



---

## Příprava membrán ve formě dutých vláken pro úpravu bioplynu

*Kristýna HÁDKOVÁ<sup>1,2\*</sup>, Robert VÁLEK<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> MemBrain s.r.o., Pod Vinicí 87, Stráž pod Ralskem 471 27

<sup>2</sup> Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Technická 5, Praha 6 – Dejvice 166 28

\* **Email:** kristyna.hadkova@membrain.cz

---

*Bioplyn je možné na biomethan upravit pomocí membránové separace. Tento příspěvek přibližuje princip membránové separace, materiály vhodné pro separaci plynů, jejich vlastnosti a způsoby, jak je možné je zpracovat do membránových modulů. Je zde popsána také příprava dutých vláken, která jsou v současné době nejpoužívanější formou zpracování membrán právě v separaci plynů.*

**Klíčová slova:** bioplyn, membrána, dutá vlákna, separace CO<sub>2</sub>

---

### 1 Úvod

Bioplyn patří mezi čím dále více využívané alternativní zdroje energie. Největšího využití se mu v současnosti dostává spalováním v kogeneračních jednotkách, čímž je získána elektrická energie a teplo. Vzhledem k tomu, že bioplynové stanice jsou často umístěné mimo obytnou zástavbu, není jak teplo dostatečně využít a tím tedy klesá celkové využití energie obsažené v bioplynu. Tuto energii lze lépe využít při úpravě bioplynu na biomethan, který lze pak využívat jako náhradu za zemní plyn jak k pohonu motorových vozidel, tak k vtláčení do plynárenské sítě. Tato úprava zahrnuje především odstranění CO<sub>2</sub>, čím se zvýší obsah methanu. CO<sub>2</sub> lze z bioplynu odstranit několika způsoby, např. absorpcí fyzikální nebo chemickou, adsorpcí a také membránovou separací.

Membránová separace prochází v posledních desetiletích velkým rozvojem a přináší tak stále nové materiály, či modifikace stávajících materiálů, postupy jejich zpracování a přípravy membrán a membránových modulů. Membrána musí nejen dostatečně separovat požadované složky, ale musí vykazovat také dostatečnou mechanickou i chemickou odolnost. Separace je ovlivňována mnoha faktory. Patří mezi ně samotný materiál membrány, zpracování membrány a její plocha uvnitř modulu. Proces je podmíněn i dalšími fyzikálními podmínkami jako tlak na jednotlivých stranách membrány, teplota a průtok jednotlivých proudů. Pro co nejúčinnější odstranění CO<sub>2</sub> z bioplynu je nutné zvolit vhodný typ membrány a její zpracování a určit optimální podmínky separace. V současné době se pro separaci bioplynu nejvíce využívají polymerní membrány ve formě dutých vláken.



## 2 Bioplyn

### 2.1 Složení bioplynu

Za bioplyn se obecně považuje směs především methanu a oxidu uhličitého, které spolu tvoří téměř 100 % obj. Vedle těchto majoritních složek obsahuje bioplyn také řadu příměsí, jejichž složení je dáno především substrátem, ze kterého bioplyn vzniká, pH, teplotou, vlhkostí a dalšími okolnostmi jeho vzniku. Těmito minoritními složkami jsou obvykle  $N_2$ ,  $H_2S$ ,  $NH_3$ ,  $H_2$  a vodní pára. Pokud se jedná o skládkový bioplyn, na základě uloženého odpadu se může jednat ještě o řadu dalších příměsí. Skládkový bioplyn se také od reaktorového obvykle liší poměrem obsahu methanu a oxidu uhličitého, protože na rozdíl od reaktorového bioplynu nevzniká v plynotěsném tělese. Jeho tvorba je tedy ovlivněna navíc i řadou difúzních procesů a změnami atmosférického tlaku, což může vést k přítomnosti přísátého či nezreagovaného vzduchu. Skládkový bioplyn obvykle obsahuje 50 – 85 % obj. methanu, ovšem tento obsah může značně kolísat. Oproti tomu v reaktorovém bioplynu je za stabilního provozu obsah methanu v rozmezí 60 – 65 % obj. a kolísá v rozmezí 2 % obj. [[1]]

