



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA CHEMICKÁ

FACULTY OF CHEMISTRY

**ÚSTAV CHEMIE A TECHNOLOGIE OCHRANY ŽIVOTNÍHO
PROSTŘEDÍ**

INSTITUTE OF CHEMISTRY AND TECHNOLOGY OF ENVIRONMENTAL PROTECTION

**APLIKACE MEMBRÁNOVÝCH METOD PRO RECYKLACI
PRACÍCH VOD Z PÍSKOVÝCH FILTRŮ BAZÉNOVÉ
TECHNOLOGIE**

APPLICATION OF MEMBRANE METHODS FOR RECYCLING OF WASHING WATER FROM SAND FILTERS
OF POOL TECHNOLOGY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Juliana Humeníková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Mgr. Martina Repková, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání diplomové práce

Číslo práce: FCH-DIP1536/2020 Akademický rok: 2020/21
Ústav: Ústav chemie a technologie ochrany životního prostředí
Studentka: **Bc. Juliana Humeníková**
Studijní program: Chemie a technologie ochrany životního prostředí
Studijní obor: Chemie a technologie ochrany životního prostředí
Vedoucí práce: **Mgr. Martina Repková, Ph.D.**

Název diplomové práce:

Aplikace membránových metod pro recyklaci pracích vod z pískových filtrů bazénové technologie

Zadání diplomové práce:

1. Zpracování literární rešerše na téma membránové technologie s využitím na úpravu bazénových vod.
2. Na základě literární rešerše provedení měření vybraných vzorků bazénové vody na poloprovozní jednotce se zařazením membránového systému.
3. Analýza a vyhodnocení dat, interpretace výsledků.
4. Shrnutí dosažených výsledků.

Termín odevzdání diplomové práce: 28.5.2021:

Diplomová práce se odevzdává v děkanem stanoveném počtu exemplářů na sekretariát ústavu. Toto zadání je součástí diplomové práce.

Bc. Juliana Humeníková
student(ka)

Mgr. Martina Repková, Ph.D.
vedoucí práce

prof. Ing. Jiří Kučerík, Ph.D.
vedoucí ústavu

V Brně dne 1.2.2021

prof. Ing. Martin Weiter, Ph.D.
děkan

ABSTRAKT

Diplomová práca sa zaoberá aplikáciou membránových procesov na úpravu praciej vody z pieskových filtrov bazénovej technológie na parametre vhodné k jej opätovnému využitiu a to nie len na teoretickej úrovni, ale aj na reálnom príklade z praxe. Experimentálna časť sa zaoberá sledovaním relevantných parametrov daných Vyhláškou č. 568/2000 Sb. a ďalších technologicky významných ukazovateľov kvality vody. Všetky sledované parametre v permeáte z reverznej osmózy dosahovali uspokojivé hodnoty a teda bolo skonštatované, že výstupná voda je vhodná k opätovnému využitiu. Namiesto vypustenia do kanalizácie je možné vďaka aplikovanej technológii denne zrecyklovať od 70 do 80 % praciej vody, čo denne predstavuje úsporu približne 20 m³ vody.

ABSTRACT

The diploma thesis deals with the application of membrane processes for the treatment of washing water from sand filters of pool technology to parameters suitable for its reuse, not only on a theoretical level, but also on a real example. The experimental part deals with the monitoring of relevant parameters given by Decree no. 568/2000 Sb. and other technologically significant water quality indicators. All monitored parameters in the reverse osmosis permeate reached satisfactory values and thus it was concluded that the effluent water is suitable for reuse. Instead of being discharged into the sewer, it is possible to recycle 70 to 80 % of the washed water per day thanks to the applied technology, which saves approximately 20 m³ of water per day.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Membránové technológie, recyklácia vody, ultrafiltrácia, reverzná osmóza, bazénová voda

KEY WORDS

Membrane technologies, water recycling, ultrafiltration, reverse osmosis, pool water

HUMENÍKOVÁ, Juliana. *Aplikace membránových metod pro recyklaci pracích vod z pískových filtrů bazénové technologie*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/131424> Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, Ústav chemie a technologie ochrany životního prostředí . Vedoucí práce Martina Repková.

PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som diplomovú prácu vypracovala samostatne a že všetky použité literárne zdroje som správne a úplne citovala. Diplomová práca je z hľadiska obsahu majetkom Fakulty chemickej VUT v Brne a môže byť využitá ku komerčným účelom len so súhlasom vedúceho diplomovej práce a dekana FCH VUT.

.....
Podpis študenta

POĎAKOVANIE

Moje úprimné poďakovanie by som chcela adresovať Mgr. Martine Repkovej, PhD. za jej cenné rady, ústretový prístup a pomoc pri písaní tejto práce. Práca by sa taktiež nezaobišla bez odborných znalostí z praxe Ing. Petra Putza zo spoločnosti ASIO, spol s.r.o., ktorému taktiež vyslovujem svoju vďaku.

OBSAH

1	ÚVOD	7
2	TEORETICKÁ ČASŤ.....	8
2.1	Voda.....	8
2.1.1	Fyzikálne – chemické vlastnosti vody	8
2.2	Úprava vody	10
2.2.1	Membránové technológie	10
2.3	Druhy membránových procesov	21
2.3.1	Mikrofiltrácia	21
2.3.2	Ultrafiltrácia	23
2.3.3	Nanofiltrácia.....	24
2.3.4	Reverzná osmóza.....	25
2.3.5	Ostatné membránové procesy	27
2.3.6	Využitie membránových technológií v praxi	28
2.4	Prevádzkovanie komerčných bazénov.....	29
2.4.1	Úprava bazénovej vody	29
2.4.2	Recyklácia pracích vôd z pieskových filtrov bazénovej technológie	30
2.4.3	Ekonomický aspekt recyklácie pracích vôd	31
2.5	Legislatívne predpisy na kvalitu bazénovej vody.....	32
3	CIELE PRÁCE.....	34
4	EXPERIMENTÁLNA ČASŤ	35
4.1	Použitie chemikálie, prístroje a ďalšie vybavenie	35
4.2	Popis nastavených parametrov	36
4.2.1	Popis technológie systému recyklácie.....	36
4.2.2	Technické parametre membrán a nastavenia jednotky.....	37
4.2.3	Základné priemerné parametre vstupnej vody do systému recyklácie.....	38
4.3	Postupy a metódy.....	39
4.3.1	Chemická spotreba kyslíku manganistanom	39
4.3.2	Kultivovateľné mikroorganizmy	40
4.3.3	Stanovenie nerozpustných látok.....	40
4.3.4	Stanovenie tvrdosti vody	41
4.3.5	Stanovenie zákalu.....	42
4.3.6	Stanovenie celkového organického uhlíka.....	42
4.3.7	Stanovenie farby.....	43
4.3.8	Stanovenie redox – potenciálu	43
4.3.9	Stanovenie voľného chlóru.....	43

4.3.10	Stanovenie dusičnanov	43
4.3.11	Stanovenie amónnych iónov	44
5	VÝSLEDKY A DISKUSIA	45
5.1	Stanovenie ukazovateľov kvality vody.....	45
5.1.1	Parametre dané Vyhláškou č. 568/200 Sb.....	45
	Ostatné sledované parametre.....	50
5.2	Zhodnotenie ekonomickej výhodnosti recyklácie pracích vôd	56
6	ZÁVER.....	57
7	ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY	58
8	ZOZNAM PRÍLOH	66

1 ÚVOD

Voda patrí medzi najdôležitejšie suroviny na našej planéte. Nielen že ju potrebujeme na prežitie, no v našich životoch si našla nezastupiteľné miesto aj z pohľadu hygieny, technologických aplikácií, relaxu či množstvu ďalších využití. O potrebe jej zvýšenej ochrany a šetrenia vodných zdrojov teda nie je pochyb.

Medzi veľkých spotrebiteľov vody patria verejné bazény, kúpaliská, akvaparky či kúpele. Pri recyklácii bazénovej vody sa okrem dezinfekcie využívajú pieskové filtre, na ktorých sa zachytávajú nečistoty z filtrovanej vody. Tieto filtre je nutné periodicky spätne preplachovať, pri čom vzniká veľké množstvo odpadnej vody, ktorá najčastejšie končí v kanalizácii. Túto vodu je však možné s využitím membránových technológií recyklovať a vracať naspäť do systému, vďaka čomu sa šetrí nielen spotreba samotnej vody, ale prevádzkovateľ ušetrí aj náklady spojené s ohrevom vody na požadovanú teplotu. Zámerom tejto technológie je teda nahradenie dopúšťania bazénov vodou z vodovodného rádu vyčistenou pracou vodou, ktorá splňa požiadavky dané Vyhláškou č. 568/2000 Sb. o stanovení hygienických požiadavkú na kúpaliská, sauny a hygienické limity písku v pískovištiach venkovních hracích ploch.

Práca je zameraná na využitie membránových technológií v reálnej prevádzke – Lázne Bechyně, kde pomocou nich dochádza k recyklácii pracích vôd z pieskových filtrov. Nejde pritom o ojedinelú prevádzku recyklujúcu praciu vodu týmto spôsobom. V našich končinách túto technológiu využívajú napríklad v kúpalisku VADAŠ v Štúrove (Slovenská republika) či v Aquacentrum Praha [1].

2 TEORETICKÁ ČASŤ

2.1 Voda

Svetový oceán tvorí okolo 71 % povrchu Zeme a vodu v rôznych podobách (jazerá, rieky, močiare...) nájdeme aj na 15 % súše. Zemská hydrosféra obsahuje až $1,39 \cdot 10^9$ km³ vody, pričom viac ako 96 % tohto množstva tvorí slaná voda. Sladká voda pochádza z podzemných vôd, jazier, riek, mokradí a tiež ľadovcov, v ktorých je koncentrovaná veľká časť sladkej vody - $0,0258 \cdot 10^9$ km³. Podiel riek na celkovom množstve sladkej vody je 0,005 %, močiare a mokrade majú podiel v sladkých vodách oveľa väčší, 0,03 % a podiel jazier je 0,36 % [2].

Veľké zastúpenie má voda aj v ľudskom organizme, ktorého tvorí takmer 70 %. Hoc je tento podiel pomerne stály, existujú rôzne odchýlky závislé na type tkaniva, jeho stave a aktivite. Zatiaľ čo mladšie tkanivá s väčšou aktivitou obsahujú vody viac, tie staršie s menej intenzívnou aktivitou majú obsah vody nižší [3].

2.1.1 Fyzikálne – chemické vlastnosti vody

Voda má niekoľko dôležitých vlastností, ktoré sú kľúčové pre plnenie jej funkcií ako sú univerzálne rozpúšťadlo, prostredie pre život, široké priemyselné využitie a mnoho ďalších.

Tie sú založené na schopnosti molekúl vytvárať navzájom vodíkové mostíky, asymetrickosti samotných molekúl a tiež ich polárnej povahe [4].

2.1.1.1 Hodnota pH

Hodnota pH má významný vplyv na chemické a biochemické procesy vo vodách, preto je nesmierne dôležitá a jej stanovenie je súčasťou každého chemického rozboru vody. Aj na základe tejto hodnoty je možné posúdiť agresivitu vody. Taktiež ovplyvňuje účinnosť väčšiny procesov používaných pri úprave a čistení vôd, ako sú napríklad koagulácia, sorpcia, hydrolýza, oxidácia, redukcia, nitrifikácia či denitrifikácia. Destilovaná voda, ktorá je zbavená rozpusteného CO₂, má pri 25 °C hodnotu pH 7. Pri 100 °C klesá na hodnotu 6,1, keďže s teplotou sa mení iónový súčin vody. Pri 0 °C je hodnota pH destilovanej vody približne 7,47 [5].

V čistých prírodných vodách sa pH pohybuje v rozsahu od 4,5 do 9,5, pričom obvykle je táto hodnota daná uhličitanovou rovnováhou, no ovplyvňovať ju môže prítomnosť ďalších látok, ako sú napríklad organické alebo anorganické kyseliny či huminové látky [5].

2.1.1.2 Bod varu

Voda má nezvyčajne vysoký bod varu v porovnaní s analogickými hydridmi síry, selénia či telúru. Bod var telánu je -2 °C , selánu $-41,25\text{ °C}$ a sulfánu $-59,55\text{ °C}$. Tieto hodnoty ukazujú trend, že čím je molekulárna hmotnosť prvku menšia, tým nižšia je teplota varu. Za normálneho atmosférického tlaku je ale bod varu vody až 100 °C [6].

Táto anomália je spôsobená štruktúrou vody, presnejšie vodíkovými mostíkmi, ktorými sú molekuly vody navzájom na seba naviazané. Var je teda možné dosiahnuť až po prerušení týchto väzieb, čo si vyžaduje značnú teplotu. Vďaka tejto vlastnosti vody môže existovať na Zemi život vo forme, ako ho poznáme [2].

2.1.1.3 Elektrická konduktivita

Elektrická konduktivita je mierou koncentrácie ionizovateľných organických a anorganických súčastí vody. V prírodných vodách a taktiež úžitkových vodách s veľmi nízkou koncentráciou organických látok je elektrická konduktivita úmerná koncentrácii anorganických iónov, pričom neelektrolyty ako kremík či bór sa na konduktivitě nepodieľajú [5]. Konduktivita závisí od koncentrácie elektrolytov nielen kvôli tomu, že koncentrácia elektrolytov určuje počet iónov v danom objeme ale aj kvôli vzájomným interakciám iónov. Podľa Coulombovho zákona je elektrická interakcia medzi dvomi iónmi veľká, ak sú ióny nosičmi veľkých nábojov, ak sa nachádzajú vo vzájomnej blízkosti a ak je dielektrická konštanta rozpúšťadla nízka [7].

Je potrebné rozlišovať medzi konduktivitou, teda mernou vodivosťou a konduktanciou – vodivosťou. Líšia sa aj ich jednotky. Jednotkou konduktivity je $\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$ a jednotkou konduktancie je Siemens (S). Ich vzájomný vzťah je definovaný ako

$$G = \kappa \cdot \frac{A}{l} \quad [2]$$

kde G vyjadruje konduktanciu, κ konduktivitu, l je vzdialenosť elektród v metroch a A je plocha elektród v metroch štvorcových. Používaná jednotka v hydrochémii je $\text{mS} \cdot \text{m}^{-1}$. Najčistejšia – vodivostná voda má konduktivitu pri 25 °C $0,005\ 47\ \text{mS} \cdot \text{m}^{-1}$, zatiaľ čo konduktivita destilovanej vody sa pohybuje v rozmedzí $0,05\ \text{mS} \cdot \text{m}^{-1}$ až $0,5\ \text{mS} \cdot \text{m}^{-1}$ [5].

2.1.1.4 Rozpustnosť tuhých látok, plynov a kvapalín

Rozpustnosť je definovaná ako maximálne množstvo látky, ktoré sa dá úplne rozpustiť v danom množstve rozpúšťadla [8]. Zvýšená mineralizácia vôd má za následok zvýšenie rozpustnosti anorganických látok, pretože rastie hodnota iónovej sily. Rozpustnosť látok závisí do veľkej miery na teplote, pričom rozpustnosť u väčšiny anorganických a organických látok so stúpajúcou teplotou narastá (rozpúšťajú sa endotermicky). Do skupiny látok, ktorých rozpustnosť naopak so stúpajúcou teplotou klesá (rozpúšťajú sa exotermicky) patria napríklad $\text{Ca}(\text{OH})_2$, CaSO_4 , CaCO_3 , $\text{Mg}(\text{OH})_2$, MgCO_3 , FePO_4 a iné. Ide teda o látky, ktoré sú v technológii vody a hydrochémií významné [5].

2.2 Úprava vody

Rôzne spôsoby úpravy vody sa využívajú na zlepšenie jej kvality, odstránenie mikroorganizmov či zníženie množstva toxických látok [9]. Hrubo dispergované látky je možné z vody odstrániť sedimentáciou, jemnejšie suspenzie sedimentáciou a filtráciou a čírením, teda koaguláciou, je možné upraviť veľmi jemné suspenzie. Rozpustné látky sú z vody odstrániteľné sorpciou, oxidáciou a výmenou iónov [10]. Vedľa spomínaných metód je na úpravu vody možné použiť aj pomerne nové odvetvie – membránové procesy [11].

2.2.1 Membránové technológie

Pri úprave vody je možné využívať selektívne, polopriepustné membrány, kedy sa takéto procesy označujú ako membránové. Spracovávaná vstupná surovina sa privádza tak, aby bola v kontakte s aktívnou vrstvou membrány, pričom určité komponenty touto membránou prechádzajú a iné membrána naopak zadrží [12].

2.2.1.1 Historický vývoj membránových technológií

Procesy filtrácie na zlepšenie kvality kvapalných zmesí sa využívali už v staroveku. Básnik Tito Lucrecio Caro v svojej básni z roku 60 p.n.l. píše, že sa človek naučil čistiť vodu jej filtráciou cez zeminu či piesok. Počas mnohých storočí sa na separáciu suspenzií využívali napríklad íly, živice, pergamen či črevá [13].

Prvé vedecké práce s membránami realizoval M. La Hire v roku 1688, ktorý hodnotil priepustnosť stien močových mechúrov ošipaných voči vode a alkoholu. V roku 1752

francúzsky fyzik Jean Antoine Nollet stanovil základné princípy osmózy. V roku 1861 Thomas Graham dokázal existenciu semipermeabilných membrán, ktoré umožňovali prestup rozpustených látok s nízkou molekulovou hmotnosťou, no prestup koloidných častíc neumožňovali. Taktiež dokázal, že rýchlosť difúzie plynu je nepriamo úmerná druhej odmocnине jeho hustoty. Tento vzťah je známy ako Grahamov zákon. V roku 1864 bola Moritzom Traubeom skonštruovaná prvá syntetická semipermeabilná membrána. Holandský chemik van't Hoff v roku 1887 charakterizoval osmotický tlak [13].

