

Perspektivy využití membránových technologií v České republice

Doc. Ing. Petr HLAVÍNEK, CSc.
 Fakulta stavební, VUT v Brně

Úvod

Decentralizované odvádění a čištění odpadních vod se stává alternativou centralizovaného čištění, které v mnoha případech není optimální nejen z ekonomického, ale i z ekologického pohledu. Základní ideou je zacházení s odpadní vodou jako s cennou surovinou, kterou je optimální využít a zpracovat v místě vzniku a včlenění dešťových vod do přirozeného koloběhu vody a jejich případné znovuužití. V současnosti není vytvořené vhodné prostředí, které by ekonomicky zvýhodňovalo decentralizované nakládání s odpadními vodami. V poslední době se dostávají do popředí tzv. membránové technologie čištění založené na procesu aktivovaného kalu se separací kalu ponořeným membránovým modulem. Využití membránových technologií mění pohled na malé čistírny odpadních vod a může do budoucna změnit pohled na výhody centralizovaného řešení odvádění a čištění odpadních vod. Příspěvek diskutuje výhody a nevýhody membránových technologií čištění a možnosti jejich využití v decentralizovaných schématech odvádění a čištění odpadních vod z malých zdrojů znečištění.

DECENTRÁLNÍ ODVÁDĚNÍ A ČIŠTĚNÍ ODPADNÍCH VOD

Decentralizovaná řešení zneškodňují odpadní vody v jednotlivých domech. Využívají



Membránový modul a jeho napojení na sací potrubí



bezodtokových žump nebo domovních čistíren odpadních vod, k nimž patří septiky (dnes již samy o sobě nejsou pokládány za dostatečné), septiky se zemními filtry a domovní mechanicko-biologické čistírny. Vody vyčištěné v domovních čistírnách je možné vypouštět do vodního toku, jímát pro závlahy zahrad a polností, případně vsakovat. Vsakování ale žádá zvláštní souhlas vodohospodářského orgánu, podmíněný příznivým hydrogeologickým posudkem. Z čistě vodohospodářského a technického hlediska lze vypouštět vyčiš-

těné vody z domovních čistíren také do otevřených příkopů a dešťových kanalizací. Vodohospodářské orgány však těmto řešením nebývají nakloněny zčásti z formálních důvodů, zčásti z obav před zneužíváním.

Výběr systému závisí na místních podmínkách a výsledcích pokud možno úplného technického, technologického, vodohospodářského a nákladového hodnocení variantně zpracovaných návrhů. Například obec protáhle půdorysu s nepřilíží souvislou zástavbou rozloženou podél vodního toku bude vhodná spíše pro decentralizované řešení. Naproti tomu větší obec se soustředěnou zástavbou může být vhodnější pro centralizované řešení s kanalizací. Podle podmínek lze přístupy kombinovat. V zástavbě obce v zájmu úspory kanalizace může vzniknout několik menších navzájem nepropojených centralizovaných skupin. Značné úspory kanalizace také může přinést decentralizované řešení částí řídnoucí zástavby po obvodu obce, která je ve svém středu řešena centralizovaně.

V zahraničí začínají nacházet uplatnění tzv. membránové technologie čištění, membránové bioreaktory. Vzhledem k tomu, že produkují hygienizovaný odtok velmi vysoké kvality, jsou předurčeny pro použití v decentralizovaných schématech odvádění a čištění odpadních vod. Vyčištěnou vodu je možno využít na splachování toalet, závlahy apod.

