě polymerních membrán je účinnost pervaporace dána vzájemnými interakcemi mezi molekulami dělených látek a molekulami polymeru, protože interakce významně ovlivňují hodnotu difuzních koeficientů a rozpustnosti látek v polymeru.

Hodnoty difuzních koeficientů mohou být získány z časového průběhu permeačního toku v určitých bodech (např. v bodě odpovídajícím poloviční hodnotě ustáleného toku^{23–25}) či z celého časového průběhu (Rosenbrockův algoritmus²⁶). Užití druhé možnosti je výhodnější, neboť přináší další informace týkající se změn transportních vlastností zkoumané membrány. Jestliže existují systematické rozdíly mezi experimentálně získanou časovou závislostí permeačního toku a modelovaným časovým průběhem, dá se předpokládat, že difuzní koeficient je koncentračně závislý, nebo že došlo k relaxačním změnám v membráně²⁷.

Stanovení difuzních koeficientů čistých látek nečiní větší potíže v případě, že difuzní koeficient není koncentračně závislý a nedochází k botnání membrány. Permeující látka je vedena na plameno-ionizační či teplotně-vodivostní detektor, jehož signál je úměrný toku látky membránou. Difuzní koeficienty určené z měření permeace čistých složek však mají pro popis pervaporace pouze omezenou výpovědní hodnotu, protože – jak již bylo zmíněno – dochází při separaci více složek k současnému vzájemnému ovlivňování jejich difuzivit. Po-

rovnaní transportních parametrů látek v čistém stavu a ve směsi může vysvětlit jevy, které jsou způsobeny změnou strukturních vlastností membrány při pervaporaci.

V literatuře se data difuzních koeficientů binárních směsí pro jejich experimentální náročnost téměř nevyskytují. Jednou z výjimek je současné nezávislé měření difuzních koeficientů vody a organické látky²⁸. Postup je následující: permeát je odváděn nosným plynem na speciální sondu, která měří koncentraci vody, a poté je permeát veden na plameno-ionizační detektor, který zaznamenává koncentraci organické látky. Elektrické signály detektorů jsou zpracovávány osobním počítačem.

Tato metodika byla použita pro sledování pervaporace systému kyselina octová–voda na polyvinylalkoholové membráně²⁸. Získané výsledky pomohly odhalit mechanismus transportu kyseliny octové membránou. Membránou nejdříve začalo procházet velmi malé množství vody, po ustálení toku se po nějaké době objevil další nárůst toku vody a současně membránou začala procházet kyselina octová. Tento jev byl vysvětlen tzv. coupling efektem – tvorbou agregátů mezi molekulami vody a kyseliny octové.

Množství sorbované látky v polymeru se většinou stanovuje gravimetricky¹ – z rozdílu hmotnosti „suchého“ polymeru a hmotnosti polymeru s nasorbovanou látkou.

Poznání závislosti mezi strukturou polymeru a rozpustnostními a difuzními koeficienty separovaných látek je nutné pro cílenou přípravu vhodné pervaporační polymerní membrány.

6. Porovnání pervaporace na anorganických a polymerních membránách

Předpokládá se, že mechanismus transportu látek v anorganických membránách, v porovnání se sorpčně-difuzním mechanismem v membránách polymerních, umožní vysoký tok permeátu. Nejnovější výsledky v oblasti přípravy anorganických porézních membrán tento předpoklad potvrzují. Byly připraveny membrány s vysokým separačním faktorem srovnatelným s efektivními polymerními materiály, navíc však s několikanásobně vyšším tokem permeátu^{21,29}.

V tabulce I je uvedeno srovnání pervaporace průmyslově velmi zajímavé azeotropické směsi methanol–methyl-terc. butylether na anorganických a polymerních membránách.

Na základě uvedených výsledků lze shrnout, že hodnoty separačního faktoru i toku permeátu na zeolitové a silika-zirkoniové membráně jsou velmi vysoké a tedy celková účinnost separačního procesu je výrazně lepší než na polymerních membránách.

7. Závěr

Pervaporace je separační proces, který z ekonomického hlediska může úspěšně konkurovat klasickým separačním postupům (např. destilaci). Řada laboratoří se proto zabývá přípravou anorganických membrán s dokonalou separační vrstvou do velikosti pórů srovnatelných s velikostí molekul jednoduchých organických látek. Avšak pouze malá část z nich dosahuje uspokojivé kvality membrán (bez defektů) použitelných pro pervaporaci. Současně narůstá počet vědec-

Tabulka I

Přehled dosažených výsledků separace methanol (MeOH)-methyl-terc. butylether (MTBE) na polymerních a anorganických membránách

Membrána	Složení separovaného roztoku [mol(%) MeOH]	Tok [mol.m ⁻² .h ⁻¹]	Separační faktor	Cit.
<i>Polymerní membrány</i>				
PAA/PVA ^a	13–40	1–20	45–170	5
mod. PPO ^b	3–50	1–14	8–24	4
PSS ^c	12–30	0,03–0,2	25000–35000	8
<i>Keramické membrány</i>				
Silika	15–35	0,3–2	2–19	7
Silika	10–75	3	4–9	6
Zeolitová	23	34	3300	29
Silika-zirkoniová	23	120	1100	21

^a Směs poly(akrylové kyseliny) a polyvinylalkoholu, ^b modifikovaný polyfenylenoxid, ^c sulfonovaný polystyren

kých pracovišť, které studují zeolitové membrány. Je to dáno tím, že zvládnutí přípravy zeolitových membrán bez defektů je snazší než příprava separační vrstvy metodou sol-gel.