Práce začiatkom 20. storočia boli zamerané na pochopenie javov zahrnutých v bariérových a medzifázových systémoch, ako aj v ideálnych kvapalných a plynových systémoch. Na prácu Adolfa Ficka, ktorý v roku 1855 odvodil zákony difúzie, nadviazala komerčná produkcia nitrocelulóзовých mikrofiltračných a ultrafiltračných membrán pre laboratórne separácie [14]. Bechold použil termín „ultrafiltrácia“ v roku 1906 a priekopníkom modernej ultrafiltrácie sa v 60-tych rokoch stal Michaels. Mikroporézne membrány vyvinuté Zsigmondym okolo roku 1910 boli asymetrické s jemne poréznuou vrstvou na strane vstupu a otvorenou štruktúrou na strane permeátu. Najtesnejšie z ultrafiltračných membrán sa vyrábali z regenerovanej celulózy. Membránové filtre našli prvé komerčné využitie v roku 1927 v nemeckej spoločnosti Sartorius [15]. O štyri roky neskôr, v roku 1931 Elford vyvinul metódy využívajúce na sterilizáciu membrán ultrafialové žiarenie. Do roku 1945 boli membránové filtre využívané primárne na odstraňovanie mikroorganizmov a častíc z kvapalných alebo plyných zmesí. Spolu s vývojom mikrofiltrácie narastal aj záujem o vývin membrán pre reverznú osmózu, ktoré by našli využitie pri desalinácii morskej vody a ktoré by vydržali vysoký tlak potrebný pre tento proces [16]. Prehľad dôležitých objavov v súvislosti s vývojom membránových technológií je zhrnutý v tabuľke 1.

Tab. 1 Prehľad mílnikov vo vývoji membránových technológií [15]

Udalosť	Vedec	Rok
Osmóza	Abbe Nollet	1748
Zákony difúzie	Fick	1855
Dialýza	Graham	1861
Osmotický tlak	Traube, Pfeffer, Van't Hoff	1860-1887
Mikroporézne membrány	Zsigmondy	1907-1918
Donnanov potenciál	Donnan	1911
Membránový potenciál	Teorell, Meyer, Sievers	1930

Hemodialýza	Kolff	1944
Membránové transportné modely	Kedem, Katchalsky, Lonsdale, Merten, Pusch, Sourirajan	1960-1970
Špirálovo vinuté membrány	Westmoreland, Bray	1965-1970
Membrána RO z dutých vlákien	Mahon, Hoehn and Milford	1965-1970
Tenkovrstvová kompozitná membrána	Cadotte and Rozelle	1972

2.2.1.2 Princíp membránových technológií

Za membránový proces možno označiť taký proces, pri ktorom vplyvom rôznych vlastností separovaných látok dochádza k selektívnemu transportu jednej zložky cez membránu [11]. Delenie je založené na tom, že jednotlivé zložky zmesi sa navzájom líšia v odpore proti prechodu membránou, pričom zmes vznikajúca na druhej strane membrány má zloženie odlišné od pôvodnej zmesi [17].

Pre transport látok cez membránu je potrebná hnacia sila. Jej pôsobenie umožňuje prechádzať, teda permeovať, niektorým alebo aj všetkým zložkám delenej zmesi membránou, čím vzniká *permeát*, prvý produkt membránového delenia. Naopak časť delenej zmesi, ktorá bola membránou zadržaná sa odvádza z deliaceho zariadenia ako *retentát*, teda druhý produkt membránového delenia [18].

Ako hnacia sila môže vystupovať rozdiel koncentrácií, tlaku, teploty, alebo elektrické pole. Pri rozdielnej koncentrácii látky pred a za membránou dochádza k transportu látok membránou a keďže rôzne látky majú rôzny difúzny koeficient, pohybujú sa rôznou rýchlosťou. Aj rozdiel tlakov pred a za membránou umožňuje transport látky cez membránu a rôzna rýchlosť transportu rôznych zložiek vyplýva z rozdielnej veľkosti ich molekúl, prípadne rôznej interakcie s materiálom membrán. Elektrické pole spôsobuje migráciu elektricky nabitých častíc a vloženie iónovo selektívnej membrány dochádza na základe polarít a sily náboja jednotlivých zložiek k ich separácii. Rozdielna teplota na jednotlivých stranách membrány môže okrem prestupu tepla spôsobiť aj transport materiálu cez membránu [11].

Medzi výhody membránových separácií patrí pomerne nízka energetická náročnosť a tiež veľká technologická odolnosť a stálosť zariadenia. Do spracovávanej vody sa nedávajú žiadne chemikálie a v procese nevznikajú ani žiadne kaly, čo je taktiež možné považovať za pozitívny aspekt [19].

2.2.1.3 Membrány používané v membránových technológiách

2.2.1.3.1 Rozdelenie typov membrán

Membránové procesy by sa nezaobišli bez samotnej membrány. Tú možno definovať ako cielene nedokonalú bariéru, ktorá umožňuje prechod jednej zložky separovanej zmesi rýchlejšie než iným zložkám prítomných v zmesi či v ideálnom prípade umožňuje prechod jednej zložke, zatiaľ čo druhá zložka membránou neprechádza [11].

Membrány, ktoré sa používajú v membránových separačných zariadeniach možno rozdeliť do niekoľkých skupín. Na základe pôvodu sa rozlišujú membrány syntetické a biologické. Biologické membrány predstavujú nesmierne dôležitú časť rastlinných aj živočíšnych buniek, v ktorých fungujú ako selektívne priepustné bariéry, čím riadia transport molekúl z okolia bunky do jej vnútra a naopak. V priemysle sa však kvôli chemickým a fyzikálnym vlastnostiam na membránové separácie, až na výnimky ako sú dialyzačné črevá, nevyužívajú. Na druhej strane syntetické membrány je možné vyrobiť tak, aby svojimi fyzikálne - chemickými, chemickými a mechanickými vlastnosťami boli uplatniteľné v technologických procesoch [18].

Membrány možno rozdeliť aj podľa skupenstva. Kvapalné membrány sú tvorené vrstvou kvapaliny, ktorá je vhodným spôsobom zakotvená medzi fázami (napríklad v póroch pevnej prepážky) a umožňuje tak transport látok medzi týmito fázami. Rozšírenejšími sú ale membrány v pevnom skupenstve, ktoré môžu mať podobu tenkých listov, tenkostenných trubiek alebo kapilár [18].

Podľa povahy použitého materiálu sa syntetické pevné membrány delia na anorganické a organické. Organické membrány sú zväčša tvorené polymermi ako sú acetátové vlákna (CA), polysulfón (PS), polyétersulfón (PES), polyamid (PA), polyvinylidénfluorid (PVDF) alebo polypropylén (PP) [20]. Ich chemické zloženie možno v širokom rozmedzí modifikovať, čím dochádza aj k zmene ich separačných a mechanických vlastností [18]. Výhodou polymérových membrán je ich cena, jednoduchosť výroby a tiež dostupnosť širokého rozsahu veľkostí pórov. Naopak, ich nevýhodou je, že sú limitované jednou alebo viacerými operačnými podmienkami (pH, teplota, tlak, tolerancia chlóru...) [20].

Medzi materiály používané na výrobu anorganických membrán patrí napríklad borosilikátové sklo, pyrolytický uhlík, nehrdzavejúca oceľ či iné kovové materiály. Anorganické membrány sú oproti organickým odolnejšie voči veľkým tlakovým rozdielom a vysokým teplotám. Majú tiež dlhšiu životnosť a väčšiu odolnosť voči pH. V porovnaní

s organickými membránami sú podstatne drahšie, čo je ich veľkou nevýhodou. Taktiež sú málo odolné voči mechanickému namáhaniu, ľahko sa polámu či prasknú [20].

Ďalšie delenie poskytuje vnútorná mikroštruktúra, ktorú možno ovplyvniť spôsobom výroby. Podľa nej sa dajú membrány rozdeliť na porézne a neporézne. V prvej menovanej skupine membrán sa nachádzajú kanáliky, teda póry, ktoré prepojujú oba povrchy membrány. Veľkosť týchto kanálikov potom určuje deliacu schopnosť membrány [18].

Porézne membrány sa využívajú pri mikrofiltrácii a ultrafiltrácii. Vyrobené sú z polymérových materiálov a veľkosť prítomných pórov sa pohybuje od 2 nm do 10 μm [21]. Cez neporézne membrány sú zložky transportované difúziou. Delenie zložiek je potom v týchto membránach dané rozdielnymi difuzivitami zložiek a ich rozdielnou rozpustnosťou v membráne. Vlastnosti materiálu membrán teda výrazne ovplyvňujú separáciu zložiek. Keďže difuzivity a rozpustnosti zložiek v anorganických neporéznych materiáloch sú pre praktické využívanie príliš nízke, na výrobu neporéznych membrán sú používané hlavne polymérne organické materiály [18].

Morfológia membrány určuje rozdelenie membrán na symetrické a asymetrické. Najčastejšia hrúbka symetrických membrán sa pohybuje v rozmedzí od 10 do 200 μm a ich štruktúra pozdĺž priečného rezu membránou sa nemení. Odpor takejto membrány proti transportu hmoty je úmerný celkovej hrúbke membrány. Naopak vnútorná štruktúra asymetrických membrán sa pozdĺž priečného rezu mení [18]. Na povrchu asymetrickej membrány sa nachádza tenká separačná vrstva, tzv. skin [11]. Pod touto vrstvou, ktorej hrúbka sa môže pohybovať od 0,1 do 1 μm je umiestená vrstva pórov, ktorej hrúbka sa pohybuje od 100 do 200 μm . Tieto póry sú asymetrické, to znamená, že sa postupne rozširujú. Symetrické membrány fungujú ako konvenčné filtre a zadržávajú častice, ktoré pórmi neprešli. Následne však podliehajú tzv. foulingu, teda zanášaniam pórov. Na druhej strane asymetrické membrány fungujú ako povrchové filtre, ktoré neprepustený materiál zadržávajú na povrchu membrány a nie vo vnútri pórov, zabraňujúc tak ich upchaniu [22].

2.2.1.3.2 Základné charakteristiky membrán

Neexistuje vhodná membrána, ktorá by bola použiteľná pre všetky membránové procesy. Medzi základné požiadavky, ktoré sú na membránu používanú v membránových technológiách kladené patrí veľká selektivita, dlhá životnosť, veľká permeabilita, no tiež aj chemická a mechanická stálosť [17],[23].

Selektivita má vplyv na účinnosť delenia, regeneráciu a taktiež čistotu produktu. Čím vyššia je selektivita membrány, tým je potrebná plocha membrány menšia, selektivita je teda nepriamo úmerná potrebnej veľkosti plochy membrány. V prípade, že je selektivita membrány nedostatočná, systém vyžaduje viacstupňové zaradenie, ktoré je z ekonomického hľadiska menej výhodné [17]. Selektivita membrány S_{ij} pre zložku i voči zložke j je definovaná ako

$$S_{ij} = \frac{(C_i/C_j)_{perm}}{(C_i/C_j)_{ret}} \quad [2]$$

pričom c_i a c_j označujú koncentráciu zložiek i a j na permeátovej resp. retentátovej strane membrány [18]. Okrem separačného faktoru S_{ij} je možné selektivitu kvantitatívne vyjadriť aj pomocou retenčného koeficientu R , ktorý je definovaný rovnicou

$$R = 1 - \frac{c_P}{c_F} \quad [3]$$

kde c_P je koncentrácia separovanej zložky v permeáte a c_F vyjadruje koncentráciu zložky v nástreku. Ide o bezrozmernú veličinu a jej hodnota sa mení v rozmedzí od 0 do 1, pričom pri hodnote 1 ide o úplnú retenciu a membrána je potom ideálne polopriepustná [24].

Na odolnosti voči mechanickým, tepelným a chemickým vplyvom závisí celová životnosť membrány. Tá má následne vplyv na údržbu či prípadnú výmenu membránu [15].

Permeabilita membrány, teda priepustnosť pre zložky delených zmesí, pre zložku i je definovaná ako tok zložky i jednotkovou plochou membrány pri jednotkovej hybnej sile cez jednotkovú hrúbku membrány [18]. Permeabilita ovplyvňuje rýchlosť procesu a taktiež má vplyv na veľkosť plochy membrány a teda aj na investičné náklady [17]. Stanovenie permeability je zvyčajne založené na sledovaní množstva prejdenej látky membránou o známej ploche pri známom koncentračnom gradiente [25].

2.2.1.3.3 Zanášanie membrán a koncentračná polarizácia

Pri membránových procesoch možno pozorovať postupné klesanie toku permeátu s rastúcou dobou prevádzky membrány, až sa dosiahnu ustálené hodnoty. Veľkosť a rýchlosť poklesu je závislá na druhu separácie a tento pokles môže byť spôsobený niekoľkými faktormi, ktoré sa pri rôznych membránových separáciách uplatňujú v rozdielnej miere [18]. Koncentračná polarizácia a zanášanie membrán sú typické javy ovplyvňujúce membránové

procesy, pričom oba majú za následok redukcii toku permeátu [26]. Menované javy predstavujú najväčšiu nevýhodu membránových procesov [27].

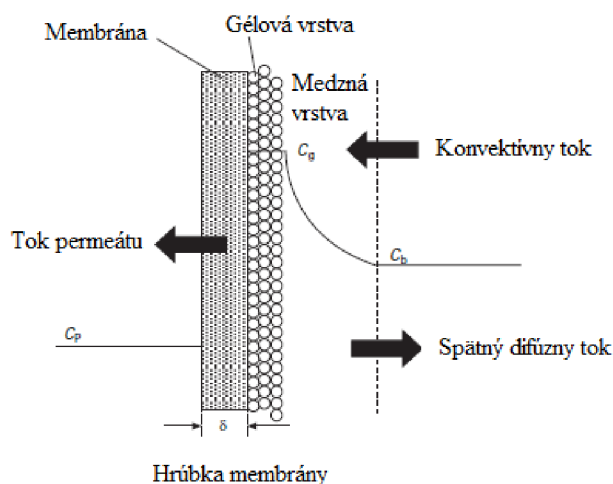
Zanášanie membrán je spôsobené zadržiavaním častíc v póroch membrány, vo vstupných otvoroch pórov alebo na povrchu membrán a závisí na dizajne systému, napájaní a fyzikálno-chemickej povahy membrány [27]. V dôsledku zanášania membrán je potrebný vyšší tlak ako je pre membránu bežné, pričom platí, že čím viac je membrána zanesená, tým väčším tlakom je na ňu potrebné pôsobiť. Za následok má teda zanášanie membrán vyššiu spotrebu energie [28].

Sú známe rôzne typy zanášania membrán: koloidné, biologické, organické a anorganické. Koloidné zanášanie spôsobuje akumuláciu koloidných častíc ako sú polysacharidy, lipoproteíny, oxidy mangánu a železa či iné organické a anorganické častice na membráne. Biologické zanášanie (bio-fouling) označuje jav, kedy sa na povrchu membrány začína tvoriť biofilm pozostávajúci z mikroorganizmov a extracelulárnych polymérnych látok. Rastúce mikroorganizmy v biofilme následne blokujú póry čo vedie k zvýšenému odporu toku permeátu. Organické zanášanie membrán je spôsobené adsorpciou organických zlúčenín prítomných v separovanej zmesi. Ukladanie anorganických solí na povrchu membrány spôsobuje anorganické zanášanie. Tieto soli môžu zahŕňať napríklad CaSO_4 , SiO_2 či CaCO_3 . Počas tohto procesu sa slabo rozpustné soli môžu vyzrážať z roztoku na povrch membrány, keď ich koncentrácie presiahnu limity rozpustnosti [28].

Hlavné dva mechanizmy zanášania membrán sú blokácia pórov a tvorba koláča na povrchu membrány. Upchávanie pórov zvyšuje odpor membrány, zatiaľ čo tvorba koláča vytvára ďalšiu vrstvu, ktorou musí permeát pretekať. Zanášanie membrán je jav, ktorý závisí od povahy častíc, operačných podmienok ako sú pH, tlak, iónová sila či koncentrácia častíc a samozrejme aj od membrány samotnej [27].

Podobným spôsobom sa na vonkajšom či vnútornom povrchu môžu adsorbovať niektoré zložky separovaných zmesí a znižovať tak priechodnosť membrán [18].

Pri filtrácii roztoku obsahujúceho rozpustené zložky cez poréznu membránu niektoré komponenty roztoku membránou prechádzajú a iné naopak nie, čo má za následok o poznanie vyššiu lokálnu koncentráciu zadržaných častíc na povrchu membrány v porovnaní s koncentráciou v jadre tekutiny. Vzniká tak viskózna či gélová vrstva. Tento jav je známy ako koncentračná polarizácia (viď obr. 1) [26]. Zvýšená koncentrácia častíc pri povrchu membrány spôsobí ich difúzny transport proti smeru toku permeátu [18].



