ČIŠTĚNÍ ŠEDÉ VODY V LABORATORNÍCH A REÁLNÝCH PODMÍNKÁCH MEMBRÁNOVÝM BIOREAKTOREM

MEMBRANE BIOREACTOR TECHNOLOGY FOR GREYWATER TREATMENT IN THE LABORATORY AND REAL CONDITIONS

Kristýna Velikovská^{*,1}

*velikovska.k@fce.vutbr.cz

¹Vysoké učení technické v Brně: Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství obcí, Veveří 331/95, 602 00 Brno

Abstrakt

Opětovné využití odpadních vod je jedním z významně diskutovaných témat vedoucích k udržitelnému hospodaření s vodou. Oddělování a recyklace odpadní vody už na úrovni domácností a dalších obytných nebo provozních objektů by mohlo být považováno za klíčový přístup novodobého koncepčního vývoje týkajícího se vnímání odpadu jako zdroje. Předmětem tohoto příspěvku je představení a srovnání výsledků z testování membránové technologie (membránového bioreaktoru, MBR) k čištění šedé vody v laboratorních a reálných podmínkách pro účely znovuvyužití bílé vyčištěné vody na úrovni domácností.

Klíčová slova

Čištění odpadních vod, recyklace odpadní vody, šedá voda, bílá voda, membránový bioreaktor

Abstract

Wastewater reuse is one of the signs discussed topics leading to sustainable water management. Separation and recycling of wastewater already at the level of households and other residential or operational buildings could be considered as a key approach of modern conceptual development concerning the perception of waste as a resource. The aim of this paper is to present and compare the results from testing membrane technology (membrane bioreactor, MBR) for greywater treatment in the laboratory and real conditions water reuse at the household level.

Key words

Wastewater treatment, wastewater reuse, greywater, white water, membrane bioreactor

1 ÚVOD

Opětovné využití méně znečištěné šedé vody (ŠV), která je významnou složkou odpadní vody (OV), může hrát zásadní roli při přeměně OV na cenný vodní zdroj. [1][2] K opětovnému využívání OV byly stanoveny pokyny, jež předepisují limity pro kvalitu vody v závislosti na typu dalšího využití. V roce 2020 byla v České republice vydána technická norma ČSN ISO 20761 Opětovné využití vody v městských oblastech – směrnice pro hodnocení bezpečnosti opětovného využití vody – hodnocené ukazatele a metody [3], [4].

Testování čištění ŠV prostřednictvím MBR probíhalo ve dvou etapách v rámci projektu „Získávání a využití tepelné energie z odpadní vody v kombinaci s využitím vyčištěné vody“ řešeného v letech 2019-2021 s podporou programu TA ČR Zéta. V první etapě bylo MBR testováno pro čištění ŠV na odtoku ze sprchového koutu v laboratoři výzkumného centra AdMaS VUT v Brně. V druhé etapě bylo testováno čištění šedé vody v reálných podmínkách, tedy na odtoku z rodinného domu.

2 KRITÉRIA KVALITY VODY

Dle „Rámce pro hodnocení bezpečnosti opětovného využití vody v městských oblastech“ uvedeného v normě ČSN ISO 20761 [3] je kvalita vody určené pro znovuvyužití závislá na účelu využití a specificky odpovídajících

podmínkách. Pro hodnocení bezpečnosti opětovného využití takto připravené nepitné vody je v rámci tohoto dokumentu doporučeno rozhodovací schéma znázorněné na Obr. 1.

Obr. 1 Schéma rámce pro hodnocení bezpečnosti opětovného využití vody dle ČSN ISO 20761 [3], [4].

Posuzování kvality vyčištěné OV je vázáno na účel opětovného využití odpadní vody. Aplikace technologie čištění ŠV byla v rámci testování zaměřena na využití vyčištěné šedé vody k splachování toalet a zavlažování. Pro tyto účely opětovného využití jsou normou ČSN ISO 20761 doporučené ukazatele uvedené v Tab. 1 [3].

Tab. 1 Doporučené ukazatele kvality vody pro různé účely opětovného využití OV [3], [4].