### 2.2 Využití bioplynu

Využití bioplynu i počet bioplynových stanic v posledních letech neustále roste. Za posledních 13 let se zvýšil z původních 6 na 500 bioplynových stanic a bioplyn dnes tvoří 22,1 % OZE (stav k 1. 1. 2014) [[2]]. Bioplyn se nejen v České republice využívá především jako zdroj elektrické energie a tepla ze spalování bioplynu v kogeneračních jednotkách. Elektrina se částečně využije na bioplynové stanici a převážná část je odváděna do sítě. Teplo však nachází uplatnění obvykle pouze k ohřevu fermentorů nebo vytápění budov na BPS, avšak zbytek obvykle není zužitkován. Pro větší efektivitu využití energie z bioplynu je možné bioplyn upravit na biomethan a dále ho využívat jako náhradu zemního plynu. Při úpravě bioplynu na biomethan se bioplyn vyčistí podobně, jako před kogenerační jednotkou, ale dále se také odstraní  $CO_2$ . Tím dojde ke zvýšení obsahu methanu v bioplynu a pro jeho využití místo zemního plynu je třeba dosáhnout koncentrace methanu alespoň 95 % obj. Biomethan lze využít jako palivo pro pohon motorových vozidel, nebo může být vtláčen přímo do plynárenské sítě. [[3]; [4]]

## 3 Membránová separace

### 3.1 Princip membránové separace

Separací membránou rozumíme tenkou vrstvu, která umožňuje oddělení různých látek. Některé membrána propustí, jiné ne. Na tomto principu funguje i řada přírodních biologických membrán, pro průmyslové využití jsou však obvykle využívány membrány syntetické. Separace složek probíhá na základě několika různých mechanismů – na principu rozdílné velikosti separovaných částic (tehdy se mluví o síťovém mechanismu), na základě rozdílné afinity separovaných částic k membráně a různé difúzní rychlosti při prostupu membránou (toto je mechanismus rozpouštění – difúze), a nebo na základě elektrochemických interakcí separovaných částic a membrány. Při separaci plynů a par



se uplatňuje mechanismus rozpouštění – difúze, přičemž hnací silou je tlakový rozdíl mezi stranami membrány. [[5]]

### 3.2 Vlastnosti membrány – selektivita a permeabilita

Celkový výkon membrány je dán kombinací permeability, selektivity, tloušťky a plochy. Permeabilita udává množství plynu (par), v molech (nebo  $m^3$ ) za standardních podmínek (teplota  $0^\circ C$ , tlak 101 325 Pa), který projde jednotkovou plochou membrány za jednotku času při jednotkovém gradientu tlaku (rozměr  $mol \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} \cdot Pa^{-1}$ , nebo  $m^3 \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} \cdot Pa^{-1}$ ). Permeabilita je určena součinem difúzního koeficientu  $D$  a koeficientu rozpustnosti  $S$ . [[5]; [6]]

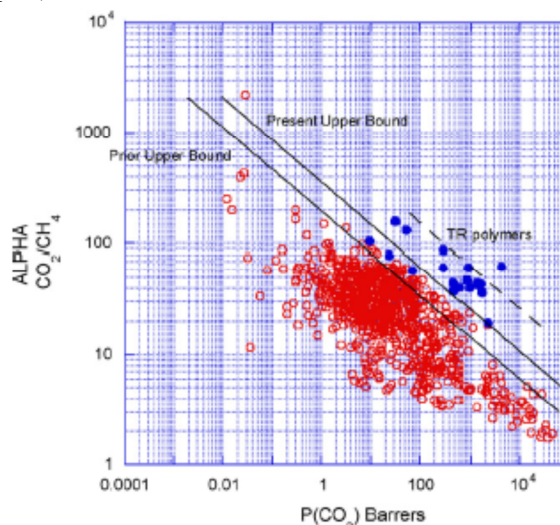
$$P_n = D \cdot S_n$$

Selektivita udává schopnost membrány separovat do sebe dané složky, ale tato ideální selektivita nebere v úvahu vzájemné ovlivňování separovaných složek a nemusí tedy zcela odpovídat reálné selektivitě membrány. Selektivita je v případě směsi dvou plynů dána ideálně poměrem permeabilit těchto dvou složek. [[5]]

