

MUDr. František KOŽÍŠEK, CSc.  
Státní zdravotní ústav a  
Ústav obecné hygieny 3. LF UK,  
Praha

# Využití membránové filtrace při úpravě vody

## Use of membrane filtration for water treatment

Recenzentka  
MUDr. Ariana Lajčíková, CSc.

*Autor referuje o hlavních druzích membránové filtrace (mikrofiltraci, ultrafiltraci, nanofiltraci a osmóze), jejich vlastnostech a možnostech při úpravě pitné, teplé nebo rekreační vody. Porovnává je s klasickou pískovou filtrací a vedle jejich výhod stručně popisuje i hlavní nevýhody, nezabývá se však ekonomickými aspekty provozu.*

**Klíčová slova:** úprava vody, membrány, filtrace vody, osmóza

*Author describes main types of the membrane filtration (micro-filtration, ultra-filtration, nano-filtration and reverse osmosis), their properties and possibilities for treatment of potable water, hot water or recreational water. He compares those types with the standard sand filtration and in addition to their advantages briefly mentions major disadvantages, however he does not engage in economic aspects of the operation.*

**Keywords:** water treatment, membranes, water filtration, reverse osmosis

## ÚVOD

Účelem úpravy vody obecně je především odstranění či separace některých nežádoucích jejích součástí, popř. změna vlastností těchto součástí (např. deaktivace mikroorganismů při dezinfekci), a v některých případech také změna vlastností vody – např. tzv. stabilizace vody úpravou jejího pH nebo zvýšením obsahu některých iontů. Otázka, co je „nežádoucí“ součástí a jaká je její přijatelná koncentrace, pak striktně vychází z účelu použití vody a bude mít různou odpověď nebo podle toho, půjde-li o vodu pitnou, kotelní třeba laboratorní.

Filtrace vody byla první, od 19. století záměrně využívanou technologií moderního vodárenství, ať už šlo o volbu vhodného zdroje podzemní vody na základě posouzení přirozené filtrační kapacity okolní půdy a geologického podloží [1], umělou infiltraci z řeky nebo o uměle instalované pískové filtry na úpravě vody. Hlavním důvodem zavedení filtrace bylo stále rozšiřování využívání povrchových zdrojů vody (pro výrobu pitné vody) a jejich rostoucí znečištění. Písková filtrace je, podle typu a způsobu provozu pískového filtru, schopna odstranit makročástečky a některé mikročástice o velikosti okolo 10 µm a větší.

Proč zde ale zmiňuji „prehistorickou“ pískovou filtraci v souvislosti s moderní membránovou mikro-, ultra- či nanofiltrací, která je schopna odstraňovat částice či molekuly až o tři řády menší? Není to ani tak kvůli logické posloupnosti, ale pro připomenutí jedné její specifické odnože – tzv. pomalé biologické filtrace či anglické filtrace (podle místa vzniku). Jednalo se o nejstarší typ filtrace používané ve vodárenské praxi, která se zpočátku používala jen pro odstranění zákalu, ale později bylo zjištěno, že významně snižuje i počet bakterií ve vodě. Na rozdíl od „obyčejné“ pískové filtrace zde jde o spojení mechanické filtrace a biologických procesů, ve kterých se uplatňují aerobní mikroorganismy, které osídlují kožovitou biologickou blánu. Ta se vytvoří na povrchu pískového filtru v průběhu jeho „zapracování“ a má vysokou separační účinnost, která se blíží zmíněným „super-filtracím“. V souvislosti s intenzifikací vodárenských procesů se však tento, téměř přírodní způsob čištění vody postupně nahrazoval jinými technologiemi, vyžadujícími méně plochy i času na úpravu, takže dnes je ve světě používán stále na méně úpravách pitné vody.



MUDr. František Kožíšek, CSc.  
Absolvent Lékařské fakulty hygienické UK Praha (1987). Výzkumný pracovník v oblasti hygieny vody. Pracuje ve Státním zdravotním ústavu v Praze a učí na 3. lékařské fakultě UK.