VÝVOJ EVROPSKÉHO TRHU MEMBRÁNOVÝCH TECHNOLOGIÍ

Technologie membránové separace aktivovaného kalu, běžně nazývaná jako „membránové bioreaktory“ (MBR) byla poprvé komercializována v roce 1970 a 1980 pro malé aplikace jako čištění odpadních vod na lodích,



Strojovna – sací čerpadla permeátu



Strojovna – pohled na dmychadla

pro výluhové vody ze skládek a vysoce koncentrované průmyslové odpadní vody. MBR byly založeny na konfiguraci mimo hlavní linku (side-stream configuration), tj. separační proces byl aplikován v externí necirkulační smyčce, většinou v uspořádání zevnitř ven přes polymerní nebo keramické tabulární membrány. Teprve později se objevila nová generace MBR, založená na tzv. ponořeném filtračním systému pracujícím s nízkým podtlakem (sání zvenku dovnitř) a provzdušňování membrán z důvodu jejich ucpávání. To vedlo k úsporám jak investičních, tak provozních nákladů a technologie se stala komerčně životaschopnou pro čištění průmyslových a městských odpadních vod.

V Evropě byl první MBR uveden do provozu v roce 1998 v Porloku (Anglie) pro 3800 EO a brzy následovaly v roce 1999 Buchel a Rodingen (Německo) pro 1000 a 3000 EO a Perthes-en-Gastinais (Francie) pro 4500 EO. Jen o pár let později v roce 2002 byl spuštěn do provozu MBR v Brekcii (Itálie) s průtokem 38000 m³/d, který byl později zvýšen na 42000 m³/d. V roce 2004 byl uveden do provozu Nordkanal (Kaarst, Německo) s denním průtokem 45000 m³/d pro 80000 EO. Instalace tedy rostly z malých ČOV k velkým během několika málo let.

Trh s MBR v Evropě byl v roce 2005 odhadován na 57 mil. eur za rok s nárůstem 10% ročně. V roce 2005 bylo v provozu cca 300 MBR pro průmyslové aplikace (více než 20 m³/d) a cca 100 komunálních ČOV (více než 500 EO), což představuje instalovanou kapacitu 130000 m³/d pro průmyslové instalace a 1 milion EO pro komunální instalace (0,25% evropské populace). Předpokládá se každoročně instalace minimálně 70 nových

MBR, z čehož 50 bude průmyslových a 20 komunálních. Pokud vezmeme v úvahu povrch membrán jako měřítko (celkový instalovaný povrch v letech 2003–2005 činí 670,000 m²), sektor komunálních ČOV reprezentuje 70% trhu. Ponořené membránové moduly převládaly jak v průmyslových, tak v komunálních aplikacích. Reprezentovaly 99% všech instalovaných membrán (GE/Zenon reprezentoval 63% a Kubota 30%).

Pro průmyslové aplikace byla kapacita MBR mezi 60–600 m³/d pro a 600–8000 m³/d (tj. 1000–16.000 EO) pro komunální aplikace (20–80% rozpětí kapacit). MBR větší než 5000 EO (více než 10,000 EO) byly výhradně komunální a vybaveny membránovými moduly GE/Zenon nebo Kubota. Zatímco trh průmyslových MBR se předpokládá stabilní, komunální trh bude významně růst v příštím desetiletí jak do počtu MBR, tak do instalované kapacity. Lze předpokládat, že významný podíl evropského trhu s MBR budou do budoucna tvořit ČOV pro více než 5000 EO.

MBR-NETWORK

Rozvoj MBR v Evropě byl podpořen 4 výzkumnými projekty VI. Rámcového programu EU AMEDEUS, EUROMBRA., MBR-TRAIN a PURATEAT, které byly řešeny v období 2005 až 2009. Do projektů bylo zapojeno 50 evropských společností a institucí, které koordinovaly své činnosti přes cluster MBR-NETWORK. Celková částka na řešení projektů přesáhla 16 mil. eur, z čehož 9 mil. eur bylo financováno evropskou komisí. Cílem bylo technologické zlepšení procesu, transfer know-how a podpora spolupráce mezi firmami a institucemi. Detailní informace je možno nalézt na www.mbr-network.eu.

MEMBRÁNOVÉ MODULY

Membrány mohou být vyrobeny z organického i anorganického materiálu. Z anorganických látek mohou být vyráběny jen porézní membrány. Póry mohou být otevřené, zavřené, stejné nebo různé velikosti. Kompozitní membrány sestávají z několika vrstev různého materiálu.