$$\alpha_{ij} = \frac{P_i}{P_j}$$

### 3.3 Separační vlastnosti polymerních membrán

Separační vlastnosti polymerních materiálů se nejčastěji porovnávají v tzv. Robesonově grafu, který vyjadřuje závislost ideální selektivity dané binární směsi na permeabilitě propustnější z těchto dvou složek. Každý materiál je tak v grafu reprezentován jedním bodem pro vybranou dvojici separovaných složek. Z grafu pak vyplývá horní mez, nad kterou se materiály nemohou dostat, protože polymery s vysokou permeabilitou nejsou dostatečně selektivní a obráceně. Materiál, který by překonal tuto hranici, by musel zvýšit současně permeabilitu i selektivitu, avšak tyto požadavky jsou protichůdné. Tuto horní hranici mohou překročit pouze výrazně modifikované materiály, které umožňují průběh separace i jiným mechanismem, než je rozpouštění – difúze. Příkladem je Robesonův graf pro dvojici  $CO_2$  a  $CH_4$  (Obr. 1). V anglicky psané literatuře je časté, že poměr ideálních selektivit je označován jako  $\alpha$  (tedy alpha). [[6]]



Obr. 1: Robesonův diagram pro  $CO_2/CH_4$  [[7]]



### 3.4 Membránové moduly v praxi

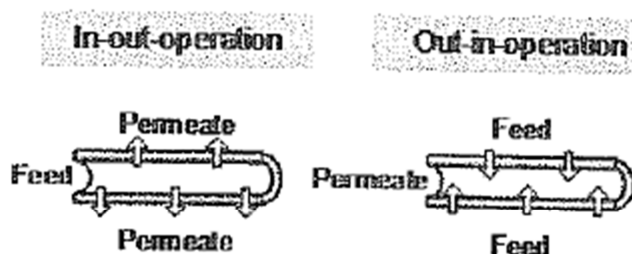
Při využívání membránové separace ovlivňuje proces mnoho dalších faktorů, nejen separační vlastnosti použitého materiálu. Membrána musí vykazovat také mechanickou, chemickou a tepelnou odolnost a musí být vhodně zpracovatelná pro výsledné uspořádání v membránovém modulu s dostatečně velkou membránovou plochou. Také samotný modul musí mít adekvátní složitost výroby a celý výrobní proces nesmí přesahovat únosnou ekonomickou mez. Pro celkový výkon modulu je pak důležitá nejen plocha membrány, která je uvnitř, ale také její tloušťka, protože s rostoucí membránovou plochou roste propustnost membrány, ale klesá s její rostoucí tloušťkou. Tloušťku limitují požadavky na mechanickou odolnost a plochu prostorové možnosti velikosti modulu.

Pro membránové moduly se v praxi nejčastěji využívají polymerní materiály. Jsou levné, dobře zpracovatelné do formy spirálově vinutých modulů a nejčastěji do formy dutých vláken. Tyto polymerní materiály však nejsou příliš chemicky odolné a snesou poměrně omezené teplotní zatížení. Problémem je také dlouhodobé působení vyšších uhlovodíků a CO<sub>2</sub>, což vede k bobtnání separační vrstvy a nevratné degradaci separačních vlastností. [[6]]

### 3.5 Příprava a výroba membrán a membránových modulů

Membrány se pro praxi nejčastěji vyrábí buď jako ploché, nebo jako formě dutých vláken. Ploché membrány jsou kompozitní, separační vrstva se nanáší na základní plochý nosič buď nanášením na rotující disk (spin coating), nebo ponořením do roztoku (film casting). Výhodou tohoto typu výroby membrán je snadná výroba a možnost připravit velmi tenkou a rovnoměrnou separační vrstvu.