Obr. 1 Schematický diagram koncentračnej polarizácie [26]

2.2.1.3.4 Čistenie membrán

Čistenie membrán sa vyžaduje na odstránenie skalantov či zanášajúcich častíc pre zlepšenie resp. obnovenie toku. Za takmer univerzálnu metódu čistenia sa dá považovať chemické čistenie, ktorého účinnosť rastie s teplotou. Je založené na chemických reakciách – hydrolyze, chelatácii, disperzii, saponifikácii či solubilizácii. Kyseliny sa aplikujú za účelom odstránenia vyvráždianých solí, zásady zase na odstránenie organických zlúčenín ich rozpustením. V prípade kontaminácie membrány baktériami nasleduje za chemickým čistením sanitácia chlórrom, nie však pre PA membrány, a peroxidom vodíka. Membrány používané na mikrofiltráciu sa zvyčajne musia čistiť najčastejšie, na druhú stranu membrány reverznej osmózy vyžadujú najnižšiu frekvenciu čistenia [29].

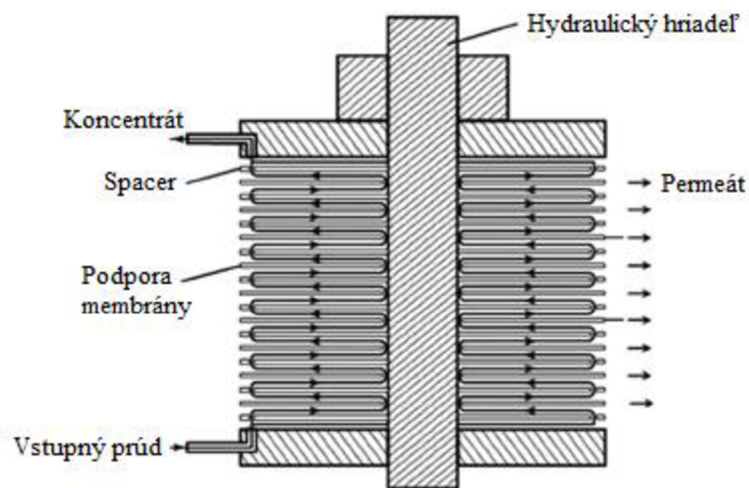
2.2.1.4 Typy membránových modulov

Hoci vývoj vysoko selektívnych asymetrických membrán značne prispel k vývoju membránových procesov, musel byť pokrok v ich využívaní sprevádzaný aj podporným systémom, v ktorom by membrány boli usporiadané do rôznych konfigurácií [19]. Tie sú charakterizované veľkým povrchom membrány na jednotkový objem, kapacitou spracovávať tekutiny za daných hydrodynamických podmienok a prevádzkových tlakov. Okrem toho by mal byť tento aparát jednoducho čistiteľný, ľahko udržiavateľný a je snaha o jeho čo najmenší objem [18],[22]. V membránovom separačnom procese je systém, kde sú membrány umiestnené, nazývaný membránovým modulom [22].

2.2.1.4.1 Doskový modul

Z konštrukčného hľadiska sú najjednoduchšie **doskové moduly**, kedy sú membrány uchytené v rámoch podobne ako v kalolisoch [16]. Takéto usporiadanie umožňuje priechod permeátu a zároveň zabraňuje „zlepeniu sa“ membrán [28]. Vzhľadom na veľmi malý prierez kanálikov umožňujúcich tok, ktoré ovplyvňujú rýchlosť prúdenia, je za normálnych priemyselných podmienok povaha tohto toku laminárna. Hustota membrán používaných v týchto moduloch sa pohybuje v rozsahu od 400 – 600 m²·m⁻³ [22].

Vďaka malému vnútornému objemu sú tieto moduly postačujúce v prípadoch, kedy je potrebná pravidelná dezinfekcia [22]. Aj keď sa tento modul zvyčajne nevyužíva, uplatnenie nachádza v špeciálnych aplikáciách akou je napríklad úprava odpadnej vody s vysokou úrovňou suspendovaných častíc (napr. výluh zo skládky) [28].

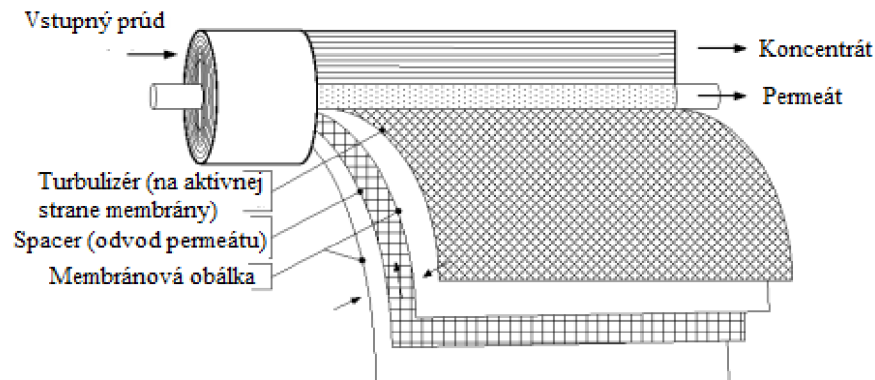


Obr. 2 Doskový modul [22]

2.2.1.4.2 Modul so špirálovo vinutou membránou

Tento membránový modul je využívaný hlavne pri reverznej osmóze a nanofiltrácii [28]. Zvinutím spojených membrán do špirály vzniká špirálový modul využívaný pri procesoch s tlakovým gradientom [11]. Ide o kompaktnejšiu obdoba doskového modulu. Podobnosť spočíva v plochosti membrán, ktoré sú ale ovinuté okolo trubice na odvod permeátu [30]. Surovina prechádzajúca priestorom, ktorý je vymedzený distančnými vložkami, prúdi v smere osy systému. Permeát preniká membránou kolmo ku smeru prúdenia vstupného prúdu a dostáva sa do priestoru s poréznym materiálom. Tým je po špirále dopravený k dierovanej trubke v osi modulu, tou sa potom odvádza z aparátu [17].

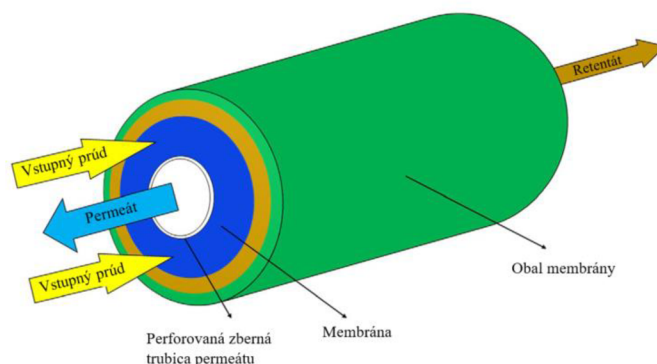
Toto usporiadanie zlepšuje účinnosť a tiež efektívnosť membránového modulu. Priemerná hustota poskytovaná týmto membránovým modulom sa pohybuje od 300 do 1000 $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$ [30]. Výhodou tohto modulu je ľahká výmena modulových prvkov [28].



Obr. 3 Špirálovo vinutý modul [11]

2.2.1.4.3 Trubkový modul

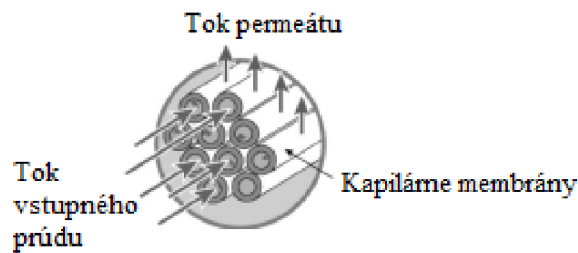
Ide o zväzok poréznych či perforovaných tuhých trubiek s priermi 10 až 30 mm [17]. Tieto trubky môžu byť keramické, kovové alebo vyrobené z polymérov [27]. Membrána spravidla býva nanosená na vnútornej strane kanálikov a permeát obteká z vonkajšej strany modulu. Hlavná výhoda tohto usporiadania spočíva vo vhodnej hydrodynamike toku, vďaka ktorej je trubkový modul vysoko odolný voči zanášaniam membrán [11]. Tento modul je teda vhodný na úpravu vôd s vysokým podielom pevných častíc alebo pre kvapaliny, z ktorých môže byť tuhá fáza vylučovaná [17],[28]. Priemerná hustota membrán sa pri týchto moduloch pohybuje okolo 300 $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$ [27].



Obr.4 Trubkový modul [27]

2.2.1.4.4 Kapilárny modul

Aj pri kapilárnom module membrána pokrýva vnútornú stenu poréznej trubky, ktorej vnútorný priemer je menší – pohybuje sa v rozsahu od 0,2 až 1,5 mm. Modul obsahuje veľké množstvo trubiek a jeho priemer sa pohybuje od 50 do 150 mm [17]. Nástrek je privádzaný do vnútorného priestoru kapilár [11]. Vzhľadom na zložitosť modulu je čistenie náročnejšie [26].



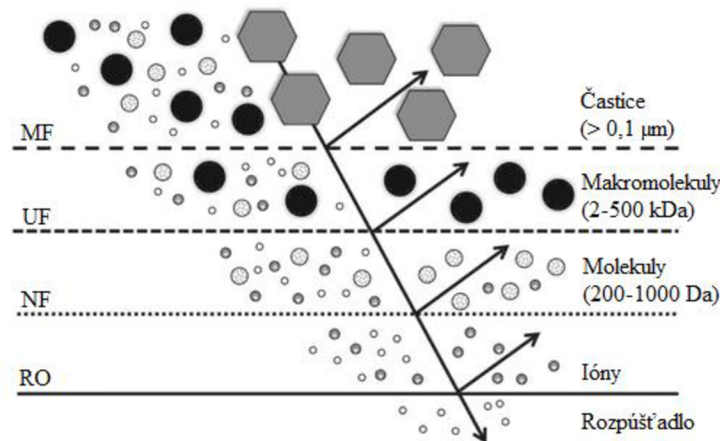
Obr.5 Kapilárny modul [26]

2.2.1.4.5 Modul s dutými vláknami

Moduly s dutými vláknami zvyčajne obsahujú od 50 do 5000 dutých vlákien [30]. Tieto vlákna pozostávajú z poréznej neselektívnej nosnej vrstvy s hrúbkou asi 200 μm a aktívnej vrstvy s hrúbkou väčšou ako 40 nm. Táto aktívna vrstva je membránou, ale aby bola odolná voči hydrostatickému tlaku, potrebuje podporu [28]. Vlákná sú kapiláry vyrobené z plastického materiálu majúce vnútorný priemer 0,01 mm až 0,04 mm. Surovina preniká pórmí v stene do priestoru medzi vláknami. Permeát prechádza membránou a stenou do vnútra kapilár a z ich konca vyteká a následne vystupuje z modulu [17]. Nástrek sa privádza na vnútornú stranu, inak by hrozilo zanášanie membrány [11]. Výhoda modulu s dutými vláknami je jeho schopnosť pojať veľké plochy membrán v jednom module [28]. Na jednotku objemu ponúkajú tieto moduly povrch membrány až 1200 $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$ [30]. Výroba týchto modulov je však kvôli zložitosti výrobného procesu nákladná [28].

2.3 Druhy membránových procesov

Pod pojmom filtrácia sa rozumie separácia dvoch alebo viacerých komponentov z tekutého média, ktorá je založená na rozličnej veľkosti častíc. V konvenčnom poňatí ide o separáciu pevných nemiesateľných častíc z kvapalného či plynného prostredia, membránová filtrácia však rozširuje túto aplikáciu zahŕňajúc separáciu aj rozpustených látok z plynných či kvapalných zmesí [16].



Obr. 6 Spektrum separácie jednotlivých membrán [31]

2.3.1 Mikrofiltrácia

Mikrofiltrácia je spomedzi membránových procesov najstaršia. Veľkosť pórov pri mikrofiltrácii sa typicky pohybuje od 0,05 do 10 μm [15]. Mikrofiltrácia prebieha pod tlakovým gradientom 1 až 3 bar [32]. Separačný mechanizmus nie je jednoduchý, nakoľko častice s menšou veľkosťou ako je veľkosť póru ním voľne prechádzajú, zatiaľ čo väčším časticiam prechod membránou nie je umožnený. Objem toku prechádzajúci pórom mikrofiltračnej membrány môže byť opísaný Darcyho zákonom:

$$J = A \cdot \Delta P \quad [4]$$

Kde tok prechádzajúci membránou J je priamo úmerný tlaku a konštante permeability A [33]. Hodnota A je funkciou pórovitosti membrány, veľkosti pórov a hrúbky membrány a pohybuje sa od 0,5 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{bar}^{-1}$ pre husté membrány až po 5 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{bar}^{-1}$ pre viac otvorené membrány [15].

Tento proces je možné vykonávať dvomi spôsobmi: dead-end filtration (DEF) a cross-flow filtration (CFF). Prvý menovaný spôsob je obdoba klasickej filtrácie, kedy zmes prúdi kolmo na plochu membrány. Pri tomto spôsobe sa však na povrchu membrány začnú usadzovať časti, ktoré membránou neprešli, čo znižuje rýchlosť filtrácie. Z uvedeného vyplýva, že DEF je vhodnejšia na využitie pri zmesiach s nízkou koncentráciou častíc [15]. Usadenú vrstvu častíc možno odstraňovať krátkodobým obrátením smeru prúdenia kvapaliny, čím sa zvýši rýchlosť permeácie [17]. Akumulácii týchto častíc na povrchu membrány sa dá zabrániť druhým menovaným spôsobom – CFF. V tomto prípade je prúd zmesi hnaný na membránu tangenciálne, čo má za následok kontinuálne odstraňovanie častíc z povrchu membrány. Výsledný efekt je redukcia nahromadeného koláča a menšie zanášanie membrány [15].

Mikrofiltrácia našla prvé komerčné využitie v biologickej a farmaceutickej výrobe v 60. rokoch a nasledujúcich 20 rokov sa využívala hlavne pre odstraňovanie mikroorganizmov vo farmaceutickom priemysle a tiež na odstránenie častíc z oplachových vôd pri výrobe polovodičov. Uplatnenie nachádzala aj v potravinárskom priemysle pri sterilizácii piva a vína, no pre veľké náklady sa v úprave vôd nevyužívala. Situácia sa zmenila po epidémii spôsobenej *Cryptosporidium* v roku 1992 v USA, kedy došlo k sprísneniu noriem na odstránenie uvedeného patogénu čo malo za následok širšie využívanie tlakových membránových technológií [12].

Široký rozsah veľkosti pórov naznačuje aj široké využitie mikrofiltrácie v praxi a po hemodialyzačných membránach je trh s mikrofiltračnými membránami druhý najväčší spomedzi všetkých membrán [32]. Najčastejšou aplikáciou mikrofiltrácie je odstraňovanie baktérii z vôd, teda sterilná filtrácia. Tá sa vykonáva v usporiadaní dead-end s využitím membrán s veľkosťou pórov 0,2 μm , avšak aj touto veľkosťou sú určité mikroorganizmy schopné preniknúť. Preto niektorí používatelia na lepšie zabezpečenie sterility volia membrány s veľkosťou pórov 0,1 μm [34].

V elektronickom priemysle sa mikrofiltračné membrány používajú na odstránenie mikročastíc z rôznych chemikálií, ako je napríklad kyselina sírová, kyselina dusičná, amoniak a peroxid vodíka, pri výrobe ultračistej vody [26].

Spomedzi iných rôznych priemyselných aplikácií je dôležitou aplikáciou mikrofiltrácie čistenie mastných odpadových vôd. Mikrofiltrácia je vďaka svojej schopnosti spracovávať nízke koncentrácie vstupnej zmesi pre túto aplikáciu sľubným procesom, pretože typické zloženie mastnej odpadovej vody sa pohybuje od 50 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ do 1 000 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ tuku. Vysoko efektívny mikrofiltračný proces pomáha pri dosiahnutí separačnej účinnosti takmer 90 – 99 % aj pri nízkych koncentráciách tuku [27].

2.3.2 Ultrafiltrácia

Proces ultrafiltrácie membrány možno definovať ako proces medzi mikrofiltráciou a nanofiltráciou, čomu odpovedá rozsah veľkostí pórov medzi 0,01–0,05 μm [15]. Rovnako ako v prípade mikrofiltrácie, aj pri ultrafiltrácii sa uplatňuje mechanizmus separácie častíc na základe ich veľkosti, resp. veľkosti pórov, ktoré im umožnia alebo naopak zabránia v prechode membránou, teda sa separujú na základe sitového efektu. Ultrafiltračné membrány majú schopnosť zadržiavať väčšie organické makromolekuly s molekulovou hmotnosťou v rozmedzí 300 až 500 000 Da. Medzi typické zadržané látky patria bielkoviny, sacharidy, polyméry či koloidné častice [26]. V porovnaní s reverznou osmózou sa pracuje s nižšími tlakmi, typický rozsah je od 1 do 10 bar [27].

Membrány používané k ultrafiltrácii sú asymetrické a najčastejším polymérom na ich výrobu je polysulfón (PS), no vyrábajú sa aj z ďalších polymérov (CA, PVDF, PES...). Napriek tomu, že membrány na báze acetátu celulózy sú menej náchylné k zanášaniam, sú membrány z polysulfónu stabilnejšie a teda nachádzajú uplatnenie v širokom spektre aplikácií [15]. Podobne ako mikrofiltračné membrány, aj membrány používané pri ultrafiltrácii podliehajú zanášaniam [35]. V priebehu procesu tak dochádza k nárastu koncentrácie makromolekúl v blízkosti membrány. Pri ustálenom stave sa konvektívny tok molekúl smerom k membráne rovná spätnej difúzii do hlavného prúdu. Ďalším zvyšovaním tlaku potom už intenzita toku permeátu nerastie, pretože sa zároveň zvyšuje odpor medznej vrstvy [12]. Použitý materiál pri príprave membrány má významný vplyv na tento jav, kedy hydrofóbne materiály sú náchyľnejšie k zanášaniam v porovnaní s materiálmi hydrofilnými [35].