Prostupnost membrán (průtočné množství permeátu) v závislosti na ploše, času a tlaku je odvislá od velikosti a tvaru pórů, jejich ucpávání a procentu povrchové pórovitosti, která může u mikrofiltrace činit 5 až 70%. Lze konstatovat, že průtok membránou klesá či stoupá s třetí mocninou velikosti pórů.

Důležitá je geometrie pórů a rozdělení jejich velikosti. Ke stanovení rozdělení a velikosti pórů se používá hlavně rastrovací elektronová mikroskopie, metoda profukování zaplavené membrány plynem s měřením rozdílů tlaků.

Membrány jsou dodávány ve dvou základních konfiguracích: ve formě trubek kruhového i nekruhového průřezu nebo ve formě plochých desek – archů. Trubkové moduly pak mohou být tvořeny jednotlivými trubkami, vícecenánovými tvarovkami nebo dutými vlákny. Archy mohou být uspořádány v rovinných deskových modulech nebo spirálovitě vinutých modulech. Výběr materiálu a tvaru membrány závisí na vlastnostech zpracovávaného systému a pracovních podmínkách procesu.

Z hlediska prostorového uspořádání je výhodná co největší specifická membránová plocha, tj. co největší plocha membrán v m² na m³ modulu. Proti tomuto požadavku při čištění odpadních vod stojí přístupnost vnitřního uspořádání modulu pro vyplavení zachycených látek. Moduly jsou uspořádány buď odděleně se vstupem média, výstupem koncentráta a výstupem permeátu, nebo jsou umístěny otevřené moduly přímo v aktivacích nádržích.

Vstupní médiem může protékat vlákny z vnější strany dovnitř nebo zevnitř ven a po prostupu stěnou se stává permeátem.

■ Trubkové moduly

Tvoří je membrána, která leží uvnitř tlakové trubky s průměrem 5 až 25 mm s přítokem média dovnitř membránového tubusu a s odtokem permeátu mezi tubusem a trubicí. Jednotlivé trubky mohou být uloženy ve větším trubkovém obalu a tvořit modul o větší ploše. Specifická membránová plocha bývá menší než 80 m²/m³.

■ Kapilární moduly

Tvoří je svazek membránových kapilár o vnitřním průměru 0,5 až 5 mm. U malých průměrů, které mohou být ještě menší než uváděných 0,5 mm, se jedná o dutá vlákna. Oba názvy se zaměňují. U tohoto typu modulu se dosahuje největší specifická membránová plocha, ale je současně větší zanášení a zablokování membrán.

■ Deskové moduly

Mají tvar podušky s vnitřní nosnou deskou a šířkou mezery mezi deskou a stěnami z obou stran 1 až 3 mm. Protékány jsou z vnější strany dovnitř a mají specifickou membránovou plochu nad 100 m²/m³.

Účelem současného snažení je redukovat čištění odpadních vod na mechanické předčištění, výrazné zmenšení aktivací nádrže, snížení produkce kalu, dosažení vyššího čistícího účinku a hygienizace vody.

Obecně jsou již popsány možnosti různého zařazení membrán jako bariéry proti nerozpuštěným látkám, patogenním zárodkům, virům, bakteriím a rozpuštěným anorganickým a organickým látkám. V dnešní době dochází k novému nárůstu infekčních chorob a vzniká obava ze vzrůstu odporu těchto chorob proti antibiotikům dosud úspěšným proti bakteriím vyvolávajícím choroby. Vede to k nutnosti přerušit infekční řetězec a zabránit šíření těchto chorob v místě, kde se zárodky vyskytují, a to je odpadní voda.

Jak již bylo uvedeno, jedná se v první řadě o zahubení zárodků způsobujících epidemie. Tyto mikroorganismy jsou vůči běžnému čištění naprosto imunní, jsou však lehce odstranitelné čištěním pomocí membrán.