Účel využití vyčištěné OV	pH	BSK5	TDS/ elektrická konduktivita	Zákal	Zbytkový chlor	Indik. Bakterie, E-coli nebo koliformní bakterie	Pach
Splachování toalet	Ano	Ne	Ne	Ano	Ano	Ano	Ne
Zavlažování	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano

3 TESTOVÁNÍ MBR V LABORATORNÍCH PODMÍNKÁCH

Pro testování a ověření účinnosti čištění ŠV (ČŠV) technologickým postupem s membránovou filtrací (MBR) a byl navržen a sestaven jeden technologický (TG) celek. Zdrojem ŠV pro vstup do čistícího TG procesu byl odtok ze sprchového koutu, odkud byla ŠV odváděna do přečerpávací jednotky, která následně distribuovala ŠV přes svíчковý filtr přímo do akumulární nádrže, v níž byla umístěna membránová jednotka. Po mechanickém předčištění tedy bylo médium přiváděno na membránu, kde byly odděleny pevné složky (retentát) od permeátu. ŠV byla v tomto místě zbavena částic, které jsou větší než póry membrány.

Modul podtlakového membránového systému byl ponořen přímo do aktivační nádrže. Pod membránový modul byl přiváděn provozní vzduch zajišťující jemnobublinnou aeraci. Usazené látky byly v těchto modulech odstraňovány přiváděným pracím vzduchem společně s provozním vzduchem, a to v podobě hrubobublinných elementů. Zařazením membrány do aktivačního procesu je membránou plně nahrazena dosazovací nádrž, čímž odpadá nepříznivý vliv na kvalitu odtoku způsobený nedostatečnými sedimentačními vlastnostmi sekundárního kalu. [5][6]

Pro testování bylo využito kompaktní čistírny odpadních vod AS-GW/Aqualoop typu 6, s mikrofiltračním membránovým modulem s průlinami 0,02 μm a provozním tlakem 0,07 MPa.

Technologie pro čištění ŠV byla v laboratorní testována 74 dní s celkovým přítokem z 59 sprchových cyklů. Výsledky analýzy ŠV na vstupu do čistícího procesu, bílé vyčištěné vody na výstupu z technologie čištění (BV) a účinnosti čištění (η) jsou znázorněny v Tab. 2.

Tab. 2 Výsledky fyzikální a chemické analýzy odpadní vody z testování v laboratorní podmínkách (legenda – CH*=CHSK_{Cr}).

OV	Uka- zatel	MJ	Odběr													
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
ŠV	pH	-	8,7	8,1	8,1	7,9	7,8	7,6	7,9	8,1	7,9	8,2	7,9	8,1	8,2	8,2
BV		-	8,2	8,4	8,6	8,2	8,6	8,7	8,6	8,6	8,7	8,5	8,7	8,5	8,7	8,6
ŠV	barva	Pt.	-	17	29	8	11	11	7	8	15	-	42	52	47	82
BV		Co ⁻¹	-	7	12	3	2	3	3	3	3	10	8	8	6	6
ŠV	zákal	ZF _(n)	-	1,6	2,5	2,7	1,3	1,2	1,3	1,7	3,0	38	6,1	7,6	6,4	14,7
BV			-	0,6	1,1	0,2	1,3	0,9	0,6	0,6	0,7	1,2	0,8	1,3	1,4	1,1
ŠV	BSK ₅	mg·l ⁻¹	19,5	11,5	15	8,4	4,8	5,6	6,3	3,9	12	20	7,9	6,1	1,6	37
BV			13	10,5	2,5	2,1	4	1,8	2,6	1,7	4,3	3,8	3,8	1,3	17	5,4
ŠV	CH*	mg·l ⁻¹	120	80	90	40	48	40	102	58	118	368	190	106	48	134
BV			116	42	78	54	38	38	52	44	46	78	90	36	30	86
ŠV	NL	mg·l ⁻¹	6	30	5	6	0	0	5	3	0	52	8	10	7	20
BV			9	12	0	0	0	0	0	1	0	3	7	2	0	9

Limity pH pro kvalitu bílé vody určené k zavlažování jsou velmi podobné pH přírodních vod. Vzorky bílé vody vykazovaly zásadité pH, přičemž hodnoty přesahují definované hodnoty pH v Izraeli (pH 6,5–8,5) a Japonsku (pH 5,8–8,6). V těchto případech není hodnota pH dodržena v řádech desetin, případně setin. Norma ČSN ISO 20761 [3] definuje pro účely splachování bílou vodou stejné limity, jako pro její využití k zavlažování.

Barva a zákal jsou jedny z hlavních organoleptických ukazatelů, které ovlivňují přijatelnost veřejností. Limity pro tyto ukazatele jsou přísnější zejména při využívání bílé vody k splachování toalet. Získané hodnoty splnily výsledky analýzy bílé vody limity ukazatelů barvy i zákalu pro účely zavlažování i splachování toalet [4].