Ultrafiltračné membrány nachádzajú uplatnenie v širokej škále priemyselných odvetví od úpravy odpadnej vody až po biotechnológie [35]. Spolu s mikrofiltráciou je možné ultrafiltráciu využiť ako predradený proces pred reverznou osmózou. Ultrafiltrácia sa úspešne aplikuje aj pri spracovaní olejových emulzií, pri získavaní elektroforéznych farieb z oplachových vôd a pri spracovaní odpadných vôd textilného a papierenského priemyslu. Využíva sa taktiež na zahusťovanie latexových emulzií či pri hemodialýze [12].

Značnú možnosť uplatnenia ultrafiltrácie nájdeme v potravinárskom priemysle: hlavne v mliekarenskom priemysle a pri výrobe džúsov, piva či vína. Ultrafiltrácia sa úspešne uplatňuje pri čírení ovocných štiav. Výsledkom procesu čírenia džúsov je koncentrovaná dužina a vyčistená frakcia bez prítomnosti sporulujúcich mikroorganizmov [26].

2.3.3 Nanofiltrácia

Od uvedenia tejto metódy v 80-tych rokoch minulého storočia dosiahol tento separačný proces mnoho zlepšení a záujem o výskum v tejto oblasti výrazne rastie [36].

Veľkosť pórov spadá do rozsahu medzi 0,5 až 5 nm a kvôli vysokému hydrodynamickému odporu sú na prechod permeátu membránou v porovnaní s mikrofiltráciou či ultrafiltráciou potrebné vyššie tlaky [35]. V porovnaní s ultrafiltráciou a reverznou osmózou je nanofiltráciu ťažšie definovať [37]. Mechanizmus transportu látok výrazne závisí od štruktúry membrány, od interakcie medzi membránou a transportovanými molekulami. Účinnosť separácie je ovplyvnená efektom „preosievania“, kedy hlavnú úlohu zohráva veľkosť nanopórov a molekúl rozpustenej látky, alebo difúznymi vlastnosťami rozpustených molekúl [38]. Nanofiltračné membrány sa používajú pre svoju iónovú selektivitu, pričom retencia rozpustenej soli je určená valenciou aniónov. Jednomocné anióny, ako je napríklad Cl^- , membránou prechádzajú, zatiaľ čo viacmocné anióny (SO_4^{2-}) membrána zachytí [33].

Tok nanofiltračnou membránou je daný rovnicou 5:

$$F = \alpha(\Delta P - \Delta\pi) \quad [5]$$

kde F vyjadruje tok membránou, α koeficient permeability, ΔP rozdiel tlakov a $\Delta\pi$ rozdiel osmotických tlakov. Niektoré rozpustené látky permeujú aj cez membránu, čo je potrebné zohľadniť koeficientom δ . V prípade, že $\delta < 1$ platí:

$$F = \alpha(\Delta P - \delta \Delta\pi) \quad [6]$$

Tok rozpustených látok je vyjadrený v rovnici 7:

$$F = \beta - \Delta c_s \quad [7]$$

v ktorej je β vyjadrením koeficientu permeability rozpustených látok a Δc_s je rozdiel koncentrácií rozpustených látok. Z rovnice 5 je zrejmé, že tok membránou lineárne rastie s rastom aplikovaného tlaku. Na druhej strane tok rozpustených látok je nezávislý od použitého tlaku a permeabilita rozpustených látok závisí na rozdielnej koncentrácii roztoku na stranách membrány [35].

Väčšina nanofiltračných membrán je hydrofilná, preto je možné ich využívať na odstránenie nabitých aj neutrálnych zlúčenín z vodných roztokov [37]. Membrány pre nanofiltráciu sa vyrábajú v rôznych konfiguráciách, ako napríklad možno uviesť doskový modul, modul so špirálovo vinutou membránou či rúrkový modul. Voľba konkrétnej konfigurácie závisí na ekonomike procesu ale tiež na jednoduchosti výmeny a čistenia. Pre priemyselné využitie nanofiltrácie prevažuje modul so špirálovo vinutou membránou [22].

Nanofiltračné metódy majú uplatnenie v mnohých oblastiach. Hlavnými aplikáciami sú úprava vody na výrobu pitnej vody a čistenie odpadných vôd. Využiť sa môžu na čistenie všetkých druhov vôd, vrátane podzemných, povrchových či odpadných a tiež sa môžu využiť ako predúprava pre desalináciu [33]. Pri odstraňovaní mikropolutantov ako sú pesticídy, herbicídy či insekticídy sa nanofiltrácia využíva v biotechnológii, potravinárskom a farmaceutickom priemysle [35].

2.3.4 Reverzná osmóza

Reverzná osmóza je najpoužívanejšia technológia v úprave vody a desalinizačných technológiách pre produkciu pitnej vody [39]. Ide o proces odstraňovania rozpustených látok z roztoku použitím polopriepustnej membrány pod hydraulickým tlakom. Keď sa na oddelenie vody od koncentrovaného roztoku iónov použije polopriepustná membrána, voda ako rozpúšťadlo ňou môže prechádzať z menej koncentrovaného roztoku do roztoku s väčšou koncentráciou v dôsledku osmózy a vyrovnávať tak koncentráciu na oboch stranách membrány [15]. Osmotický tlak je v takomto prípade rovný rozdielu hladín na oboch stranách membrány. Ak by bol zo strany koncentrovanejšieho roztoku aplikovaný tlak, spôsoboval by spomalenie toku vody zo zriedenejšieho roztoku do koncentrovanejšieho. Ak by sa takýto tlak rovnal osmotickému tlaku, došlo by k zastaveniu toku vody membránou. V prípade, že bude tento tlak ešte väčší ako osmotický tlak, dôjde k obráteniu toku, teda reverznej osmóze, a voda začne pretekať zo strany koncentrovanejšieho roztoku [11].

Použitý tlak závisí na koncentrácii spracovávaného roztoku. Ak ide o spracovanie morskej vody, sú používané tlaky 5,0 až 7,0 MPa, pri brakickej vode sa aplikuje tlak 1,5 až 2,5 MPa a pri zriedených vodách je to okolo 1,0 MPa. Hoc sú možné rôzne konfigurácie systému, prevažuje systém cross-flow, pri ktorom prúdi upravovaná voda pozdĺž membrány. Špirálovo vinuté moduly obsahujú „spacery“, ktoré medzi jednotlivými membránami zaisťujú dostatočné turbulentné prúdenie, aby nedochádzalo k usadzovaniu nečistôt [40].

Konfigurácia systému reverznej osmózy môže významne ovplyvniť rýchlosť a účinnosť záchytu polutantov. Medzi tri základné typy konfigurácie patria jednostupňový, dvojstupňový a viacstupňový systém. Dvojstupňový systém sa využíva, ak cieľovú produkciu permeátu nie je možné dosiahnuť pomocou jedného systému [41]. Výhodou dvojstupňovej reverznej osmózy možnosť použitia rôznych typov modulov v oboch stupňoch, v závislosti od požadovanej kvality upravovanej vody sa dajú v druhom stupni použiť moduly s vyšším odstránením solí. Keďže koncentrát z druhého stupňa je zavádzaný do vstupu, nedochádza k stratám vody. Dvojstupňový systém sa využíva hlavne pri príprave ultračistej vody pre mikroelektroniku. Súčasťou každej reverznej osmózy sú jemné filtre, ktorých úlohou je ochrana pred prípadným prienikom suspendovaných látok z predúpravy. Veľkosť pórov jemných filtrov je v rozmedzí 2 až 5 μm [40].

Hlavnou výhodou reverznej osmózy je prakticky neprerušovaná prevádzka zariadenia pričom kvalita vyprodukovanej vody je konštantná. Tento proces nie je ekologicky závadný, jeho automatizácia je relatívne jednoduchá, nároky na obsluhu a údržbu sú minimálne a v neposlednom rade sú prevádzkové náklady nízke [12].

Viacmocné ióny (Ca^{2+} , Mg^{2+}) sú v porovnaní s jednomocnými iónmi (Na^+) membránou viac zadržované. Naopak, nerozpustené či slabo disociované látky prechádzajú membránou ľahšie. Zadržávanie slabých kyselín a slabých zásad je výrazne závislé na pH – v prípade ionizovaných zlúčenín je vysoké, naopak, ľahšie prechádzajú membránou neionizované zlúčeniny [29].

Pre reverznú osmózu sa využívajú dva typy membrán a to asymetrické vyrábané z rovnakého polyméru, ktoré sa ale vyrábajú podstatne menej ako druhý typ membrán – membrány viacvrstvé (kompozitné). U nich je selektívna vrstva z iného polyméru ako mikroporézna vrstva. Membrány pre reverznú osmózu so selektívnou vrstvou z aromatického polyamidu sa dajú použiť v širokom rozsahu pH a to 2 – 11, krátkodobo je tento rozsah ešte väčší (1 – 13). Vydržia aj teploty do 45 °C. Na druhú stranu, oxidačné činidlá ako chlórany, peroxidy či chlór rýchlo túto selektívnu vrstvu ničia, pri práci s chlórovanou vodou je teda nevyhnutná jej predúprava. Dobré membrány pre reverznú osmózu zachytávajú až 99,7 % NaCl a 99,9 % MgSO_4 [12].

Reverzná osmóza má v praxi mnoho možností využitia, najdôležitejším je nesporne odsolovanie morskej a brakickej vody. Veľký význam má tiež pri produkcii ultračistej vody, ktorá sa používa pri výrobe polovodičov. Využiť sa dá aj na zakoncentrovanie potravinárskych produktov [12].

2.3.5 Ostatné membránové procesy

Okrem membránových procesov, ktorých hnacou silou je rozdiel tlakov, existujú aj ďalšie membránové procesy využívajúce ako hnaciu silu elektrické pole, rozdiel koncentrácií alebo rozdiel teplôt.

- **Elektrodialýza** je separačným procesom využívajúcim iónovo-výmenné membrány pod pôsobením elektrického poľa na oddelenie iónov z vodných roztokov. Iónovo-výmenné komerčné membrány sú filmy ionexových živíc s hrúbkami medzi 0,1 a 1,5 mm [22]. Procesy elektrodialýzy možno rozdeliť podľa žiadaného výsledného produktu na koncentračné a desalinačné. V prvom prípade je cieľ získať čo najvyššiu koncentráciu daných solí, napríklad pri výrobe soli z morskej vody. Hlavným produktom desalinačných, teda odsolovacích procesov je diluát a využívajú sa hlavne na výrobu pitnej vody z brakických vôd. Ide o zmiešané riečne a morské vody, spravidla v ústí rieky do mora, vo všeobecnosti ide o vodu so salinitou 500 – 30 000 ppm [24]. V tejto sfére elektrodialýza konkuruje reverznej osmóze, pričom ekonomickú výhodosť vybranej technológie je nutné posúdiť individuálne. Vo všeobecnosti platí, že vody s nižším obsahom solí je vhodnejšie spracovať využitím elektrodialýzy a naopak pre vody s vyšším obsahom solí je výhodnejšia reverzná osmóza [11].
- **Pervaporáciou** sa delia zmesi kvapalných zložiek tak, že zmes zahriata na vyššiu teplotu, ktorá však nesmie presahovať teplotu varu pri danom tlaku, sa privádza na vstupnú stranu membrány, v ktorej sa zložky zmesi rozpúšťajú, difundujú ňou a na permeátovej strane sa odparujú. Z toho vyplýva že permeát modul opúšťa v plynnom skupenstve [18]. Na pervaporáciu sa využívajú ako symetrické, tak asymetrické membrány a tento proces nachádza využitie v koncentracii a separácii malých organických rozpustných látok [22].
- **Dialýza** je membránovým procesom, ktorého hnacou silou je koncentračný gradient na oboch stranách membrány. Separácia je podmienená rozdielnou rozpustnosťou a rozdielnymi difúznymi koeficientami jednotlivých zložiek v membráne [25].

2.3.6 Využitie membránových technológií v praxi

Všetky membránové technológie s tlakovým gradientom nachádzajú využitie v širokej škále aplikácii. V závislosti od veľkosti častíc, ktoré majú byť zo vstupnej suroviny odstránené, je možné aplikovať konkrétny druh procesu vo farmaceutickom, kozmetickom, elektrochemickom, energetickom, potravinárskom či mliekarenskom priemysle. Široké uplatnenie nájdeme v úprave odpadných vôd, zvlášť v spracovaní odpadných vôd v špeciálnych chemických technológiách. Membránové technológie sa využívajú aj pri zmäkčovaní vody, odsolovaní produktov a medziproduktov v chemickom priemysle, čistení rozpúšťadiel a veľký význam majú aj pri odsolovaní morskej a brakickej vody [12].

Podrobnejšie aplikácie membránových technológií s tlakovým gradientom sú opísané v konkrétnych podkapitolách venovaných jednotlivým membránovým technológiám.

V Českej republike sa membránové technológie uplatňujú hlavne pri spracovaní vôd, a to buď pri príprave pitných či iných špeciálnych vôd (ultračistej alebo demineralizovanej vody) alebo pri spracovaní odpadných vôd. Okrem toho sa membránové technológie, konkrétne ultrafiltrácia, uplatňuje aj v automobilovom priemysle pri rekuperácii zložiek lakovacích kúpeľov. Svoje miesto má ultrafiltrácia aj v potravinárskom, resp. mliekarenskom priemysle, kde sa veľká pozornosť venuje spracovaniu srvátky a opätovnému využitiu nutrične významných zložiek, ktoré sú v nej obsiahnuté. Ako príklad možno spomenúť spoluprácu medzi Výzkumným ústavom mlékárenským, s.r.o., a Bohušovickou mlékárnou, a.s., ktorá sa zameriava na využitie koncentráту srvátkových bielkovín pri výrobe jogurtov a tvarohov. Tlakové membránové procesy sa okrem spomínaného využívajú aj v mliekarni Olešnice či v spoločnostiach InterlactoGroup, s.r.o., a MoraviaLacto, a.s. Membránové procesy sa aplikujú taktiež v pivovarníctve, konkrétne ich využívajú napríklad pivovary Prazdroj, a.s., Svijany, a.s. či Bernard, s.r.o. Membránové technológie sa využívajú taktiež vo farmaceutickom priemysle, príkladom čoho je spoločnosť Lonza Biotec sídliaca v obci Kouřim [42].

2.4 Prevádzkovanie komerčných bazénov

Ľudstvo odpradávná využíva vodu na zabezpečenie telesnej hygieny. Voda však môže byť využitá aj na športovo – rekreačné účely a vďaka niektorým účinkom vody môže pôsobiť taktiež liečebne. Horizontálna poloha pri plávaní uľahčuje prietok krvi a vďaka nadľahčeniu je pohybový aparát menej namáhaný. Na organizmus vplyva aj samotná teplota vody. Mierna teplota uvoľňuje sťahy a tlmí bolesť, naopak vlažné až chladné kúpele sa uplatňujú pri funkčných nervových poruchách. Vo vodnom prostredí majú avšak ideálne podmienky na svoj rozvoj, ktorý rastie so stúpajúcou teplotou, mikroorganizmy. Tie sa vďaka vodnému prostrediu môžu dostať aj na neobvyklé miesta ako napríklad ženské pohlavné ústrojenstvo [43].

Nečistoty sa do bazénovej vody dostávajú prostredníctvom kúpajúcich sa osôb ale aj vetrom či dažďom z atmosféry [44]. Vo všeobecnosti platí, že čím plytšia je voda, tým na meter kubický pripadá viac kúpajúcich sa osôb. Taktiež treba mať na pamäti, že vonkajšie bazény majú väčšie povrchové znečistenie ako tie vnútorné [45]. Na odstránenie alebo redukciu týchto nečistôt na akceptovateľné limity sa používajú rôzne technologické postupy, pričom sú vynaložené značné finančné náklady. Suspendované tuhé častice zanesené do bazénových vôd vetrom sú zvyčajne prach a sadze, ľahko sa dajú odstrániť filtráciou. Ďalšími bežnými nečistotami v bazénových vodách sú listy, riasy, hmyz, odumretá pokožka, zvyšky kozmetických olejov a krémov, vlasy či vlákna [44].

2.4.1 Úprava bazénovej vody

Technologický postup úpravy bazénovej vody zahŕňa mechanické predčistenie, odstránenie zákalu, prípadne pachu, korekciu pH, dezinfekciu a zabezpečenie proti riasam [43]. Postup je graficky znázornený na obrázku č. 7.

Na ochranu cirkulačných čerpadiel pred poškodením mechanickými nečistotami slúžia lapače hrubých mechanických nečistôt, ktoré môžu byť súčasťou bazénových čerpadiel.