## POTŘEBA A NÁSTUP MEMBRÁNOVÉ FILTRACE

Ve druhé polovině 20. století pak vyvstávaly před vodárenstvím nové výzvy, na které již nebylo možné reagovat pouze drobným zlepšováním provozu tehdejších technologií. K těm hlavním výzvám patřila jednak nutnost začít v přímořských oblastech využívat mořskou vodu jako zdroj pro výrobu pitné vody, jednak postupné zpřísňování požadavků na kvalitu pitné vody, nehledě k potřebě ultračisté vody pro speciální účely ve farmacii, medicíně, laboratořích atd. To vyvolalo potřebu odstraňovat z vody „nežádoucí součásti“ až na úrovni rozpuštěných látek (molekul, iontů), což – vedle destilace, iontoměničů či elektrodiálýzy (které se však v mnoha případech v současnosti jeví jako buď technicky nedostatečné nebo ekonomicky méně výhodné technologie) – vedlo přibližně od 70. až 80. let k využití různých membrán. Ty jsou vedle stále masovější aplikace, způsobené zvyšováním kvality a snižováním ceny, zvláště v posledních dvaceti letech také předmětem velmi intenzivního výzkumu.

Přes zjevné pokroky však nelze na membránové technologie pohlížet jako na univerzální řešení nejrůznějších problémů, jak se je snaží někteří dodavatelé prezentovat, ale nutno vždy kriticky zvažovat jejich výhody a nevýhody ve vztahu ke konkrétním možným aplikacím.

Autor chce z hygienického hlediska na ony výhody a nevýhody poukázat, a to zejména pokud se jedná o možné aplikace ve sféře zájmu časopisu *Větrání, vytápění, instalace*, tedy úprava či doúprava pitné a teplé vody v místě spotřeby nebo v blízkosti místa spotřeby, popř. úprava bazénových vod.

## DRUHY MEMBRÁNOVÉ FILTRACE

Za hlavní membránové separační procesy považujeme mikrofiltraci (MF), ultrafiltraci (UF), nanofiltraci (NF) a reverzní osmózu (RO). Do skupiny vodárensky (vzácně) využívaných membránových procesů lze sice zařadit také odpaření přes membránu, membránové stripování, membránovou destilaci, dialýzu či elektrodiálýzu, ale tento přehled se omezuje na ty procesy, jejichž hybnou silou je tlakový spád (tzv. „pressure-driven membrane processes“). V tab. 1 je uveden přehled hlavních procesů a jejich charakteristik, pro porovnání je zařazena i klasická písková filtrace. Toto dělení je do určité míry arbitrární<sup>1)</sup> a v praxi nemusí být hranice mezi jednotlivými stupni tak ostrá, protože velikostí pórů se mohou sousední stupně částečně překrývat. To se týká zejména nanofiltrace, která je také někdy nazývána jako „nízkotlaká osmóza“ a velikostí pórů se nachází na pomezí mezi UF a RO.

<sup>1)</sup> V literatuře lze nalézt i poněkud odlišné charakteristiky.

Tab. 1 Dělení hlavních membránových separačních procesů a jejich charakteristik v porovnání s pískovou filtrací

Proces	Velikost pórů	Velikost zachycených částic	Charakter zachycených částic	Pracovní přetlak [MPa]	Produkt	Srovnatelná „klasická“ metoda úpravy vody
Písková filtrace	10 až 100 $\mu\text{m}$	0,1 > 10 $\mu\text{m}$	zákal, řasy, prvoci a jejich cysty, některé bakterie	tradičně gravitační, ale dnes už také tlakové filtry	voda zbavená zákalu, zooplanktonu a fytoplanktonu	–
Mikrofiltrace	0,1 až 10 $\mu\text{m}$	> 0,2 (– 10) $\mu\text{m}$	zákal, bakterie, koloidy	0,02 až 0,5	voda zbavená bakterií, zákalu a části koloidních látek	ozonizace, chlorování, UV záření, písková filtrace s koagulací
Ultrafiltrace	10 až 100 nm	> 10 (– 100) nm	organické makromolekuly, viry, koloidy	0,5 až 1	voda zbavená částí organických látek, koloidů a mikroorganismů (včetně virů)	ozonizace, chlorování, UV záření, aktivní uhlí, bioreaktory, pomalá písková filtrace
Nanofiltrace	1 až 10 nm	> 1 (– 10) nm	vícemocné ionty, větší monovalentní ionty, organické sloučeniny, pachotvorné látky, barevné látky	1 až 4	částečně odsolená voda zbavená organických látek	iontová výměna
Reverzní osmóza	0,1 až 1 nm	> 0,1 (– 1) nm	rozpuštěné soli (monovalentní ionty), kovy	3 až 10	odsolená (demineralizovaná) voda	destilace, evaporace, iontová výměna

## DRUHY A CHARAKTERISTIKY MEMBRÁN

Membrána je vlastně filtrační médium čili komponent, bez kterého nelze dosáhnout filtrace. Membránu lze charakterizovat jako tenkou polopropustnou separační bariéru oddělující dvě různé fáze a působící jako selektivní přepážka látkového přenosu [2]. Voda, která přitéká na membránu, zčásti prochází membránou (tento podíl se pak nazývá „permeát“), zčásti je membránou zachycena (tento podíl se nazývá „koncentrát“) a odtéká do odpadu. Čím je porozita membrány menší (tedy filtr je „hustší“), tím je podíl permeátu menší – např. u nejmenších jednotek osmózy pro domácí využití připadá na jeden vyrobený litr upravené vody (permeátu) pět a více litrů odpadní vody (koncentrátu).