Velmi široce využívaným typem jsou membrány ve formě dutých vláken, protože umožňují umístit do modulu velkou membránovou plochu. Výroba je však hůře kontrolovatelná a separační vrstva je obvykle tlustší, než u plochých membrán. Modul s dutými vlákny je pak velmi podobný trubkovému výměníku tepla. Vlákná jsou umístěna v modulu jako svazek s utěsněnými konci. [[6]] Vstupní plyn může být nastříkán z vnitřní, nebo vnější strany vláken, jak ukazuje Obr. 2. Aktivní vrstva může být na porézní podložce umístěna na vnitřní, nebo vnější straně vláken. Separací proces v praxi probíhá ve třech různých uspořádáních. Nástřik u vnější strany vláken, přičemž aktivní vrstva je také na vnější straně. Nástřik z vnitřní strany vláken, aktivní vrstva na vnější straně vláken. Poslední možností je nástřik z vnitřní strany vláken při umístění aktivní vrstvy taktéž na vnitřní straně. [[8]]



Obr. 2: Možnosti nástřiku vstupního plynu při separaci dutými vlákny – vlevo nástřik z vnitřní strany vláken (permeátu prochází na vnější stranu), vpravo nástřik z vnější strany vláken (permeátu prochází na vnitřní stranu) [[8]]



Membránové moduly s dutými vlákny jsou náchylnější k poškození a vyžadují tedy vyšší kvalitu vstupního plynu a případně vyžadují jeho předúpravu. Je třeba velmi nízký obsah pevných částic, zbytkového oleje a některých dalších látek. Jako provozní požadavek může být i separace za vyšší teploty než je rosný bod směsi, aby nedocházelo ke kondenzaci nežádoucích látek na membráně, což by mohlo poškodit její separační schopnost. [[6]]

### 3.6 Membránové materiály vhodné pro separaci plynů a par

Membrány využívané při separaci plynů lze rozdělit do dvou kategorií – polymerní a anorganické membrány. Polymerní membrány, které jsou využívány především pro separaci plynů, jsou obvykle asymetrické nebo kompozitní a separace probíhá rozpustně – difúzním mechanismem. Tyto membrány, ať už jako ploché, nebo ve formě dutých vláken, mají tenkou aktivní separační vrstvu umístěnou na porézní podložce, která poskytuje mechanickou stabilitu. Polymerní materiály nabízí vhodné řešení pro uplatnění ve vysokokapacitní separaci vzhledem k nízkým výrobním nákladům, jednoduchosti samotného procesu a nízkým nárokům na prostor. Avšak nejsou odolné vůči vysokým teplotám a agresivnímu chemickému prostředí a vyšším uhlovodíkům, které mohou způsobovat zanášení membrán. Membránové moduly pro separaci plynů tedy vyžadují vstupní plyn určitých parametrů, který musí být případně předúpraven. [[9]]

Materiálů, které se pro přípravu membrán používají, není ani v současné době mnoho. Důvodem je především řada požadavků, které jsou na tyto materiály kladeny. Tyto materiály musí mít nejen vhodnou propustnost, ale také selektivitu pro danou plynou směs. Dále musí vykazovat chemickou, mechanickou i tepelnou odolnost. Také se musí jednat o látku, ze které bude možno membránu připravit a to bez defektů, které by jinak negativně ovlivnily celou separaci.

Pro separaci plynů a par se obvykle používají membrány neporézní, které jsou ve většině případů uspořádány jako kompozitní membrány, tedy tenká neporézní separační vrstva je umístěna na velmi propustné porézní vrstvě, která tvoří jakousi podložku a sama transport částic výrazně neovlivňuje.