Filtráciou sa znižuje CHSK a taktiež zákal vody a prostredníctvom nej sa zachytáva aj časť mikrobiologického znečistenia [43]. Ako náplň filtrov sa štandardne používa piesok, no stretáme sa aj s inými filtračnými materiálmi ako sú aktívne uhlie, sklenené granule či zeolitické materiály. Aktívne uhlie sa používa na odstraňovanie viazaného chlóru alebo v prípade ozonizácie bazénovej vody. Sklenené alebo zeolitické materiály majú v porovnaní s kremičitým pieskom vyššiu záchytnú schopnosť, navyše pomocou zeolitov je možné z vody odstraňovať iónovou výmenou aj amónne ióny [46].

kanalizácie. Procesy koagulácie a tlakovej filtrácie predstavujú základný nástroj udržiavania požadovaných fyzikálno-chemických parametrov bazénovej vody. Na zachovanie vlastností filtračných lôžok je potrebný ich pravidelný preplach vodou alebo prúdom vzduchu v smere opačnom smeru prúdenia vody počas štandardného procesu filtrácie. Odpadová voda z tohto procesu, teda spätný preplach, sa vyznačuje veľkým množstvom suspendovaných a rozpustených častíc. Obzvlášť problematické z pohľadu recirkulácie spätného preplachu sú vedľajšie produkty dezinfekcie a kontaminantov prítomných v chemikáliách používaných v procese koagulácie, kvôli ktorým môže mať spätný preplach toxický charakter [47]. Na úpravu pracích vôd je možné spoľahlivo využiť membránové technológie [48].

2.4.3 Ekonomický aspekt recyklácie pracích vôd

Zámerom recyklácie je umožnenie opätovného použitia vody po preplachu pieskových filtrov, čo má za následok nielen zníženie spotreby samotnej vody, ale aj nákladov na ohrev a na dávkovanie chemikálii. Demonštrácia nákladov a návratnosti investície bude ilustrovaná na prípadovej štúdii realizovanej spoločnosťou ASIO, spol s.r.o. [49].

Príkladom využitia membránových technológií pri recyklácii pracích vôd je pilotná jednotka zostavená zo štandardných komponentov a blokov, pozostávajúca z akumulácie vody z prania filtrov, jednotky membránovej separácie č. 1, akumulácie vody, jednotky membránovej separácie č. 2 a spoločnou čerpacou stanicou pre všetky vody s odčerpávaním do kanalizácie [49].

Návratnosť uvedenej pilotnej jednotky sa pohybuje okolo 65 %, teda z každého 1 m³ vstupnej vody sa získa 0,65 m³ vyčistenej vody s teplotou pohybujúcou sa medzi 26 – 30 °C, teda z každých 10 m³ vody z pieskových filtrov je možné získať 6,5 m³ permeátu. Túto vyčistenú vodu je možné vrátiť priamo do bazéna a ušetriť tak 16,5 kWh, teda energiu potrebnú k ohriatiu 6,5 m³ vody [49].

Investičné náklady pri realizácii takejto jednotky sa pohybujú okolo 4,5 mil. Kč. Náklady na prevádzku uvedenej technológie zahrňujú príkon stanice, hodinu práce údržbárov denne a použité chemikálie. Pri recyklácii 60 m³ vody denne tak táto technológia šetrí okolo 7 000 Kč – rozdiel medzi ušetrenými nákladmi na dopúšťanie vody a jej ohrev a nákladmi na prevádzku [49].

2.5 Legislatívne predpisy na kvalitu bazénovej vody

Hygienické požiadavky kladené na bazénové vody upravuje vyhláška č. 568/2020 Sb. zo dňa 17.12.2020, ktorou sa mení vyhláška č. 238/2011 Sb. Pre účely tejto práce budú bližšie rozobraté len tie časti vyhlášky, ktoré s ňou priamo súvisia [50].

Kľúčová pre recykláciu pracích vôd z pieskových filtrov je okrem ukazovateľov kvality upravenej vody na vstupe do bazéna aj intenzita recirkulácie vody v bazénoch. Intenzita recirkulácie vody v bazénoch sa pre plavecké a kúpeľové bazény líši. Pre plavecké bazény je recirkulované množstvo vody v $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ orientačne určené podielom objemu bazéna a teoretickou dobou zdržania vody. Upresňuje sa výpočtom, ktorý zahrňuje návštevnosť, účel bazénu a požadovanú kvalitu vody ale aj technologické a prevádzkové parametre recirkulačnej úpravne vody. Ak nie je intenzita recirkulácie upresnená preukázateľným a kontrolovateľným výpočtom, tak potom platia ako hodnoty limitné hodnoty uvedené v tabuľke tab. 2. Pri bazénoch s vodnými atrakciami je nutné zvýšenie intenzity recirkulácie s ohľadom na úbytky aktívneho chlóru v bazénovej vode jeho únikom do ovzdušia [50].

Tab. 2 Stanovenie intenzity recirkulácie vody pre plavecké bazény [50]

Hĺbka v bazéne v metroch	Doba výmeny vody (zdržanie vody) v hodinách	
	v krytých bazénoch	v nekrytom bazéne
0,5	2,0	2,0
1,0	3,0	3,5
2,0	5,0	8,0
3,0	6,0	8,0
3,5	6,5	8,0
4,0	7,0	8,0

V prípade kúpeľových bazénov sa nastavuje intenzita recirkulácie podľa aktuálnej potreby. Prefiltrovanie alebo výmena celého objemu vody sa pri bazéne s objemom do 5 m^3 (vrátane) je nutné vykonať najmenej raz za 15 minút a pri bazénoch s objemom od 5 do 10 m^3 aspoň raz za 45 minút. Intenzita recirkulácie vody pre bazény s objemom väčším ako je 10 m^3 sa stanoví výpočtom, výmena alebo prefiltrácia vody musí však prebehnúť najmenej jedenkrát za dve hodiny [46].

Požiadavky na mikrobiologické a fyzikálno-chemické ukazovatele kvality vôd v umelých kúpaliskách sú uvedené v prílohe č. 8. k Vyhláške č. 568/2020 Sb. Limity týkajúce sa upravenej vody na prítoku do bazéna sú uvedené v tab. 3 [50].

Tab. 3 Medzné hodnoty ukazovateľov kvality upravenej vody na prítoku do bazéna [50]

Ukazovateľ	Jednotka	Upravená voda na prítoku do bazéna Medzná hodnota
<i>Escherichia coli</i>	KTJ·100 ml ⁻¹	0
Počet kolónií pri 36°C	KTJ·1 ml ⁻¹	20
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	KTJ·100 ml ⁻¹	0
<i>Staphylococcus aureus</i>	KTJ·100 ml ⁻¹	0
<i>Legionella spp.</i>	KTJ·100 ml ⁻¹	10
Priehľadnosť		
Zákal	ZF	
pH		
Celkový organický uhlík	mg·l ⁻¹	
Voľný chlór	mg·l ⁻¹	
Viazaný chlór	mg·l ⁻¹	
Chloritany, chlorečnany	mg·l ⁻¹	
Ozón	mg·l ⁻¹	≤ 0,05
Redox- potenciál		
-v rozsahu pH 6,5-7,3	mV	≥ 750
- v rozsahu pH 7,3-7,6		≥ 770

3 CIELE PRÁCE

1. Spracovanie literárnej rešerše na tému membránové technológie s využitím na úpravu bazénových vôd.
2. Stanovenie relevantných parametrov vzoriek bazénovej vody na poloprevádzkovej jednotke so zaradením membránového systému.
3. Na základe nameraných výsledkov overenie vhodnosti zaradenej membránovej jednotky na recykláciu pracích vôd z pieskových filtrov.
4. Zhrnutie dosiahnutých výsledkov.

4 EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

4.1 Použité chemikálie, prístroje a ďalšie vybavenie

Chemikálie:

- Destilovaná voda, FCH VUT
- Kyselina sírová ($c = 2 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$), p.a., PENTA s.r.o., ČR
- Kyselina šŕaveľová ($c = 5 \text{ mmol} \cdot \text{l}^{-1}$), p.a. LACHEMA, a.s., ČR
- Manganistan draselný ($c = 2 \text{ mmol} \cdot \text{l}^{-1}$), p.a., PENTA s.r.o., ČR
- Chlorid amónny, p.a., PENTA s.r.o., ČR
- Amoniak ($c = 13 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$), p.a., PENTA s.r.o., ČR
- EDTA ($c = 10 \text{ mmol} \cdot \text{l}^{-1}$), p.a. LACHEMA, a.s., ČR
- Kyselina chlorovodíková ($c = 2 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$), p. a. LACHEMA, a.s., ČR
- Čerň eriochromová, p. a. LACHEMA, a.s., ČR
- Mäsopeptonový agar, Nutrient Agar No. 2, HiMedia Laboratories
- Chromocult® Coliform Agar, Merck spol. s.r.o., ČR

Prístroje a pomôcky:

- Analytické váhy
- Bežné laboratórne sklo
- Petriho misky plastové s priemerom 90 mm
- Kremenná kyveta s optickou dráhou 1 cm
- Skúmavky s uzáverom
- Sklenený filter GF/C™, Merck spol. s.r.o., ČR
- Výhrevné teleso
- pH meter, Oakton, USA
- Konduktometer ECTestr 11+ multi-range, Oakton, USA
- Spektrofotometer Hach Lange DR 5000™, USA
- Autokláv – Vaposteri BMT, Brno
- Termostat, Biotech Praha
- Sensititre™ Nephelometer, Thermo Fisher Scientific, USA
- Fotometer Spectroquant® NOVA 60, Merck spol. s.r.o., ČR
- Súprava Spectroquant® pre stanovenie amónnych iónov, Merck spol. s.r.o., ČR
- Súprava Spectroquant® pre stanovenie dusičnanov, Merck spol. s.r.o., ČR
- Súprava Spectroquant® pre stanovenie voľného chlóru, Merck spol. s.r.o., ČR

4.2 Popis nastavených parametrov

4.2.1 Popis technológie systému recyklácie

Technológia na recykláciu bazénových vôd je založená na procesoch ultrafiltrácie a reverznej osmóze, ktoré sú doplnené o systémy predúpravy vody. Celý systém je uložený v suteréne v blízkosti pieskovej filtrácie [51].

Voda z prania filtrov sa privádza do akumuláčnej nádrže č. 1. Tá je vybavená systémom plavákových spínačov pre stráženie hladín – pracovnej, maximálnej a minimálnej a taktiež havarijným prepacom do kanalizácie [51].

Z akumuláčnej nádrže č. 1 sa pre recykláciu čerpá voda horizontálnym čerpadlom P01 na objekt automatického diskového filtra, ktorý zabezpečuje ochranu technológie pred možným vtokom väčších nerozpustných látok. Z diskových filtrov voda pokračuje na filter s aktívnym uhlím, ktorého regenerácia je automatizovaná. Cez filter s aktívnym uhlím je voda tlakovo vedená na plne automatickú ultrafiltračnú jednotku AS – MEMBR UF 160 [51].

Jednotka je vybavená ultrafiltračným modulom, ktorý obsahuje hydrofilné membrány typu multikanálových dutých vlákien s 20 nm pórmí a priemerom vlákna 0,9 mm, pre separáciu nerozpustných a koloidných látok. Membránový modul je prevádzkovaný v konfigurácii „inside – out“, kde je surová voda privádzaná dovnútra vlákien a filtrovaná voda prechádza z vlákien do priestoru medzi vláknami. Membrána je spätne preplachovaná čerpaním filtrovanej vody čerpadlom PUF2 v opačnom smere, teda z vonkajšej strany vlákien dovnútra. Jednotka je dodávaná s nádržou pre akumuláciu vody (akumulačná nádrž č. 2), ktorá sa využíva pre spätný preplach. Jednotka zároveň pracuje v kooperácii s podávacím čerpadlom P01 surovej vody a čerpadlom P02 predupravenej vody na systém reverznej osmózy [51].

Voda z ultrafiltrácie je vedená do akumuláčnej nádrže č. 3, odkiaľ je čerpaná na systém reverznej osmózy AS – MEMBR RO. Následne sa voda doupravuje roztokom NaOH na pH nad 6,5 a je dochlorovaná roztokom NaClO. Reakcia prebieha v akumuláčnej reakčnej nádrži RAN. Po prechode cez RAN je voda vedená cez vodomer do akumuláčnej nádrže. Odpadové vetvy ústia do kanalizácie. Hlavné technológie sú bypassované [51].

Fotografie membránovej jednotky spolu s technologickou schémou prevádzky sú uvedené v prílohe A a B tejto práce.

4.2.2 Technické parametre membrán a nastavenia jednotky

Pri jednotke AS MEMBR UF 160 sa využíva membrána Multibore®, vyvinutá nemeckou spoločnosťou Inge GmbH, ktorá je súčasťou koncernu BASF [51]. Vlastnosti a parametre použitej membrány sú zhrnuté v tabuľke nižšie.

Tab. 4 Parametre membrány Multibore® v ultrafiltračnej jednotke [52]

Parameter	Hodnota
Veľkosť pórov	0,02 μm
Materiál	Modifikovaný polyétersulfón (PESm)
Povrchový náboj	záporný
Povaha povrchu	hydrofilná
Vnútorň priemer	0,9 mm
Vonkajší priemer	4,00 mm
Efektívna dĺžka	1 720 mm
Konfigurácia	Inside - Out
Teplotná tolerancia	0 °C – 40 °C
Tolerancia pH	1-13
Filtračná plocha	70 m ²
Počet vlákien	2 210

V systéme reverznej osmózy sú zaradené 4 membrány Low-Pressure TORAY TMG10D. Vlastnosti a parametre použitej membrány sú uvedené v tabuľke č .5.

Tab. 5 Parametre membrány TMG10D v jednotke reverznej osmózy [53]

Parameter	Hodnota
Povrch membrány	8 m ²
Priemerný záchyt soli	99,7 %
Minimálny záchyt soli	99,5 %
Prietok produktu	10 m ³ ·d ⁻¹
Minimálny prietok produktu	8 m ³ ·d ⁻¹
Maximálny operačný tlak	4,1 MPa
Maximálna teplota vstupnej vody	45 °C

Dĺžka membrány	40''
Priemer membrány	4''
Koncentrácia chlóru v napájacej vode	<0,1 ppm
pH napájacej vody pri kontinuálnej prevádzke	2-11
pH napájacej vody pri chemickom čistení	1-13
Maximum hodnota SDI ₁₅ vo vstupnej vode	5

4.2.3 Základné priemerné parametre vstupnej vody do systému recyklácie

Pri dimenzovaní membránového systému sa vychádzalo z parametrov vstupnej vody, ktoré sú uvedené v tabuľke č. 6.

Tab. 6 Základné priemerné parametre vstupnej vody do systém u recyklácie

Parameter	Hodnota	Jednotka
Mikroorganizmy kult. pri 22 °C	3	KTJ·l ⁻¹
Mikroorganizmy kultivované pri 36 °C	6	KTJ·l ⁻¹
<i>Escherichia coli</i>	0	KTJ·100 ml ⁻¹
Koliformné baktérie	0	KTJ·100 ml ⁻¹
enterokoky	0	KTJ·100 ml ⁻¹
Farba	11	mg·l ⁻¹ Pt
Elektrická konduktivita (25 °C)	53,8	mS·m ⁻¹
Hodnota pH	6,99	-
Zákal	19,3	FNU
Tvrdosť	1,932	mmol·l ⁻¹
Voľný chlór	0,08	mg·l ⁻¹
CHSK _{Mn}	15	mg·l ⁻¹
NL ₁₀₅	20	mg·l ⁻¹
NH ₄ ⁺	9,28	mg·l ⁻¹

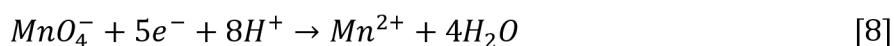
4.3 Postupy a metódy

4.3.1 Chemická spotreba kyslíku manganistanom

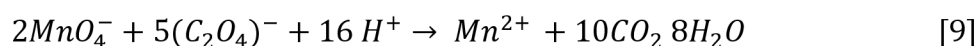
4.3.1.1 Podstata skúšky

Okyslená vzorka sa privedie do varu a zahrieva po dobu presne 10 minút s daným množstvom odmerného roztoku manganistanu draselného. Časť manganistanu sa redukuje prítomnými oxidovateľnými látkami vo vzorke. Po prídavku kyseliny šťaveľovej sa stanoví spotreba manganistanu titráciou prebytku šťaveľanu odmerným roztokom manganistanu.

Oxidácia oxidovateľných látok vo vzorke prebieha podľa rovnice [8].



Reakcia spätnej titrácie je zapísaná v rovnici [9].



4.3.1.2 Pracovný postup

Stanovenie bolo vykonané v súlade s ČSN EN ISO 8467: Jakost vod – Stanovení spotřeby kyslíku manganistanem (CHSK_{Mn}) [54].

Do varnej banky boli vložené varné guľičky a následne sa odmeralo 100 ml vzorky. Pridalo sa 5 ml 2 M kyseliny sírovej a 20 ml 0,002 M roztoku manganistanu draselného. Zmes sa priviedla do varu a varila sa po dobu presne 10 minút. Po jednom orientačnom stanovení sa uskutočnili 4 presné merania. Zo spotrieb titračného činidla sa vypočítala CHSK_{Mn} podľa rovnice:

$$X = \frac{(a - b) \cdot 80}{V} \quad [10]$$

Kde X je oxidovateľnosť manganistanu v $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$, a je spotreba manganistanu draselného pri titrácii vzorky v ml, b je spotreba manganistanu draselného pri slepom stanovení v ml a V je

objem vzorky v ml. Keďže pri titrovaní vzoriek vstupnej vody presiahla spotreba manganistanu draselného 12 ml, bolo nutné vzorky nariediť.

4.3.2 Kultivovateľné mikroorganizmy

4.3.2.1 Podstata skúšky

Ide o kultivačné stanovenie, pri ktorom bol na živné médium v Petriho miske inokulovaný odmerný objem vzorky. Následne sa sada misiek nechala kultivovať pri teplote 22 °C a 36 °C po dobu 48 hodín. Po tejto dobe sa počítajú narastené kolónie.