Koncentrace BSK₅ vyjadřující obsah biologicky rozložitelných látek v bílé vodě využívané pro zavlažování a splachování záchodů testovaných vzorků vyhovělo normě ČSN ISO 20761 pouze částečně. Hodnoty BSK₅ v bílé vodě na výstupu z ČŠV MBR splnily limit BSK₅ ≤ 10 mg·l⁻¹ pouze u 79 % analyzovaných vzorků, tři z testovaných vzorků přesáhly 10 mg·l⁻¹, avšak splnily podmínku BSK₅ ≤ 20 mg·l⁻¹ [4].

Bílá voda po ČŠV MBR vykazovala koncentraci NL splňující limit ČSN ISO 20761 pro zavlažování, pro splachování toalet nespĺnila koncentrace NL limit předepsaný ve Španělsku (NL ≤ 10 mg·l⁻¹) pouze v případě jednoho vzorku [4].

4 TESTOVÁNÍ MBR V REÁLNÝCH PODMÍNKÁCH

Pro testování v reálných podmínkách bylo využito navrženého prototypu z řešení projektu „Získávání a využití tepelné energie z odpadní vody v kombinaci s využitím vyčištěné vody“. Technologie čištění ŠV v rámci prototypu byla oproti laboratorní jednotce doplněna chemickým dávkováním dezinfekce a předřazenou sedimentací. Technologie čištění je znázorněna v Obr. 2. ŠV přiváděna na zařízení je mechanicky předčištěna sedimentací v akumulační nádrži ŠV (AN ŠV). Do prototypu je dále zaústěna vtokovým potrubím s sornou stěnou do nádrže MBR. V reaktoru probíhá biologické čištění za přístupu vzduchu z dmychadla. OV je filtrována přes podtlakovou membránovou stanici a po dávkování dezinfekce k hygienizaci permeátu přiváděna do akumulace BV (AN BV).

Obr. 2 Vlevo: Schéma technologie čištění (1 – přítok do prototypu z AN ŠV; 2 – odtah bílé vody; 3 – bioreaktor; 4 – akumulace bílé vody; 5 – membránová stanice; 6 – membrána; 7 – čerpadla; 8 – průtokoměr; 9 – dávkovací chlornanu sodného; 10 – hladinový plovák; 11 – bezpečnostní přepad), vpravo: fotografie instalovaného prototypu.

Technologie pro čištění ŠV byla v rámci rodinného domu testována 74 dní s nepravidelným přítokem šedé vody, jejíž zdrojem byly odpadní vody z pračky, dvou sprch, vany, dvou umyvadel. Odpadní vody z kuchyně a myčky byly odváděny přímo do veřejné kanalizace. Výsledky analýzy ŠV na vstupu, bílé vyčištěné vody na výstupu z technologie (BV) a účinnosti čištění (η) jsou znázorněny v Tab. 3.

Tab. 3 Výsledky fyzikální a chemické analýzy odpadní vody z testování v reálných podmínkách.

OV	Ukazatel	MJ	Odběr				
			1	2	3	4	5
ŠV			8,03	7,8	-	-	-
BV	pH	-	8,29	8,26	8,4	7,8	8,3
η		%	-2,34	-5,90	-	-	-
ŠV			>225	224	>225	141	>225
BV	barva	mg·l ⁻¹ Pt	127	75	78	81	190
η		%	min. 43,56	66,52	min. 65,33	42,55	min. 15,56
ŠV			280	32,2	29,7	12,4	36
BV	zákal	ZF(n)	9,4	6,95	7,34	6,84	11,1
η		%	96,64	78,42	75,29	44,84	69,17
ŠV			98	33	40	21	30
BV	NL	mg·l ⁻¹	18	19	9	9	7
η		%	81,63	42,42	77,50	57,14	76,67
ŠV			84,6	65,2	56,5	34,5	66,5
BV	BSK ₅	mg·l ⁻¹	6	8,2	5,5	6	16,5
η		%	92,91	87,42	90,27	82,61	75,19
ŠV			964	159	226	105	196
BV	CHSK _{Cr}	mg·l ⁻¹	90	60	224	55	87
η		%	90,66	62,26	0,88	47,62	55,61
ŠV			30,5	6,1	7,6	6,2	6,1
BV	tenzidy (aniont)	mg·l ⁻¹	0,45	0,4	0,39	0,39	0,37
η		%	98,52	93,44	94,87	93,71	93,93

Aplikace prototypu pro čištění a znovuvyužití ŠV splnila s ohledem na ČSN ISO 20761 [3] podmínky pro ukazatele kvality bílé přečištěné odpadní vody pro využití k zavlažování tyto limity: pH, BSK₅ (pouze v případě limitů stanovených v Číně a USA). Při srovnání výsledků BV vody s limity pro splachování toalet byly splněny podmínky pro ukazatele pH, BSK₅ (pouze v případě limitů stanovených v Číně a Kanadě), NL (pouze v případě

limitů stanovených v Kanadě). Ostatní ukazatele kvality BV pro splachování toalet nesplnily limity stanovené Kanadou, Čínou, Izraelem, Japonskem, Španělskem ani USA [4].