Pro čištění komunálních odpadních vod se používají membrány pracující v oblasti mikrofiltrace až ultrafiltrace. Zatímco při nanofiltraci a reverzní osmóze jsou používány membrány neporézní, mikrofiltrační a ultrafiltrační membrány jsou porézní a dochází na nich k podobnému dělení jako na sítu.

Moduly mohou být umístěny přímo v aktivací nádrži nebo i v jiných nádržích s odpadní vodou. Pro celý systém čištění přes membránu je potřeba zajistit transmembránový tlak, tj. tlakový gradient v jednom či druhém směru (přetlak, podtlak). Na stávajících čistírnách odpadních vod je tedy třeba zajistit tlakový režim. Běžnějším tlakovým režimem je z technického hlediska přetlak. Stačí totiž jen rozdíl hladin a tím je zabezpečen dostatečný tlak pro prostup permeátu. Na stávajících čistírnách většinou nejsou prostory jak polohové, tak ani výškové pro vybudování nové nádrže. Možnost řešení tohoto problému je ve vybudování nové externí tlakové nádrže, přes kterou je odpadní voda „filtrována“. Zahuštěná suspenze se vrací zpět do aktivací nádrže a čistá voda odtéká do vodoteče.

DIMENZOVÁNÍ MEMBRÁNOVÝCH REAKTORŮ

Dimenzování membránových reaktorů má celou řadu specifik.

■ Aktivace

Ve většině literárních odkazů byl provoz spolehlivý při koncentraci kalu do 15 g/l. I když byla dosažena koncentrace vyšší, pro dimenzování je rozhodující koncentrace v provozu trvale udržitelná. Nelze počítat se zcela lineární závislostí zmenšování objemu aktivacích



Membránový modul v aktivaci

nádrží podle stejné hmotnosti kalu v aktivaci pro konvenční čistírny odpadních vod a čistírny s membránovou technologií, i když se této závislosti hodně blíží (vlivy hydraulické).

■ Spotřeba vzduchu

Spotřeba vzduchu obecně vzrůstá s růstem viskozity, která je odvislá od růstu koncentrace kalu. Spotřeba vzduchu je uváděna většinou od 0,5 do 1 m³/m³ membrán pro mechanické odplavování vysrážené vrstvy. Tento vzduch je využitelný i pro oxidaci (většinou střední bubliny). Pro oxidaci je nutná spotřeba vzduchu odvislá od výkonu membrán a výkonu celé aktivače.

Bylo již uveřejněno měření viskozity v závislosti na sušíně kalu. Viskozita roste rychleji u podtlakového systému než u tlakového. Například stejná hodnota viskozity se dosáhla při sušíně 20 g/l u podtlakového systému, ale 35 g/l u tlakového. Vysvětlení je ve vyšších tlakových silách tlakového systému.

Vzhledem ke změně struktury kalu, menším vločkám a rozptýleným bakteriím je lepší přístup kyslíku k bakteriím a větší využití vzduchu v menších nádržích. V každém případě je nutno počítat s větší spotřebou vzduchu, a tudíž i s vyššími energetickými nároky pro účely míchání a oxidace u ponořených modulů a rovněž u tlakových systémů již při sušíně kalu cca 10 g/l a vyšší než u konvenčních čistíren odpadních vod.

■ Produkce kalu

Produkci kalu je možné posoudit až při ustáleném dlouhodobém provozu po dosažení setrvalé provozní sušiny kalu. Produkce přebytečného kalu je mnohem nižší přesto, že v různých provozních výsledcích se reduk-

ce kalu liší. Snížení produkce přebytečného kalu se uvádí mezi jednou a dvěma třetinami ve srovnání s konvenčními čistírnami odpadních vod.

■ Vliv koncentrace na přítoku

Ta má zásadní vliv na nejdražší položku membránové technologie, protože při stejném absolutním přiváděném znečištění vyšší koncentrace zmenšuje průtok. Tím se také přímo úměrně zmenšuje účinná plocha membrány vzhledem k nárůstu koncentrace znečištění.