4.3.2.2 Pracovný postup

Stanovenie bolo vykonané v súlade s ČSN EN ISO 6222: Jakost vod – Stanovení kultivovatelných mikroorganizmů – Stanovení počtu kolonií očkovaním do živného agarového kultivačního média a ČSN EN ISO 8199: Jakost vod – Obecný návod pro stanovení mikroorganizmů kultivačními metodami [56],[57].

Stanovenie prebehlo v súčinnosti s Ústavom chemie potravín a biotechnológií FCH.

4.3.3 Stanovenie nerozpustných látok

4.3.3.1 Podstata skúšky

Vzorka sa filtruje filtrom zo sklenených vlákien za podtlaku. Následne sa filter vysuší pri teplote 105 °C ± 2 °C. Hmotnosť látok, ktoré sa zadržali na filtri, sa stanoví zvážením.

4.3.3.2 Pracovný postup

Stanovenie bolo vykonané v súlade s ČSN EN 872: Jakost vod – Stanovení nerozpuštěných látek – Metoda filtrace filtrem ze skleněných vláken [57].

Vzorky boli vytemperované na teplotu laboratória. Po zvážení filtru na analytických váhach sa tento umiestnil do filtračného zariadenia hladkou plochou dolu a zariadenie bolo pripojené ku zdroju podtlaku. Vzorka sa vo vzorkovnici dôkladne pretrepala a zvolený objem bol naraz preliaty do odmerného valca. Následne bola vzorka prefiltrovaná a odmerný valec bol vypláchnutý destilovanou vodou, pričom táto dávka bola použitá k prepláchnutiu filtra. Po ukončení filtrácie bol filtračný papier pomocou pinzety s plochými okrajmi opatrne vybratý z filtračného zariadenia, umiestnený na sklenenú podložku a tak uložený do sušiarne. Sušenie

prebiehalo pri teplote 105 °C po dobu 2 hodín. Následne bol filter vytiahnutý zo sušiarne, ponechaný v blízkosti váh do ustálenia rovnováhy s vlhkosťou vzduchu a bol zvážený.

4.3.4 Stanovenie tvrdosti vody

4.3.4.1 Podstata skúšky

Podstatou skúšky je komplexometrická titrácia vápnika a horčíka roztokom disodnej soli EDTA pri hodnote pH 10. Ako indikátor slúži sodná soľ Eriochromčerne T. Tá v prítomnosti vápenatých a horečnatých iónov vytvára tmavo červené až fialové zafarbenie.

EDTA reaguje počas titrácie najprv s voľnými kationmi vápnika a horčíka. V bode ekvivalencie reaguje s iónmi vápnika a horčíka viazanými indikátorom. Po uvoľnení indikátora dochádza ku zafarbeniu titrovaného roztoku do modra.

4.3.4.2 Pracovný postup

Stanovenie bolo vykonané v súlade s ČSN ISO 6059: Jakost vod: Stanovení sumy vápniku a horčíku Odměrná metoda s EDTA [58].

Do titračnej banky sa odpipetovalo 100 ml vzorky. K vzorke sa pridal roztok kyseliny chlorovodíkovej v množstve odpovedajúcej KNK_{4,5} danej vzorky. Následne sa pridal 10 ml tlmivého roztoku o hodnote pH 10. Po premiešaní bol pridaný tuhý indikátor Eriochromovej černej T, a to tak, aby sa roztok zafarbil do výraznej červenej farby. Na titráciu bol použitý 0,05 M roztok Chelatonu 3, pričom sa titrovalo do modrého sfarbenia. Po jednom orientačnom stanovení sa uskutočnili 4 presné merania. Zo spotrieb titračného činidla sa stanovil celkový obsah kationov Ca²⁺ a Mg²⁺ podľa rovnice:

$$c_{Ca+Mg} = \frac{c_1 \cdot V_3}{V_0} \quad [11]$$

kde c_1 je koncentrácia roztoku EDTA [$\text{mmol} \cdot \text{l}^{-1}$], V_3 je spotreba roztoku EDTA pri titrácii [ml] a V_0 je skúšobný objem vzorky [ml].

4.3.5 Stanovenie zákalu

4.3.5.1 Podstata skúšky

Pri prechode svetelného žiarenia roztokom dochádza rozptylu žiarenia na jeho časticiach a v dôsledku čoho sa znižuje intenzita žiarenia v smere jeho šírenia. Meria sa rozptýlené žiarenie, teda svetelný lúč pod určitým konštantným uhlom, ktorý najčastejšie predstavuje 90° [59].

4.3.5.2 Prístroj

Použitý nefelometer musí spĺňať nasledovné požiadavky:

- a) vstupná šírka spektrálneho pásu dopadajúceho na žiarenie musí byť v rozmedzí 830 nm až 890 nm;
- b) vstupné žiarenie musí byť rovnobežné a akákoľvek zbiehavosť nesmie prekročiť $1,5^\circ$;
- c) merací uhol, θ , zvieraný optickými osami dopadajúceho a rozptýleného žiarenia, musí byť $90^\circ \pm 2,5^\circ$;
- d) apertúrny uhol, Ω_0 , má byť vo vzorke vody medzi 20° až 30° .

4.3.5.3 Pracovný postup

Stanovenie bolo vykonané v súlade s ČSN EN ISO 7027: Jakost vod – Stanovení zákalu [60]. Zákal sa zmeral v dobre premiešanej vzorke. Hodnota zákalu sa zistila z pripravenej kalibračnej krivky.

Toto stanovenie prebehlo v externom akreditovanom laboratóriu.

4.3.6 Stanovenie celkového organického uhlíka

4.3.6.1 Podstata skúšky

Pôsobením vhodného oxidačného činidla, ultrafialového alebo ktoréhokoľvek iného vysoko energetického žiarenia či tepelným rozkladom sa organický uhlík vo vode oxiduje na oxid uhličitý. Vzniknutý oxid uhličitý oxidáciou sa stanoví priamo alebo po redukcii. Konečné stanovenie oxidu uhličitého sa môže vykonať rôznymi postupmi napríklad tepelnou konduktivitou, konduktometricky, spektrofotometricky v infračervenej oblasti svetla, odmerne čo coulometricky.

4.3.6.2 Pracovný postup

Stanovenie bolo vykonané v súlade s ČSN EN 1484 Jakost vod - Stanovení celkového organického uhlíku (TOC) a rozpuštěného organického uhlíku (DOC) [61].

Toto stanovenie prebehlo v externom akreditovanom laboratóriu.

4.3.7 Stanovenie farby

4.3.7.1 Podstata skúšky

Sfarbenie vzorky vody je charakterizované meraním svetelného útlmu pomocou spektrofotometra.

4.3.7.2 Pracovný postup

Stanovenie farby bolo vykonané v súlade s ČSN ISO 7887 – Kvalita vod – Stanovení barvy [62].

Spektrofotometer bol nastavený podľa pokynov výrobcu. Vzorka vody bola pred meraním prefiltrovaná filtrom s veľkosťou pórov 0,45 µm a bola prevedená do kyvety spektrofotometra a následne analyzovaná.

4.3.8 Stanovenie redox – potenciálu

Toto stanovenie prebehlo v súlade s Vyhláškou č. 568/2000 Sb. v externom laboratóriu.

4.3.9 Stanovenie voľného chlóru

Stanovenie voľného chlóru prebehlo pomocou kyvetových testov od spoločnosti Merck spol. s r.o., ČR. Postupovalo sa podľa priloženého postupu, kedy sa do skúmavky napipetovalo 5 ml vzorky, 2,5 ml reagentu Cl-1 a následne 0,5 ml reagentu Cl-2. Po uplynutí reakčného času (1 minúta) sa vykonalo meranie vo fotometri.

4.3.10 Stanovenie dusičnanov

Stanovenie dusičnanov prebehlo pomocou kyvetových testov od spoločnosti Merck spol. s r.o., ČR. Postupovalo sa podľa priloženého postupu, kedy sa do suchej skúmavky vysypala jedna mikroyžica reagentu NO₃-1 a následne sa napipetovalo 5 ml reagentu NO₃-2. Po rozpustení reagentu NO₃-1 sa počkalo jednu minútu a veľmi opatrne sa napipetovalo 1,5 ml vzorky. Po uplynutí reakčného času (10 minút) sa vykonalo meranie vo fotometri.

4.3.11 Stanovenie amónnych iónov

Stanovenie NH_4^+ bolo vykonané pomocou kvetových testov od spoločnosti Merck spol. s.r.o., ČR. Postupovalo sa podľa priloženého postupu, kedy sa do skúmavky napipetovalo 5 ml vzorky, pridalo sa 0,6 ml reagentu NH_4 -1 a jedna mikrolyžica reagentu NH_4 -2. Po uplynutí reakčného času (5 minút) sa pridali 4 kvapky reagentu NH_4 -3 a po 5 minútach sa vykonalo meranie vo fotometri.

5 VÝSLEDKY A DISKUSIA

5.1 Stanovenie ukazovateľov kvality vody

Pri vyhodnocovaní jednotlivých parametrov sa vychádzalo nielen z nami nameraných hodnôt, ale tieto boli doplnené už existujúcimi analýzami vody z danej jednotky. Okrem sledovania relevantných ukazovateľov kvality vody daných Vyhláškou č. 568/2000 Sb. boli sledované aj ďalšie technologické parametre. Je to z toho dôvodu, že aplikovaný systém na úpravu vody má za cieľ nielen upraviť vodu pochádzajúcu z prania pieskových filtrov na požadované hodnoty vhodné k jej opätovnému využitiu, ale túto vodu aj zmäkčiť. Tento aspekt prináša z dlhodobého hľadiska prevádzkovateľovi ďalšiu výhodu, keďže vďaka zmäkčenej vode dochádza k minimalizácii zanášania inštalovaných zariadení bazénovej technológie vodným kameňom.

Výsledky jednotlivých meraní sú zaznamenané v prílohe B, v tabuľkách Tab. 1-9.

5.1.1 Parametre dané Vyhláškou č. 568/200 Sb.

5.1.1.1 Stanovenie mikrobiologických parametrov

Z daných mikrobiologických ukazovateľov boli pre účely tejto práce stanovované koliformné baktérie a kultivovateľné mikroorganizmy pri 22 °C a 36 °C. V minulosti bolo realizované aj stanovenie *Escherichia coli* (*E. coli*) s nulovým výsledkom.

V prípade vstupnej vody boli kolónie mikroorganizmov nespočítateľné ako pri kultivácii pri 22 °C, tak aj pri 36 °C, nezávisiac od riedenia.



Obr. 8 Miska s kolóniami kultivovateľných mikroorganizmov vo vstupnej vode bez riedenia

Naopak, vzorky vyčistenej vody dosiahli uspokojivé výsledky. Pri 22 °C iba v jednej zo vzoriek boli pozorované kolónie mikroorganizmov. Pri 36 °C bola priemerná hodnota kolónii v neriedených vzorkách 10 KTJ·1 ml⁻¹, teda výrazne pod limitom stanovený vyhláškou, a síce 20 KTJ·1 ml⁻¹.

Tab.7 Priemerné hodnoty kolónii v permeáte z reverznej osmózy

	Vzorka č.1	Vzorka č. 2	Vzorka č. 3	Vzorka č. 4
Počet kolónii pri 36 °C	9 KTJ·1 ml ⁻¹	15 KTJ·1 ml ⁻¹	12 KTJ·1 ml ⁻¹	4 KTJ·1 ml ⁻¹
Počet kolónii pri 22 °C	0 KTJ·1 ml ⁻¹	24 KTJ·1 ml ⁻¹	0 KTJ·1 ml ⁻¹	0 KTJ·1 ml ⁻¹



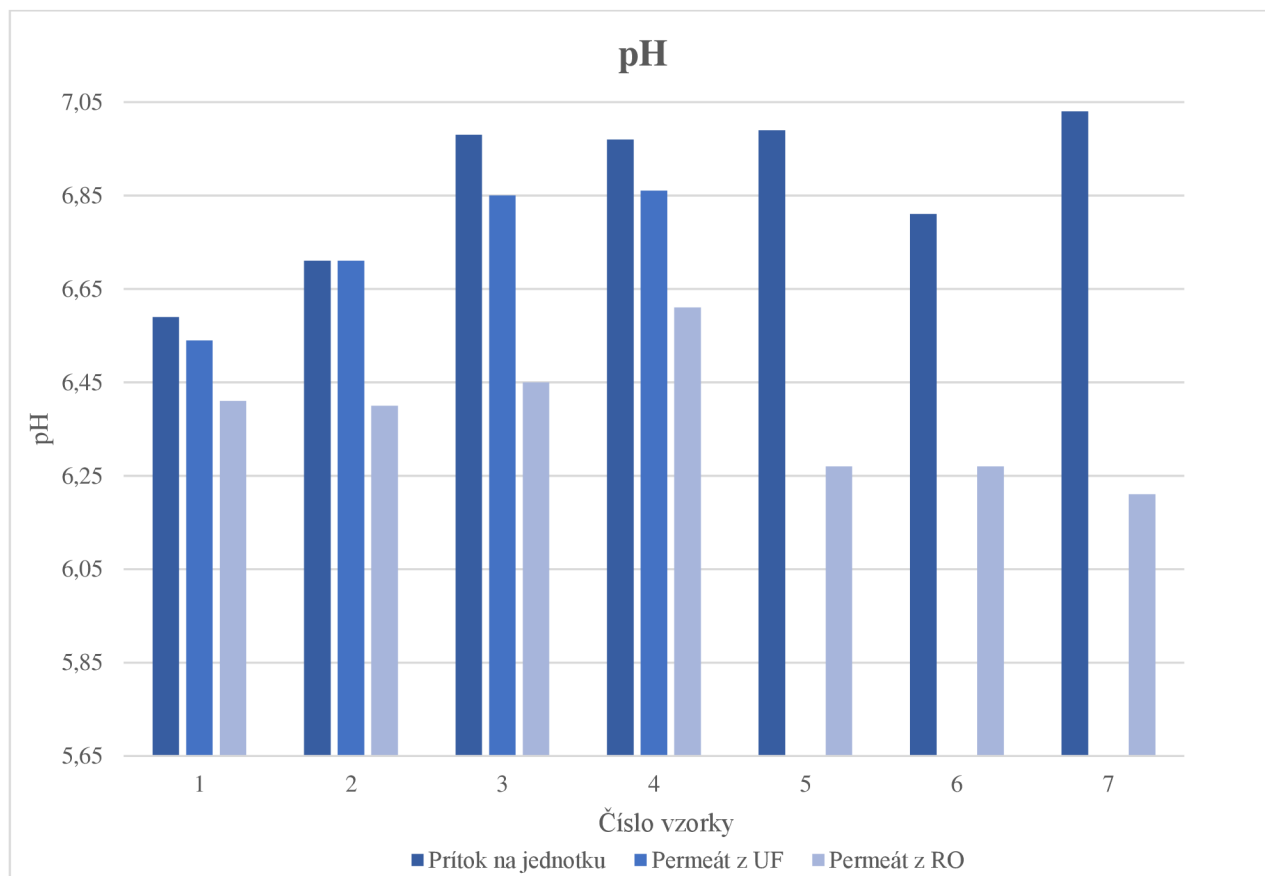
Obr. 9 Miska s kolóniami kultivovateľných mikroorganizmov vo výstupnej vode bez riedenia

Stanovenie koliformných baktérii taktiež dosiahlo uspokojivé výsledky, ktoré sa očakávali. Nebola zistená prítomnosť *E.coli* a taktiež ani iných patogénov.

5.1.1.2 Hodnota pH

Hodnota pH sa radí medzi základné parametre ovplyvňujúce chovanie vody. Podľa očakávania sa hodnota pH po ultrafiltrácii v porovnaní so vstupnom vodou veľmi nelíšila, na druhú stranu po reverznej osmóze došlo k výraznejšiemu poklesu hodnôt.