V průběhu testování byla provedena také regenerace membrán pro zajištění požadované kvality BV na odtoku z prototypu, nicméně výsledky analýzy BV i po tomto ošetření nesplnily všechny stanovené limity pro uvedené ukazatele [4].

5 ZÁVĚR

Předmětem tohoto příspěvku bylo představení výstupů z testování čištění šedé vody pomocí technologického procesu založeném na využití membránového bioreaktoru s mikrofiltračním membránovým modulem. V rámci testování byly v první etapě čištěny šedé vody na odtoku ze sprchového koutu v laboratoři výzkumného centra AdMaS. V druhé etapě byly pomocí MBR technologie čištěny neseparované šedé vody vznikající v reálných podmínkách rodinného domu.

Vzhledem k značným rozdílům kvality šedé vody na vstupu do technologického procesu v laboratoři a aplikaci v reálných podmínkách nelze srovnávat pouze účinnost čištění vztažené na jednotlivé ukazatele znečištění v šedé vodě a je nutné srovnat hodnoty ukazatelů na výstupu z technologického procesu s doporučenými hodnotami pro bílou odpadní vodu uvedenými v normě ČSN ISO 20761 [3]. V obou etapách testování však nebylo dosaženo kompletního splnění předepsaných limitů pro kvalitu bílé vody určené k opětovnému využití pro splachování toalet a zavlažování.

Při další implementaci MBR technologie je pro zlepšení fyzikálních, chemických a mikrobiologických vlastností vyčištěné BV doporučeno osazení ultrafiltrační membrány namísto testované mikrofiltrační membrány.

Poděkování

Tento článek byl vytvořen s finanční podporou TA ČR v rámci řešení projektu TJ02000190 Získávání a využití tepelné energie z odpadní vody v kombinaci s využitím vyčištěné vody, dále s podporou Specifického výzkumu Vysokého učení technického v Brně v rámci řešení projektu FAST-S-21-7424 Řešení aktuálních problémů vodního hospodářství měst a obcí.

Použité zdroje

- [1] BOANO, F., CARUSO, A., COSTAMAGNA, E., RIDOLFI, L., FIORE, S., DEMICHELIS, F., GALVÃO, A., PISOEIRO, J., RIZZO, A., & MASI, F. (2020). A review of nature-based solutions for greywater treatment: Applications, hydraulic design, and environmental benefits. *Science of The Total Environment*, 711. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134731>
- [2] FRIEDLER, E., HADARI, M. (2006). Economic feasibility of on-site greywater reuse in multi-storey buildings. *Desalination*, 190(1-3), 221-234. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.10.007>
- [3] ČSN ISO 20761. (2020). Opětovné využití vody v městských oblastech - Směrnice pro hodnocení bezpečnosti opětovného využití vody - Hodnocené ukazatele a metody (01.04.2020). Česká technická norma (ČSN)
- [4] VELIKOVSKÁ, K.; MRAVCOVÁ, L.; ŠEVELA, P.; POLÁŠEK, P.; RAČEK, J.; HLAVÍNEK, P.; ŠVÁBOVÁ, M. Laboratorní testování účinnosti čištění a rekuperace tepelné energie šedé vody pro opětovné využití. *Vodní hospodářství*, 2021, roč. 71, č. 6, s. 3-11. ISSN: 1211-0760.
- [5] RAČEK, Jakub. Metodika návrhu systému využití šedých vod ve vybraných objektech. Brno, 2016. 198 s., 2 přílohy, Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství obcí. Vedoucí práce doc. Ing. Jaroslav Raclavský, Ph.D.
- [6] MINNESOTA RURAL WATER ASSOCIATION. (2001). Chapter19: Membrane Filtration. Minnesota Water Works Operations Manual, 1–12. Retrieved from http://www.mrwa.com/WaterWorksMnl/Chapter_19_Membrane_Filtration.pdf
- [7] STEPHENSON, T., BRINDLE, K., JUDD, S., & JEFFERSON, B. (2000). Membrane Bioreactors for Wastewater Treatment, 3. Retrieved from https://www.amtaorg.com/Membrane_Bioreactors_for_Wastewater_Treatment.html