Z výsledků realizovaných provozů, poloprovozů a laboratorních zkoušek vyplývá, že vyčištěná odpadní voda odpovídá nejméně stupni biologicky vyčištěné vody se zařazením třetím stupněm na úrovni koagulační filtrace a s hygienizací vody lepší, než lze dosáhnout konvenčními prostředky, například chlorací. Snížení obsahu N-NH₄⁺ lze dosáhnout bez problémů až pod hodnotu 1 mg/l. Denitrifikace je odvislá od stejného řešení jako u konvenčních čistíren odpadních vod. Uvádí se však dosažitelnost až na N_{celk.} pod 10 mg/l.

KONFIGURACE MEMBRÁNOVÝCH BIOREAKTORŮ

Ponořené membránové bioreaktory existují ve dvou konfiguracích. Membrány jsou ponořeny buď přímo v aktivaci nebo jsou umístěny v tzv. membránovém tanku. Recirkulační čerpadlo čerpá aktivacní směs do membránového reaktoru v poměru 100 až 500 % přítoku. Hlavní rozdíl mezi těmito dvěma konfiguracemi je v tom, že je třeba čerpadlo navíc pro recirkulaci a že je oddělena aktivací nádrž a membránový tank.

Výše uvedené konfigurace mají řadu výhod a nevýhod. Se separátní membránovou nádrží membránové moduly mohou být snadno odděleny od biomasy a jsou lehce dostupné pro inspekci, údržbu nebo čištění. Zejména tehdy, pokud je nutné častější čištění membrán, je dosaženo úspor energie a času. Toto uspořádání také dovoluje lepší chemickou regeneraci membrán.

Ucpávání membrán je se separátní membránovou nádrží nižší. Na jedné straně to vyplývá z možnosti nezávisle optimalizovat hydrauliku membránové nádrže a možnosti lépe kontrolovat rozložení kalu. Na druhé straně je možno optimalizovat funkci aktivací nádrže.

Konfigurace MBR se separátní membránovou nádrží vede k lepší kvalitě odtoku. Je to dáno tím, že tyto systémy mají obvykle nižší koncentraci kalu v aktivací nádrží, jejich specifický objem je větší, a to vede ke zvýšení jejich hydraulické kapacity. Oddělená filtrace také vede ke kaskádovému uspořádání celkového objemu reaktoru, což činí tuto konfiguraci méně citlivou ke změnám průtoku nebo zatížení. Pokud jsou vyžadovány přísné parametry na odtoku, je toto uspořádání vhodnější díky možnosti lépe optimalizovat denitrifikaci a biologické odstraňování fosforu. Při vícelinkovém uspořádání je možno využívat při odstavení jedné linky kapacitu všech membránových tanků, zatímco při membránách ponořených přímo do aktivací nádrží nelze tuto možnost použít.

MBR s oddělenou membránovou nádrží byly vyvinuty později a jsou preferovány pro intenzifikace čistíren odpadních vod se střední a větší kapacitou a tam, kde lze očekávat větší kolísání průtoku nebo zatížení nebo tam, kde jsou vysoké požadavky na odbourávání nutrientů. Pokud chceme použít systém s nitrifikací a denitrifikací v časovém sledu, je využití konfigurace s oddělenou membránovou filtrací jedinou možností. Tato konfigurace má však vyšší provozní a investiční náklady. Přes to, že konfigurace s membránami ponořenými přímo v aktivací nádrží má vyšší požadavky na obsluhu, její provozní náklady jsou zhruba o 30% nižší.

Také investiční náklady jsou okolo 70% nákladů na MBR s oddělenou separací.