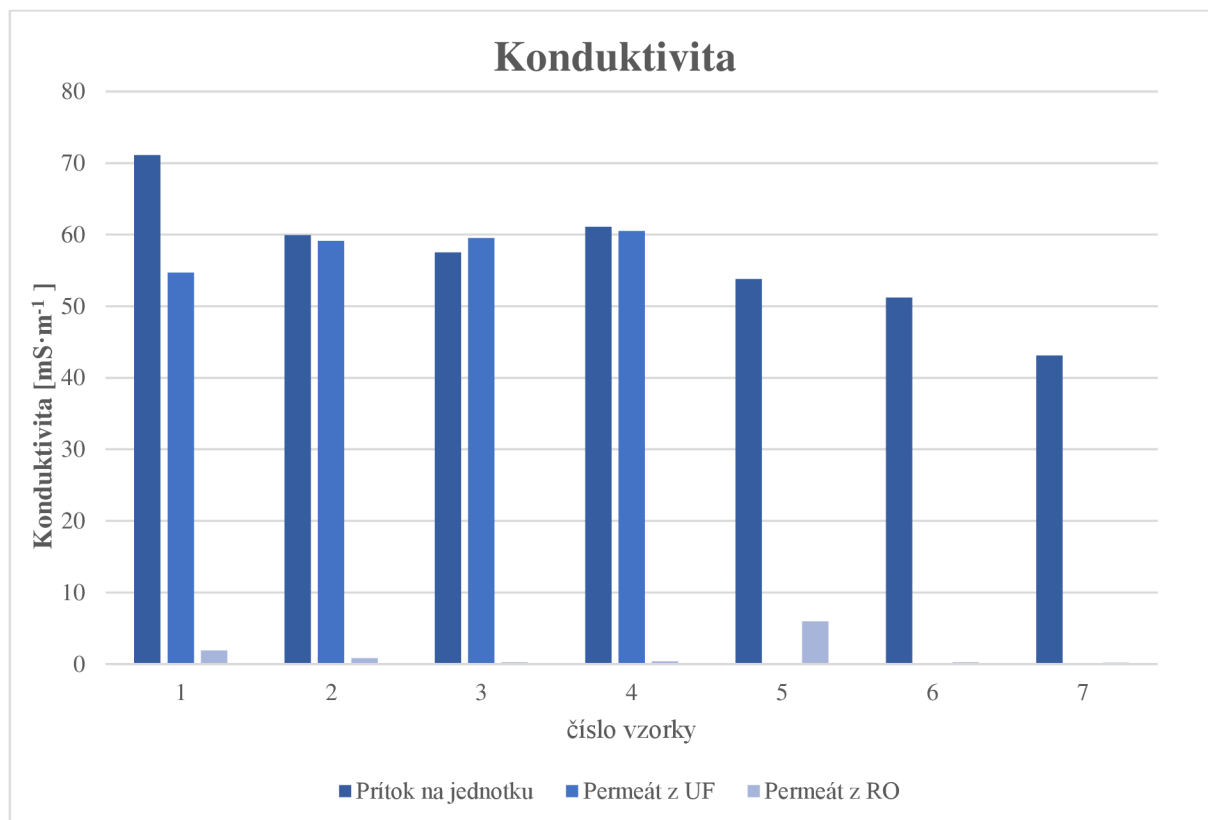
Permeát z reverznej osmózy vo väčšine prípadov vykazuje nižšie hodnoty pH, ako je legislatívne dovolené, dochádza k jeho korekcii za pomoci NaOH na hodnoty nad 6,5.



Graf 1 Stanovenie pH

5.1.1.3 Konduktivita pri 25 °C

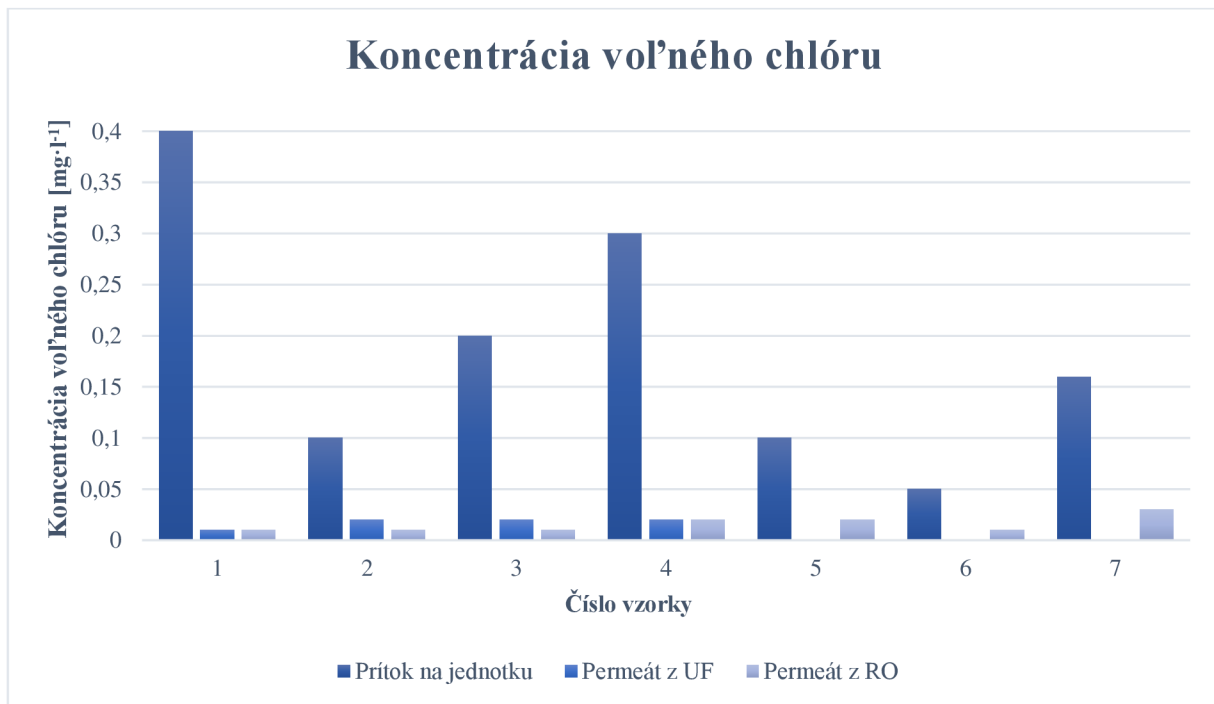
Z grafického zobrazenia nameraných hodnôt je zrejmé, že pri reverznej osmóze dochádza k dramatickému poklesu konduktivity, kedy sa hodnoty výstupnej vody pohybujú rádovo v desatinách $\text{mS} \cdot \text{m}^{-1}$. Tento trend bol očakávaný, keďže väčšina membrán pre reverzné osmózy znižuje konduktivitu o 97 až 99,5 % v dôsledku odstránenia rozpustených látok, ktoré sa na konduktivite podieľajú [63]. V našom prípade priemerný úbytok vodivosti predstavoval 97,58 %.



Graf 2 Stanovenie konduktivity

5.1.1.4 Koncentrácia voľného a viazaného chlóru

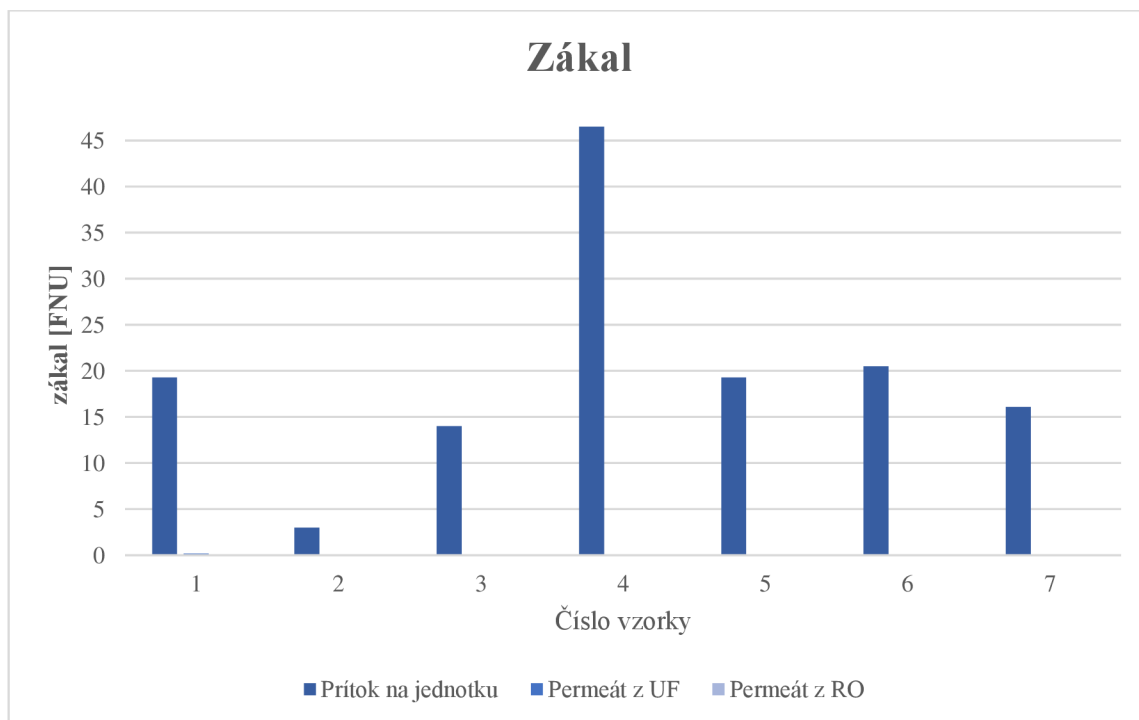
Stanovenie viazaného chlóru sa vykonáva na mieste pri odbere vzorky, pričom sa získa z rozdielu hodnôt celkového chlóru a voľného chlóru. Z tohto dôvodu sa stanovenie viazaného chlóru v súvislosti s touto prácou nerealizovalo, keďže odber vzoriek kvôli pandemickej situácii zabezpečovala externá spoločnosť. Stanovenie voľného chlóru prebehlo pomocou kvetových testov.



Graf 3 Koncentrácia voľného chlóru

5.1.1.5 Zákal

Pri stanovení zákalu v jednotlivých vzorkách možno sledovať rovnaký trend ako pri stanovení nerozpustných látok, teda výrazný pokles už v permeáte z ultrafiltrácie.



Graf 4 Stanovenie zákalu

5.1.1.6 Ozón, chloritany a chlorečnany

Ozón, chloritany ani chlorečnany stanovované neboli. Ozón sa stanovuje len v prípade, že sa používa pri úprave vody, pričom sa meria len na prítoku do bazéna. Podobne je to aj pri chloritanech a chlorečnanech, ktorých suma sa stanovuje v prípade používania oxidu chloričitého k dezinfekcii vody.

5.1.1.7 Redoxný potenciál, celkový organický uhlík a koncentrácia dusičnanov

Ostatné ukazovatele kvality vody, ktoré sa podľa Vyhlášky č. 568/2000 Sb. sledujú, sú celkový organický uhlík, koncentrácia dusičnanov a redoxný potenciál. Menované parametre boli stanovované kvôli aktuálnym podmienkam len dva krát, preto z nich nemožno vyvodit' relevantný záver.

Plniaca voda nesmie mať hodnotu celkového organického uhlíka vyššiu, než je hygienický limit pre pitnú vodu a teda $5 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$, pričom sa odporúča, aby bola táto hodnota čo najnižšia. Výstupná voda mala priemernú hodnotu TOC nižšiu ako $1 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$.

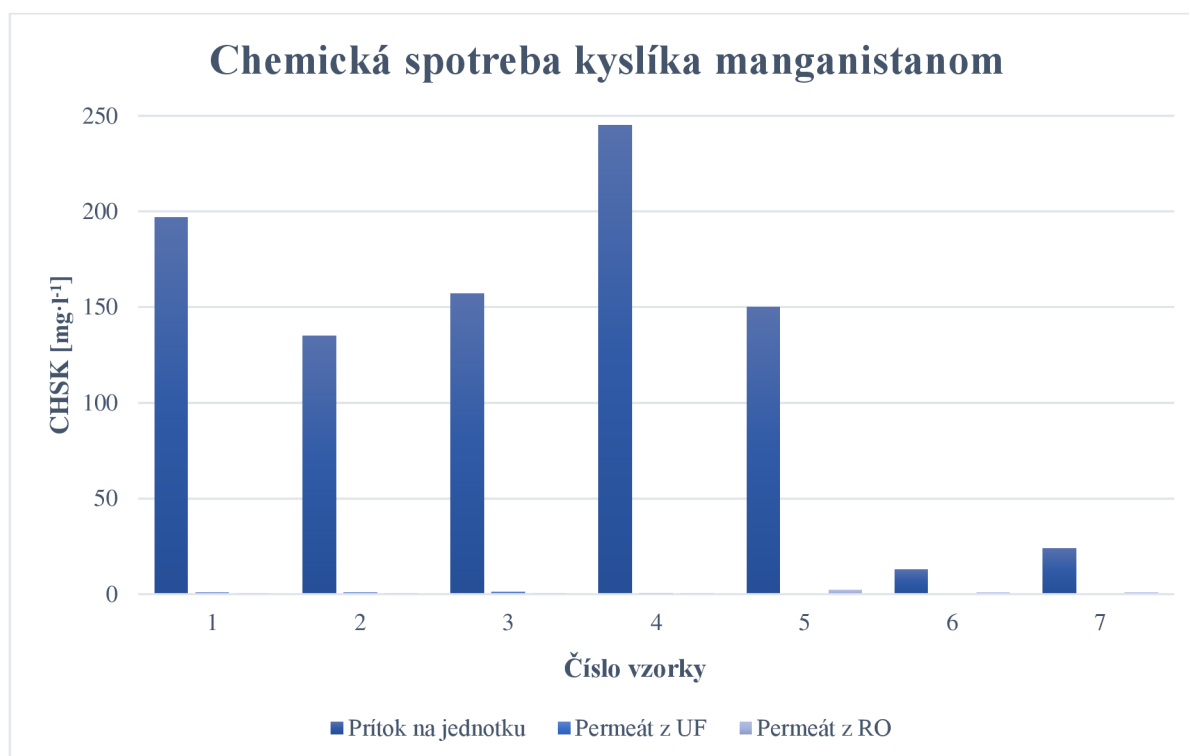
Rovnako ani merania redoxného potenciálu nepresiahli hodnotu uvedenú vo vyhláške.

Hodnota dusičnanov v plniacej vode nie je ohraničená limitom. Ak sa stanovuje v rámci analýzy vstupnej vody aj koncentrácia dusičnanov, uvádza sa ukazovateľ NO_3 – rozdiel, teda rozdiel medzi hodnotami koncentrácie dusičnanov vo vode v bazéne a v plniacej vode. Priemerná nameraná hodnota dusičnanov vo výstupe bola menšia ako $0,05 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$

5.1.2 Ostatné sledované parametre

5.1.2.1 Chemická spotreba kyslíka manganistanom

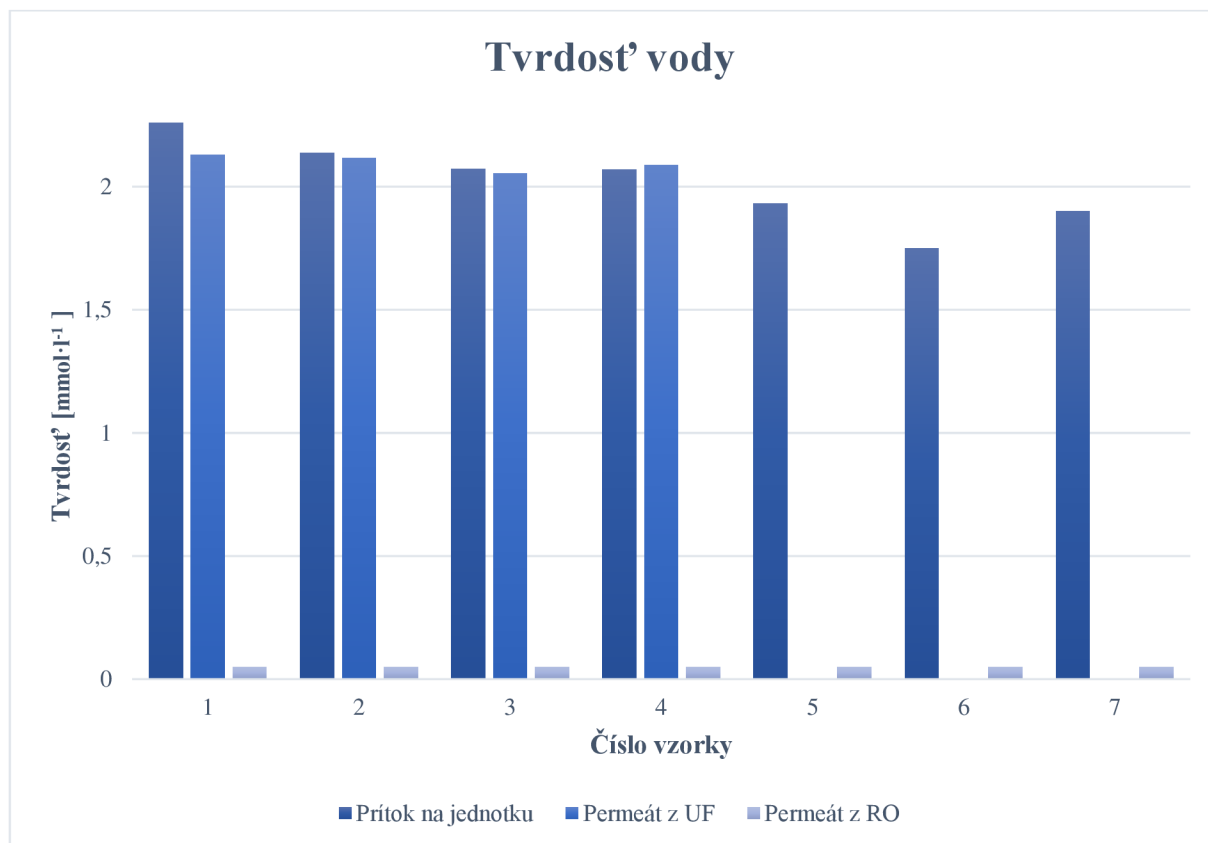
Do bazénových vôd sa organické látky dostávajú napríklad opaľovacími krémami. Ide o tuky, ktoré sú živinami pre prítomné baktérie. Rovnako ako pri aj pri ostatných stanovovaných parametroch je z výsledkov možné skonštatovať, že výstup z membránovej jednotky vykazuje len minimálne hodnoty chemickej spotreby kyslíka manganistanom.