Pro vyjádření charakteru membrány a jejich separačních vlastností jsou důležité především tři pojmy: průtok membránou, schopnost separace konkrétních polutantů za konkrétních podmínek a hydrodynamická permeabilita, která charakterizuje propustnost membrány. Neméně důležitým parametrem je také přetlak vyvíjený na membránu, na kterém je v podstatě založen celý princip a fungování membránové filtrace. Pro porobnosti k těmto ukazatelům odkazují na specializovanou literaturu [2] a [3].

Membrány mohou být vyrobeny buď z organických nebo anorganických materiálů a v různých konstrukčních modulech. Z organických polymerních materiálů je to např. polypropylen (PP), polyetylen (PE), polyvinylidenfluorid (PVDF), polyacrylonitril (PAN), polysulfon (PS), polyethersulfon (PES) nebo acetát celulosy (CA) [2, 4]. Posledně jmenovaný materiál je biodegradabilní a proto je nutné průběžně odstraňovat bakterie z jeho povrchu [5]. Z anorganických materiálů jsou to především membrány keramické (oxidy, nitridy a karbidy kovů jako je hliník, zirkon a titan), vzácněji kovové či skleněné. Tyto membrány mají výhodu, že jsou oproti membránám vyrobených z organických polymerů odolnější vyšším teplotám a mechanickému namáhání, naopak jejich nevýhodou je křehkost a vyšší výrobní cena. Nicméně vývoj cen keramických membrán předpovídá jejich větší rozšíření na úkor membrán polymerních pro přímou aplikaci v úpravě pitné vody, protože mohou nabídnout lepší řešení problémů se zanášením a integritou polymerních membrán [6].

Podle konstrukce pak rozeznáváme tyto typy membránových modulů: deskový, trubkový (membrána je umístěna na porézní trubici), spirálový (vinutý), dutá vlákna.

## VYUŽITÍ MEMBRÁNOVÉ FILTRACE

Vedle širokého použití např. v potravinářství, farmacii či laboratořích se membránová filtrace využívá k čištění průsakových vod ze skládek či přípravě napájecí vody v energetice. Při úpravě pitné vody se nejprve používala k odsolování mořské a brakické vody<sup>2)</sup> nebo odstranění některých klasických toxických polutantů (např. kovů u důlních vod). V poslední době se začíná stále více využívat k odstranění přírodních organických látek (tzv. „natural organic matter“) u povrchových vod, k náhradě klasické koagulace a pískové filtrace nebo k dezinfekci vody (především odstranění cyst kryptosporidií a giardií [7]). V některých nemocnicích jsou také ultrafiltry používány k odstranění legionel z teplé vody. V současnosti největší evropská úpravná voda využívající membránovou filtraci (UF) v německém Roetgenu má výkon 6 tisíc  $\text{m}^3$  za hodinu a slouží k odstranění zákalu, železa a manganu. První instalace se objevují i v prostředí úpravy bazénové vody

## DEZINFEKČNÍ ÚČINNOST MEMBRÁNOVÉ FILTRACE

Membrány MF jsou v praxi schopny odstranit cysty *Giardií* o 5-log<sup>3)</sup> (řádů), oocysty *Cryptosporidií* o 4-log a průměrný zákal permeátu je méně než 0,2 ZF, ale dosahuje se hodnot až okolo 0,05 ZF<sup>4)</sup>. Odstranění virů je poměrně nízké a pohybuje se od méně než 0,5-log do 3,5-log [5].

Membrány UF mají oproti MF menší póry a zachycují proto menší částice – UF může konstantně vyrábět vodu o zákalu menším než 0,1 ZF, i když vstupní voda má třeba 300 ZF. Odstranění mikroorganismů je větší než 5-log pro *Giardié* a 4-log pro *Cryptosporidiá*, 8-log pro *E.coli* a 4-log pro viry [5].

Legionely jsou štíhlé tyčinkovité bakterie o rozměrech 0,3 až 0,9 x 2 až 6  $\mu\text{m}$ , takže jakýkoli ultrafiltr, popř. mikrofiltr s porozitou méně než 0,2  $\mu\text{m}$  by je měl zachycovat.