BIOFILMOVÉ MEMBRÁNOVÉ REAKTORY

Kombinace membránové separace s biofilmovými reaktory (reaktory s přísladou biomasou) je zajímavou alternativní technologií k aktivacím procesům s membránovou separací. Biofilmová technologie má mnohem nižší koncentrace suspendovaných látek, nižší viskozitu a nižší tendenci k ucpávání. Využití nosičů biomasy v aktivací nádrži vede k nižší spotřebě energie pro aeraci díky nižší viskozitě, menším problémům s depozicí kalu na membránové moduly. Díky tomu je možno použít kompaktnější uspořádání membrán.

ANAEROBNÍ MEMBRÁNOVÉ PROCESY

Zajímavou variantou je kombinace membránové separace s anaerobními reaktory. Tato technologie je využitelná pro čištění odpadních vod z malých zdrojů znečištění, kde limity na dusík nejsou problém. Hygienizovaný odtok lze s výhodou použít pro závlahy.

Závěr

V současné době při řešení nakládání s odpadními vodami převažuje centralizované řešení, které je založeno na kanalizaci, která odvádí odpadní vody do jednoho čistícího zařízení. Decentralizovaná řešení na rozdíl od centralizovaných zneškodňují odpadní vody v jednotlivých zařízeních v místě jejich vzniku. V menších sídlech je nutno podle místních podmínek posuzovat výhody a nevýhody schématu centralizovaného nebo decentralizovaného systému, které je založeno na čištění nebo jímání odpadních vod v jednotlivých domech, případně ve skupinách domů. Jednoznačné, obecně platné doporučení v této záležitosti neexistuje. Řešení centralizovaná a decentralizovaná je možné podle místních podmínek kombinovat. Ve všech situacích se vyplatí zpracovat variantní projekty až po reálný odhad nákladů. Výběr nevhodnějšího systému závisí na místních podmínkách a výsledcích pokud možno úplného

technického, technologického, vodo hospodářského a nákladového hodnocení varianty zpracovaného návrhu.

Literatura

- [1] KREJČÍ, V. a kolektiv: Odvodnění urbanizovaných území – koncepční přístup, ISBN 80-86020-39-8, NOEL 2000 spol. s r. o., Brno 2002.
- [2] COTE, P., MASINI, M., MOURATO, D., Comparison of membrane options for water reuse and reclamation, *Desalination* 167 (2004) 1–11 doi: 10.1016/j.desal.2004.06.105
- [3] De WILDE, W., THOEYE, C., DE GUELDRÉ, G., Operational experiences and optimisations two years after start-up of the first full scale MBR for domestic wastewater treatment in the Benelux, 6. Aachener Tagung Siedlungswasserwirtschaft und Verfahrenstechnik - 25 & 26 October, Aachen, 2005.
- [4] FUTSELAAR, H., SCHONEWILLE, H., de VEN-TE, D., BROENS, L., NORIT Airlift MBR: side-stream system for municipal wastewater treatment, *Desalination* 204 (2007) 1–7, doi:10.1016/j.desal.2006.02.027 H2O MBR special III, April 2005
- [5] D. H. (Bud) HART, P. D. FISCHER, P. E. MARK A. LICHTWARDT: UF membrane retrofit nearly doubles capacity at Colorado treatment plant, 2005 Press release.
- [6] MELIN, T., JEFFERSON, B., BIXIO, D., THOEYE, C., de WILDE, W., de KONING, J., van der GRAAF, J. and wintgens, T. MULDER: Membrane bioreactor technology for wastewater treatment and reuse, *Desalination*, 187, 271–282, (2006)
- [7] MULDER, J.W.: Hybrid MBR-the perfect upgrade for Heenvliet, H2O MBR special III, April 2005

PODĚKOVÁNÍ: Článek vznikl v rámci projektu „Vývoj malé čistírny odpadních vod se separací kalu ponořeným membránovým modulem“, který je realizován za finanční podpory z prostředků státního rozpočtu prostřednictvím Ministerstva průmyslu a obchodu.



Rozvody vzduchu do aktivace



Regenerační komora pro membránové moduly