Intenzivně se pracuje na zvýšení toku membránou, neboť tento faktor významně ovlivňuje ekonomickou výhodnost použití membránových separačních procesů v průmyslu. Dá se předpokládat, že pervaporační proces, stejně jako ostatní membránové procesy, bude mít velký význam i při řešení ekologických problémů.

Tato práce byla vypracována za podpory GA ČR, grant č. 104/97/1216.

LITERATURA

- Huang R. Y. M.: *Pervaporation Membrane Separation Processes*. Elsevier, Amsterdam 1991.
- Lee Y. M., Oh B. K.: *Proceedings of ICOM 1993, Heidelberg, August 30 – September 3*.
- Tyagi R. K., Fouda A. E., Matsuura T.: *Proceedings of ICOM 1993, Heidelberg, August 30 – September 3*.
- Doghieri F., Nardella A., Sarti G. C., Valentini C.: *J. Membr. Sci.* 91, 283 (1994).
- Park H. C.: *PhD Thesis*. University of Twente, Twente 1993.
- Sano T., Hasegawa M., Kawakami Y., Yanagishita H.: *J. Membr. Sci.* 107, 193 (1995).
- van Gemert R. W., Cuperus F. P.: *J. Membr. Sci.* 105, 287 (1995).
- Chen W. J., Martin C. R.: *J. Membr. Sci.* 104, 101 (1995).
- Bengtson G., Bøddeker K. W., Fritsch D.: *Proceedings of ICOM 1993, Heidelberg, August 30 – September 3*.
- Lamer T., Souchon I., Voilley A.: *Proceedings of ICOM 1993, Heidelberg, August 30 – September 3*.
- Karlsson H. O. E., Träghardh G.: *Proceedings of ICOM 1993, Heidelberg, August 30 – September 3*.
- Nijhuis H. H., Cuperus F. P.: *Proceedings of ICOM 1993, Heidelberg, August 30 – September 3*.
- Uchytíl P.: *J. Membr. Sci.* 97, 139 (1994).
- Uchytíl P., Brož Z.: *J. Membr. Sci.* 97, 145 (1994).
- Uchytíl P., Wagner Z., Roček J., Brož Z.: *J. Membr. Sci.* 103, 151 (1995).
- Uchytíl P.: *J. Mater. Sci.* 31, 6293 (1996).
- Brun J. P., Larchet C., Melet R., Bulvestre G.: *J. Membr. Sci.* 23, 257 (1985).
- Brun J. P., Larchet C., Bulvestre G., Auclair B.: *J. Membr. Sci.* 25, 55 (1985).
- Drioli E., Zhang S., Basile A.: *J. Membr. Sci.* 81, 43 (1993).
- Roček J., Uchytíl P.: *J. Membr. Sci.* 89, 119 (1994).
- Asaeda M., Uchytíl P., Tsuru T., Ootani M.: *Proceedings of 5th ICIM, Nagoya, 22–26 June 1998*, str. 322.
- Schneider P., Uchytíl P.: *J. Membr. Sci.* 95, 29 (1994).
- Barrer R. M.: *Diffusion in and through Solids*. Cambridge Univers. Press, London 1941.
- Palmai G., Olah K.: *J. Membr. Sci.* 21, 161 (1984).
- Felder R. M.: *J. Membr. Sci.* 3, 15 (1978).
- Rosenbrock H. H., Storey S.: *Computational Techniques for Chemical Engineer*. Pergamon Press, New York 1970.
- Clement R., Nguyen Q. T., Grosse J. M., Uchytíl P.: *Macromol. Theory Simulations* 4, 921 (1995).
- Uchytíl P., Nguyen Q. T., Clement R., Grosse J. M., Essamri A.: *Polymer* 37, 1, 93 (1996).
- Kita H.: *Membrane* 23, 2, 62 (1998).

P. Uchytíl (*Institute of Chemical Processes, Academy of Sciences of the Czech Republic, Prague*): **Application of Inorganic and Polymeric Membranes to Pervaporation**

The paper deals with one of the most promising membrane separation processes – pervaporation. So far, only polymeric membranes have been used for industrial applications. After improving the preparation of separation layers, inorganic membranes could be an important competitor. The transport mechanisms in both types of membranes are described. The separations of a methanol-tert-butyl methyl ether mixture by pervaporation on polymeric and inorganic membranes are compared.