K výrobě membrán pro separaci plynů a par jsou nejvíce využívány polymery, přestože ve výzkumném stadiu jsou i membrány anorganické. Existuje také kombinace těchto dvou cest a to formou tzv. mixed matrix membranes, které kombinují polymerní matici a anorganická aditiva. Mezi nejpoužívanější materiály pro separaci plynů patří acetát celulózy, polyimidy, polysulfony a polysiloxany, které už jsou na hranici organických a anorganických. [[6]]

#### 3.6.1 Acetát celulózy

Acetát celulózy je souhrnný název pro estery celulózy, které se od sebe liší stupně acetylace (rozsahem transpormace původních hydroxylových skupin celulózy na acetylové skupiny). Všechny druhy jsou netoxické a málo hořlavé, odolávají olejům slabým kyselinám a alifatickým (ne však halogenovaným) uhlovodíkům. Jako rozpouštědlo je pro druhy s nižším stupněm acetylace vhodný aceton, pro druhy s vyšším stupněm acetylace je vhodný dichlormethan. S rostoucím stupněm acetylace roste jak propustnost CO<sub>2</sub>, tak propustnost CH<sub>4</sub>, takže selektivita se prakticky nemění. Ideální selektivita při testování samotných plynů může dosahovat až hodnoty 40 (vlivem plastifikace roste koeficient propustnosti CO<sub>2</sub>), avšak při testování směsi CO<sub>2</sub> a CH<sub>4</sub> se selektivita pohybuje mezi hodnotami 10 až 20. [[6]]



### 3.6.2 Polyimidy

Aromatické polyimidy patří mezi polymery s vynikajícími užitnými vlastnostmi, mají velmi dobrou mechanickou, chemickou i tepelnou odolnost. Tyto vlastnosti však také znesnadňují rozpouštění a tavení těchto polymerů, čímž se komplikuje jejich zpracování. Polyimidy jsou převážně amorfni polymery a jejich vlastnosti závisí výrazně na jejich konkrétním složení. Jsou odolné vůči olejům, zředěným kyselinám a organickým rozpouštědlům a je možné je používat v teplotním rozmezí od  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  až po  $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Polyimidy jsou stálé v silně oxidačním ani zásaditém prostředí. Polyimidové neporézní membrány mají vysokou selektivitu při dělení směsi  $\text{CO}_2$  a  $\text{CH}_4$ , avšak mají také nízkou propustnost. Vhodným kompromisem selektivity a propustnosti je mezi polyimidy např. membrána na bázi 4,4'-(hexafluorisopropyliden) diftalanhidridu. Např. kopolymer připravený z 2,4,6-trimethyl-1,3-diaminobenzenu a 3,5-diaminobenzoové kyseliny v molárním poměru 3:2 vykazuje selektivitu  $\text{CO}_2/\text{CH}_4$  přibližně 27. [[6]]

### 3.6.3 Polysulfony

Polysulfony jsou myšleny všechny polymery, které obsahují sulfonovou skupinu  $\text{O}=\text{S}=\text{O}$ . Polymerní řetězec je tvořen aromatickými jádry, která jsou spojena sulfonovými a etherovými skupinami  $-\text{O}-$  a případně i isopropylidenovými skupinami  $=\text{C}(\text{CH}_3)_2$ . Většina sulfonů je amorfni a má průhlednou barvu. Polysulfony jsou odolné vůči vodě, slabým kyselinám a zásadám, avšak ne vůči organickým rozpouštědlům a UV-záření. Vykazují dobrou tepelnou stabilitu a pevnost v tahu. U polysulfonů se selektivita pro  $\text{CO}_2$  a  $\text{CH}_4$  pohybuje kolem hodnoty 23. [[6]]

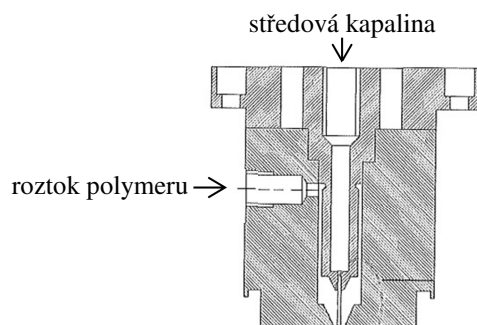
## 3.7 Příprava membrán z polyetherimidu ve formě dutých vláken