## PROVOZNÍ PROBLÉMY MEMBRÁNOVÉ FILTRACE

Na membráně se během celého separačního děje vytváří vrstva zadržovaných částic a mikroorganismů, probíhá také adsorpce organických látek

<sup>2)</sup> Brakická voda = mořská voda smíšená s říční v ústí řeky do moře.

<sup>3)</sup> Odstranění 4-log znamená  $100 \times (1-10^{-4})\%$ ; čili redukce o 4-log je 99,99 %; redukce o 2,5-log znamená 99,68 %.

<sup>4)</sup> ZF – empirická jednotka zákalu.

na povrch membrány nebo v pórech membrány, ve kterých se také vysrážejí částice uhličitanu vápenatého nebo oxidů železa a manganu. Tento jev se nazývá zanášení membrán („fouling“). S rostoucí mírou zanesení postupně klesá propustnost membrány a s propustností také hydraulický výkon membrány. A to vratně či nevratně. Usazení vrstvy na povrchu membrány je obvykle vratné a průtok lze obnovit zpětným promýváním membrány vodou nebo vodou se vzduchem (promývání může být automatické s nastavením periodicky podle času, např. každých 30 minut, podle tlaku nebo podle objemu upravené vody). Zanesení pórů membrány je buď nevratně nebo odstranitelné jen razantním chemickým čištěním.

Preventivně se zanášení membrán předchází vložением dalšího (hrubšího) mechanického filtru před membránu, který zachytí větší částice, kontinuálním dávkováním chemikálií (např. tzv. antiscalantů nebo oxidantů) nebo dávkováním koagulantu, který vytvoří větší shluky částic. Poslední způsob však nelze uplatnit v menším měřítku u zařízení o malé kapacitě, a totéž se týká zpětného praní.

Dalším kritickým aspektem provozu membrán je otázka jejich integrity. Membrány jsou velmi mechanicky namáhány, především v režimu praní a čištění. Proto je nutné sledovat kvalitu filtrátu a hlídat, zda nedochází k propouštění kontaminantů rozměrů nominálně větších, než jsou póry provozované membrány, což by svědčilo o ruptuře (porušení) membrány. Integritu větších zařízení lze hlídat automatickým on-line počítačem částic (měření zákalu by nebylo dost citlivým ukazatelem), u méně výkonných zařízení by ale náklady na monitorování kvality permeátu neúměrně zvyšovaly náklady na provoz zařízení. Pokud zůstanu v komunální sféře (pitná a rekreační voda), nepředstavuje ruptura membrány určené k odstraňování anorganických částic zásadní problém, protože obvykle pak dojde „jen“ ke zhoršení organoleptické kvality vody (barva, zákal). Horší je to v případech, kdy membrána má plnit dezinfekční funkci, protože i malá ruptura v membráně může vést k produkci mikrobiologicky závadné vody a onemocnění. Proto se v současné době hodně diskutuje o tom, jakým způsobem lze vlastně metodu dezinfekce membránovou filtrací validovat. Nutno poznamenat, že potíže s integritou nemívají keramické membrány.

Třetím hygienickým problémem, který se týká osmózy a částečně nanofiltrace, je skutečnost, že tyto membrány z vody odstraňují neselektivně nejen látky nežádoucí, ale i ty potřebné. U osmózy (RO) má permeát charakter téměř demineralizované vody, která se nejen nehodí k pití (z důvodů organoleptických i zdravotních [8]), ale ani k další distribuci, protože je velmi agresivní a korozivní vůči všem materiálům, se kterými přijde do styku. Proto se musí RO používat vždy s by-passem (část vody se vede obtokem okolo membrány a pak se smíchá s permeátem) nebo pak permeát pracně remineralizovat.

### MOŽNÉ A VHODNÉ APLIKACE V PROSTŘEDÍ ČR

Odhlédněme nyní od membránové desalinace (odsolování) mořské vody i od jiného vodárenského použití membrán, protože to jde jednak mimo rámec využití naší republiky, jednak mimo rámec zaměření tohoto časopisu.

a) Úprava pitné vody v místě spotřeby (objekt je napojen na veřejný vodovod a je dodávána voda v kvalitě vody pitné). V tomto případě se membránová filtrace neuplatní, protože případné dílčí problémy s kvalitou vody lze efektivněji řešit jiným způsobem resp. jinou, specificky zaměřenou technologií. Úprava membránami by mohla být na místě jen v případech, kdy odběratel požaduje pro určité účely vodu jiné kvality (např. voda pro hemodialýzu, pro laboratoře apod.).