Při laboratorní přípravě dutých vláken je třeba nejdříve připravit roztok polymeru ve vhodném aprotickém rozpouštědle. Mísení látek probíhá v uzavřeném boxu s inertní dusíkovou atmosférou. Roztok je uzavřen ve skleněné nádobě a umístěn do rotační laboratorní míchačky temperované na  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$  po dobu cca 72 hodin, dokud se nedojde k úplné homogenizaci směsi. Zároveň je třeba také připravit tzv. středovou srážecí kapalinu (bore liquid), která při výrobě formuje střed dutého vlákna. Tato středová kapalina je směsí stejného rozpouštědla, které bylo použito k přípravě roztoku polymeru, a srážedla, kterým je voda. Čím více srážedla středová kapalina obsahuje, tím je jemnější vnitřní porézní struktura dutého vlákna a její koncentrací lze tedy ovlivnit mechanické vlastnosti vlákna. Stejně jako při přípravě roztoku polymeru je i středová kapalina připravena z odplyněných látek a jejich mísení probíhá v uzavřeném boxu s inertní atmosférou.

Roztok polymeru se umístí do zásobní temperované nádoby, v nádobě je umístěno míchadlo a nádoba je zcela utěsněna. Nejdříve je napojena na vakuum a provede se odplynění roztoku. Po odplynění je nádoba natlakována dusíkem na cca 2 bar následně se roztok vpusť do celé soustavy až po místo, kde se mísí se středovou kapalinu a vzniká duté vlákno. Středová kapalina je umístěna v uzavřené nádobě a vháněna samostatným čerpadlem do samostatného potrubí vedoucího až k tzv. spinneretu, kde se setká se roztokem polymeru. Je třeba pracovat v inertní atmosféře bez přístupu vzduchu, protože na vzduchu reaguje polymer se vzdušnou vlhkostí a dojde k jeho srážení.

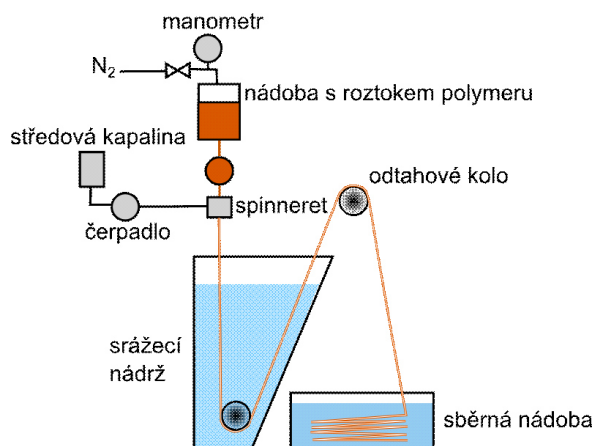


Roztok polymeru je pomocí čerpadla vháněn do soustavy potrubí aparatury a prochází až do spinneretu, kde se setkává se středovou kapalinou, jak ukazuje Obr. 3.



Obr. 3: Mísení roztoku polymeru a středové kapaliny ve spinneretu [[10]]

Zásobní nádoba, čerpadlo i spinneret jsou temperovány. Ve spinneretu dochází ke vzniku vlákna, jehož plášť tvoří polymer a střed je vyplněn středovou kapalinou. Spinneret je umístěn několik centimetrů nad vodní lázní (tzv. air gap), ve vodní lázni dochází k přechodu aprotického rozpouštědla do vody a ve vodě nerozpustný polymer se sráží ve formě dutého vlákna (inverze fází). Vlákno prochází vodní lázní dále na vzduch a je taženo pomocí navíjení na válec. Přes válec vlákno pokračuje do zásobní nádoby s vodou, kde je navíjeno do kruhů a následně ponecháno k vylouhování středové kapaliny. Celý tento proces ukazuje Obr. 4.



Obr. 4: Schéma procesu přípravy dutých vláken

Vlákna se sváží a na jedné straně svazku přestříhnou, aby tak vytvořily snop vláken, který se následně umístí do válce s vodou ve vertikální poloze, aby došlo k vyplavení zbytků středové kapaliny. Takto se vlákna nechají louhovat asi 48 hodin, následují dvě obdobné lázně v ethanolu a následně dvě lázně v hexanu. Poté je možné vlákna umístit na vzduchu a nechat vyschnout. S vlákny je po celou dobu přípravy třeba zacházet velmi opatrně, protože i když nejsou křehká, mohlo by dojít k porušení velmi tenké separační vrstvy a tím ke znehodnocení celého separačního procesu. Separační i mechanické vlastnosti vláken jsou ovlivňovány celou přípravou od samotného roztoku polymeru, přes středovou kapalinu, air gap, teplotu vodní lázně, rychlost čerpadel, které vhání do soustavy polymerní roztok a středovou kapalinu, navíjecí rychlostí válce, na kterém se uchytává vytvořené vlákno



a samozřejmě i celým dalším procesem, při kterém je třeba neponechávat vlákna na vzduchu, dokud není proces dokončen, a zacházet s nimi velmi opatrně, aby nedošlo k jejich poškození.

## 4 Závěr

Bioplyn vedle svého současného využití v kogeneračních jednotkách nabízí zajímavé využití jako náhrada za zemní plyn, pokud dojde k jeho úpravě na biomethan. Pro tento proces může velmi dobře posloužit membránová separace, která prochází v posledních desetiletích velkým rozvojem. Dnes jsou již známy materiály, které je možné pro separaci plynů využít, a hledají se stále nové materiály či modifikace stávajících, aby byla separace co nejúčinnější. Stejně tak se stále vylepšuje způsob umístění membrány do modulu, aby byla co největší membránová plocha a tedy co nejvyšší efektivita procesu. A to vše za co nejlepších ekonomických podmínek. Tento příspěvek nastínil požadavky, jaké jsou na membránové materiály kladeny, jaké jsou jejich vlastnosti i možnosti, jak mohou být umístěny v membránových modulech. Na příkladu polyimidů byla popsána celá příprava membrány ve formě dutého vlákna, na které je patrné, že se jedná o proces, při kterém je třeba dodržovat mnoho daných parametrů, které ovlivňují finální vlastnosti vláken. Je tedy zřejmé, že membránová separace plynů je velmi komplexní vědecký obor, který však nabízí velmi zajímavé možnosti využití nejen při separaci bioplynu, a zaslouží si tedy rozvoj stávajících materiálů a technologií přípravy, ale také výzkum nových možností.

## Poděkování

Výsledek vznikl v rámci řešení projektu číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0084 s názvem „Membránové inovační centrum“.

## Použitá literatura

- [1] Straka, F.; et al. *Bioplyn*, 3rd ed.; GAS s.r.o.: Praha, 2010.
- [2] Česká bioplynová asociace. <http://www.czba.cz/> (accessed Aug 18, 2014).
- [3] Tenkrát, D.; Čermáková, J. Využití bioplynu a biomethanu. *Paliva* [Online] 2010, 2, 36-41. <http://paliva.vscht.cz/cz/archiv-clanku/detail/7> (accessed Aug 06, 2012)
- [4] Procházková, A. Odstraňování organických sloučenin křemíku z bioplynu. Dizertační práce, VŠCHT Praha, 2012
- [5] Palatý, Z.; et al. *Membránové procesy*, 1st ed.; VŠCHT Praha: Praha, 2012
- [6] Šípek, M., Ed. *Membránové dělení plynů a par*, 1st ed.; VŠCHT Praha: Praha, 2014.
- [7] Robeson, L. The upper bound revisited. *J. Membr. Sci.* [Online] 2008, 320, 390-400. <http://www.sciencedirect.com/science/journal/03767388/320> (accessed Aug 20, 2014).
- [8] Drioli, E., Barbieri, G., Eds. *Membrane Engineering for the Treatment of Gases - Volume 1: Gas-separation Problems with Membranes*; Royal Society of Chemistry: Cambridge, 2011.
- [9] Yampolskii, Y., Freeman, B., Eds. *Membrane Gas Separation*, 2nd ed.; John Wiley & Sons Ltd.: West Sussex, 2010.
- [10] Li, N., Fane, A., Ho, W., Matsuura, T., Eds. *Advanced Membrane Technology and Applications*; John Wiley & Sons, Inc.: New Jersey, 2008.