b) Úprava pitné vody u objektu využívajícího individuální zdroj vody, který nespĺňuje hygienické požadavky na vodu pitnou. Membránové technologie (NF či RO) jsou jediným řešením v případě, kdy voda má vysoký

obsah rozpuštěných látek, který je potřeba částečně snížit. Použije se buď vhodná NF nebo RO s by-passem. U jiných polutantů bude pravděpodobně efektivnější nebo i z hygienického hlediska vhodnější jiné technické řešení.

c) Úprava pitné vody při havarijních, nouzových situacích. Mobilní úpravna vody na bázi membránové filtrace (v kombinaci s dalšími technologickými stupni) může být ideálním řešením.

d) Úprava teplé vody v hotelech a nemocnicích za účelem redukce počtů legionel a atypických mykobakterií – do teplovodního okruhu lze zařadit mikrofiltraci. Dále, na nejrizikovějších odděleních nemocnic, kde jsou pacienti s výrazně oslabenou imunitou a nemocnice nemá zabezpečen celý teplovodní systém, se na sprchy montují jednoduché jednorázové mikrofiltry o porozitě 0,2 µm určené k odstranění legionel. Po měsíci se vymění za nový. Někteří výrobci deklarují, že zařízení je k tomuto účelu validováno [9].

e) Úprava bazénové vody. Koupající se osoby vnášejí do bazénové vody průběžně miliardy bakterií a různé chemické látky (z potu, kůže, moč, zbytky kosmetiky apod.). K zabránění přenosu nákazy musí být voda průběžně dezinfikována, což ale zároveň vede k tvorbě rovněž nežádoucích toxických vedlejších produktů dezinfekce (chlorovaných organických látek), které nelze běžnou technologií odstranit a voda se proto musí obměňovat za novou. Proto se do využití membránové filtrace (UF) v tomto sektoru vkládají velké naděje, že pomůže snížit obě rizika (mikrobiologické i chemické) a ještě ušetřit vodu. Vyšší investiční a provozní náklady zatím brání většímu rozšíření, ale první zahraniční instalace již existují (např. UF v termálních lázních Bad Aibling v Bavorsku [10]) a budou časem přibývat a snad se objeví i u nás.

f) Pokud v budoucnu způsobí změna klimatu nedostatek vody i v oblasti střední Evropy, může se pro nás stát aktuální potřeba znovu využití odpadních vod (tzv. water re-use), jak je v současnosti projektováno, místy realizováno a hlavně odborníky i veřejností živě diskutováno např. v Austrálii nebo v Kalifornii. V tom případě by se podstatně zvýšila potřeba aplikace UF, NF i RO.

Kontakt na autora: voda@szu.cz

### Použité zdroje:

- [1] Kabrhel, G. *Hygiena vody*. Praha: Nákladem Mladé generace lékařů, 1927, 400 s.
- [2] Dobiáš, P. *Separace rozpuštěných a koloidních látek membránovou mikrofiltrací v technologii úpravy vody*. Brno: Vysoké učení technické, 2009.
- [3] Aptel, P., Buckley, Ch. A. Categories of membrane operations. In: *Water Treatment Membrane Processes*. New York: RW AWWA and McGraw-Hill, 1996, ISBN 0-07-001559-7.
- [4] Přidal, J. Separční membrány a jejich průmyslové použití – dnešní trendy a vybrané moderní aplikace. *Chemické listy*, 1999, 93: 432-440.
- [5] Twort, A.C., Ratnayaka, D.D., Brandt, M.J. *Water Supply*. London: Arnold and IWA Publishing, 2000, 676 s., 5. vydání. ISBN-0-340-72018-2.
- [6] Rittmann, B., Galjaard, G., Adham, S. Leading edge technologies for sustainable water provision. *Water* 21, August 2008, 33-34.
- [7] Jacangelo, J.G., Adham, S.S., Laine, J.-M. Mechanism of Cryptosporidium, Giardia, and MS2 virus removal by MF and UF. *Journal AWWA*, 1995, 87: 107-121.
- [8] Kozisek, F. Health risks from drinking demineralized water. In: *Nutrients in Drinking Water*. Geneva: WHO, 2005, s. 148-163. ISBN-92-4-159398-9.
- [9] Maynard, E. J., Seacombe, A. Extended bacterial challenge testing of the PALL Aquasafe Mini+7 disposable filter. Medical technical report, 2002. www.pall.com/medical.
- [10] Wach, F.F. Ultrafiltrace a tradiční pískové filtry v bazénové výstavbě. *Bazén & sauna*, 2009, 16: 26-28. ■