Graf 5 Chemická spotreba kyslíka manganistanom

5.1.2.2 Tvrdosť vody

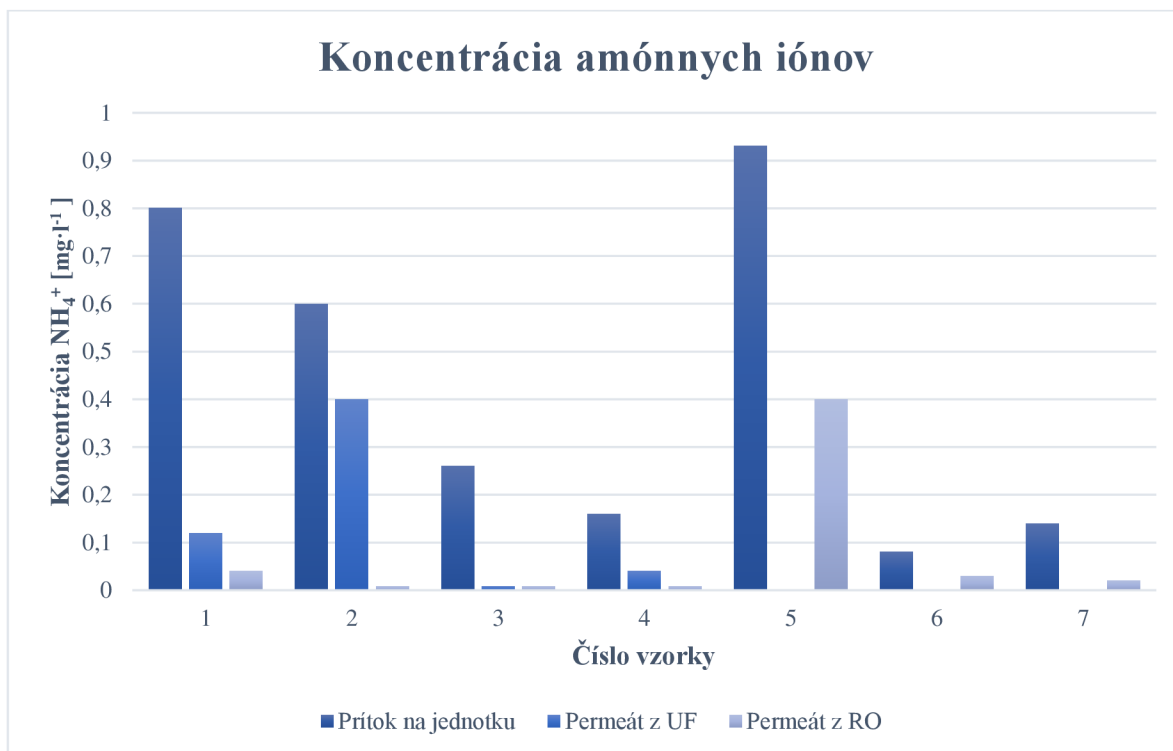
Z porovnania jednotlivých vzoriek jasne vyplýva, že zatiaľ čo ultrafiltrácia nemá veľký, respektíve takmer žiadny vplyv na zmenu tvrdosti vody, permeát z reverznej osmózy vykazuje tvrdosť vody minimálnu. Tento jav sa očakával, keďže pri ultrafiltrácii do permeátu prechádzajú nízkomolekulové látky. Z uvedených výsledkov možno skonštatovať, že reverzná osmóza efektívne zmäkčuje vodu, čím naplňuje jeden z cieľov jej zaradenia v danej technológii.



Graf 6 Stanovenie tvrdosti vody

5.1.2.3 Koncentrácia amónnych iónov

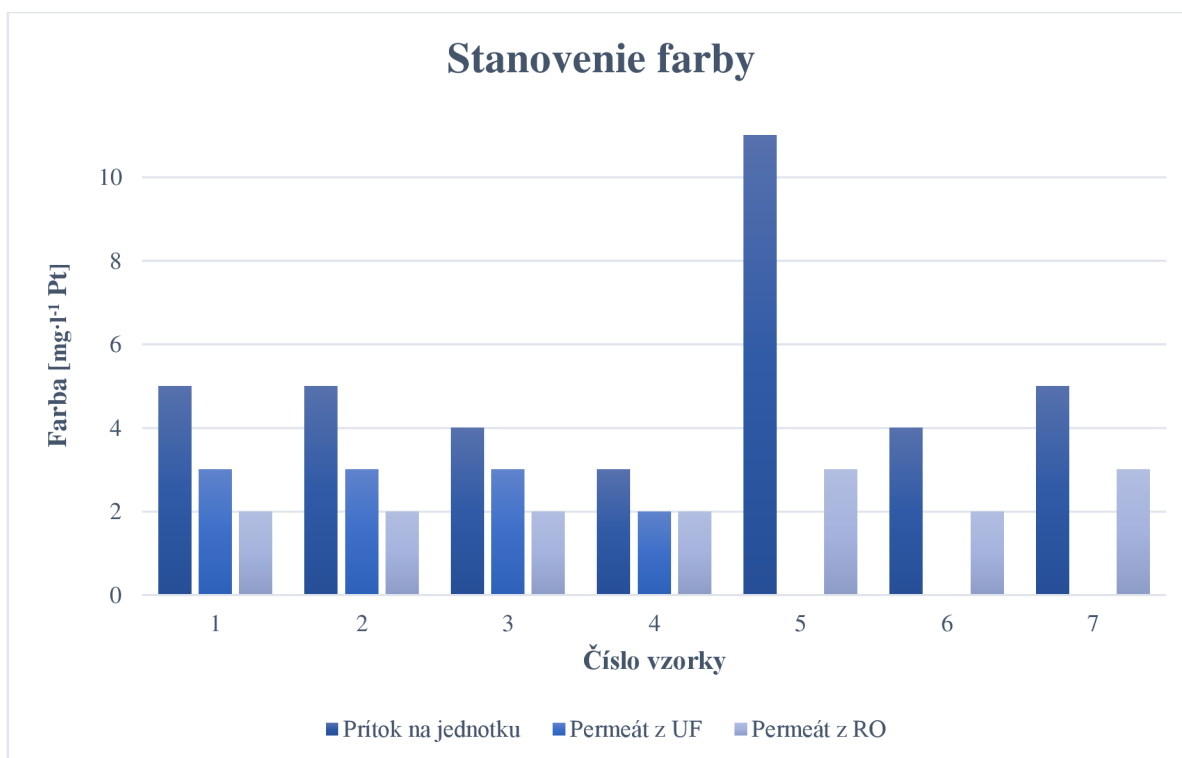
Do vody sa amónne katióny vnášajú prostredníctvom potu a tiež moču kúpajúcich sa osôb. Stanovenie amónnych iónov prebehlo pomocou kyvetových testov. Vo výstupnej vody z membránovej jednotky sa koncentrácia amónnych iónov pohybovala rádovo v desatinách miligramu na liter.



Graf 7 Koncentrácia amónnych iónov

5.1.2.4 Stanovenie farby

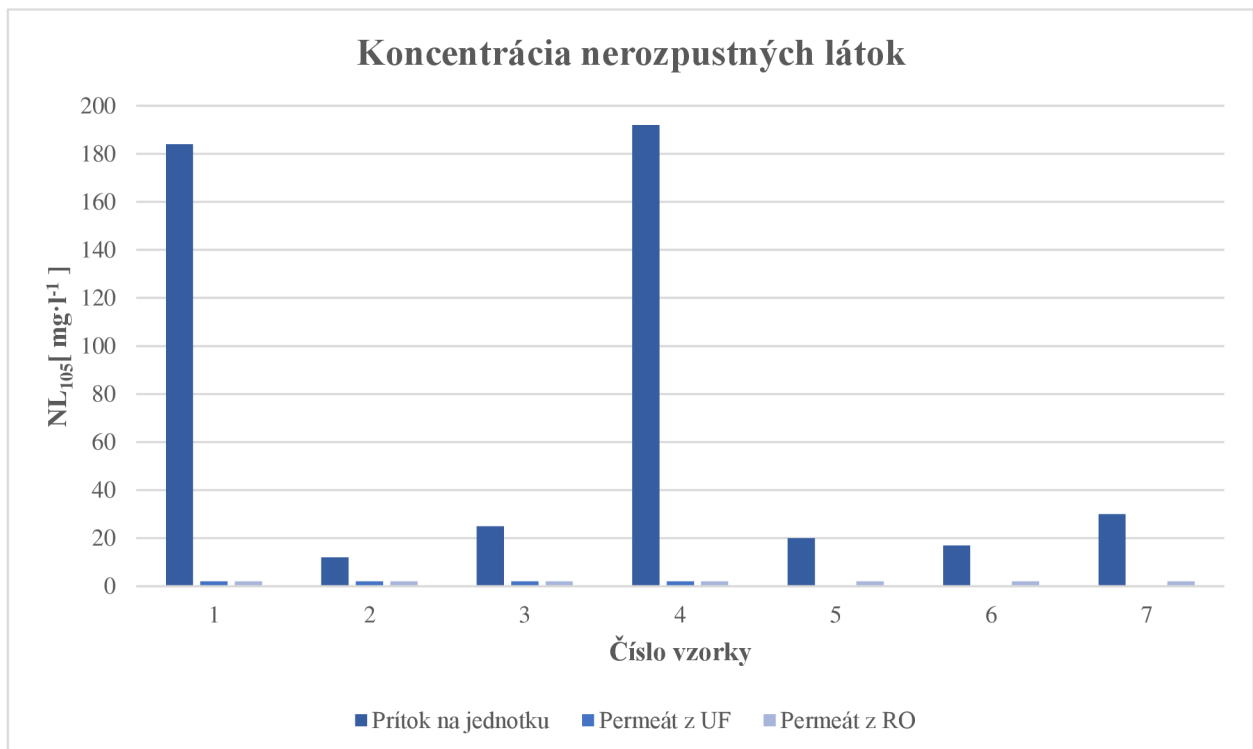
Z nameraných dát vyplýva, že už samotná ultrafiltrácia markantne znížila farbu vstupnej vody. Hodnoty zafarbenia permeátu z reverznej osmózy sa pohybovali od 2 do 3 mg·l⁻¹ Pt.



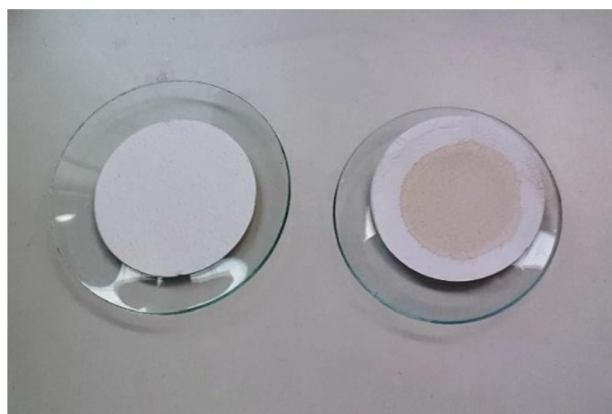
Graf 8 Stanovenie farby

5.1.2.5 Stanovenie nerozpustných látok

Pri stanovení nerozpustných látok možno pozorovať výrazný vplyv ultrafiltrácie. Nezávisle od vstupnej koncentrácie nerozpustných látok v prítoku na membránovú jednotku bol permeát z ultrafiltrácie od týchto látok do výraznej miery očistený. Takto pred upravená voda tak mohla bezpečne pokračovať na jednotku reverznej osmózy, bez rizika poškodenia membrán.



Graf 9 Stanovenie nerozpustných látok



Obr. 10 Porovnanie filtrov po stanovení nerozpustných látok v prítoku na jednotku (vpravo) a permeáte RO (vľavo)

5.1.2.6 Zhrnutie nameraných výsledkov

Priemerné hodnoty stanovovaných parametrov sú uvedené v tabuľke č. 7 spolu s percentuálnym vyjadrením rozdielu hodnôt vo vstupnej a výstupnej vode.

Tab. 7 Priemerné hodnoty sledovaných parametrov

Parameter	Jednotka	Vstupná voda	Permeát z reverznej osmózy	Percentuálne vyjadrenie poklesu [%]
pH	-	6,86	6,37	7,14
Konduktivita	mS·m ⁻¹	56,67	1,37	97,58
Zákal	FNU	19,81	0,02	98,99
Farba	mg·l ⁻¹ Pt	5,29	2,28	56,89
CHSK_{Mn}	mg·l ⁻¹	94,03	0,78	99,17
Nerozpustné látky	mg·l ⁻¹	68,57	2	97,08
Volný chlór	mg·l ⁻¹	0,19	0,02	89,47
Amónne ióny	mg·l ⁻¹	1,62	0,07	95,67
Tvrdosť vody	mmol·l ⁻¹	2,02	0,05	97,52
Kultivovateľné organizmy pri 22 °C	KTJ·100 ml ⁻¹	nespočítateľné	6	-
Kultivovateľné organizmy pri 36 °C	KTJ·100 ml ⁻¹	nespočítateľné	10	-

5.2 Zhodnotenie ekonomickej výhodnosti recyklácie pracích vôd

Ako už bolo spomínané, recyklácia bazénovej vody prispieva k zníženiu nákladov na ohrev vody, predĺženiu životnosti výmenníkov tepla a tiež zníženiu množstva dávkovania chemikálii pre prevádzku bazéna.

Pri využití membránových technológií sa zrecykluje približne 70 až 80 % vody, ktorá bola využitá na pranie pieskových filtrov a inak by skončila v kanalizácii. Denne ide o približne 20 m³, teda o objem vody postačujúci na naplnenie bazéna s rozmermi 5 x 3,5 x 1,2 m [51].

Investičné náklady predmetnej technológie predstavovali 2 500 000 Kč. Denné náklady sa pohybujú okolo 290 Kč, pričom sú v nich zahrnuté náklady za prácu údržbára, chemikálie a spotrebu elektriny. Naopak denne sa na vodnom a stočnom ušetrí 1 640 Kč a na ohreve sa ušetrí 1 209,6 Kč, dovedna teda 2849,6 Kč. Rozdiel úspor a nákladov teda predstavuje 2 558,6 Kč. Pri súčasných cenách je návratnosť technológie 2,8 roka, v prípade nárastu cien o 20 % by sa investičné náklady prevádzkovateľovi vrátili za 2,3 roka. Pri výpočte sa vychádzalo z priemerných cien energií, vody, práce a chemikálii v Českej republike [51].

Tab. 8 Východzie parametre pre výpočet návratnosti technológie [51]

Parameter	Jednotka	Hodnota
Elektrický príkon v súbehu	kW	3,5
Denná prevádzka jednotky	hod	20
Dávkovanie chemikálii	Kč·d ⁻¹	100
Celkové množstvo vody vracanej do systému	m ³ ·d ⁻¹	20
Práca obsluhy (údržbár)	Kč·d ⁻¹	100
Cena vodné + stočné	Kč·m ³	82
Cena za prevádzkovú elektrinu	Kč·kWh ⁻¹	1,3
Cena tepla za ohrev vody	Kč·kWh ⁻¹	2,8
Teplota vody z vodovodu	°C	12
Teplota vody v bazéne	°C	30

6 ZÁVER

Predložená diplomová práca bola zameraná na praktické využitie membránových technológií pri recyklácii pracích vôd z pieskových filtrov bazénovej technológie. Teoretická časť zahŕňa zhrnutie základných znalostí z oblasti membránových technológií, upriamujúc pozornosť na tlakové membránové procesy, pričom pojednáva o ich vývoji, princípoch či využití v praxi. Čitateľa taktiež uvádza do problematiky technológie úpravy bazénových vôd a v neposlednom rade do legislatívnych požiadaviek, ktoré sú na bazénovú vodu kladené.

Experimentálna časť sa venuje aplikácii ultrafiltrácie a reverznej osmózy v prevádzke Lázne Bechyně s následným sledovaním parametrov vstupnej a výstupnej vody z jednotky. Sledované parametre boli konduktivita, pH, zákal, koncentrácia voľného chlóru, chemická spotreba kyslíka manganistanom, tvrdosť vody, farba, koncentrácia amónnych iónov a stanovenie nerozpustných látok. Okrem toho prebehlo aj stanovenie kultivovateľných mikroorganizmov pri 22 ° a 36 °C a koliformných baktérii. Všetky sledované parametre dosiahli v permeáte z reverznej osmózy uspokojivé hodnoty, na základe čoho možno prehlásiť, že aplikovaná poloprevádzková membránová jednotka plní svoj účel a výstupná voda z nej je vhodná na opätovné využitie.

Investičné náklady predmetnej technológie predstavovali 2 500 000 Kč. Denné náklady na prevádzku jednotky sa pri súčasných cenách pohybujú okolo 290 Kč, no denná úspora pre prevádzkovateľa predstavuje takmer 2 850 Kč. Návratnosť investície je teda do troch rokov.

Na danú problematiku nemožno nahliadať len z ekonomického hľadiska, keďže nesporne ide o technológiu, ktorá prevádzkovateľovi šetrí významné množstvo nákladov na prevádzku. Nemožno opomenúť ani ekologické hľadisko, keďže sa touto technológiou ročne ušetrí tisíce metrov kubických vôd a teda je možné skonštatovať, že využitím membránových procesov na recykláciu pracích vôd z pieskových filtrov sa šetrí nielen finančné zdroje, ale aj nemenej dôležité zdroje pitnej vody.

V budúcnosti sa predpokladá sprísňovanie legislatívy v oblasti ochrany pitnej vody a o to väčší význam teda bude mať efektívnejšie hospodárenie s vodou zahrňujúc recykláciu bazénových vôd pomocou membránových procesov.

7 ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- [1] Recyklácia bazénových vôd [online]. [cit. 2021-05-10]. Dostupné na internetovej stránke: < <https://www.ultrafiltracia.sk/inpage/recyklacia-bazenovej-vody/> >
- [2] KHUBLARYAN, M. G.: Typer and Properties of Water –Volume II. Paríž: EOLSS Publications, 2009. 382 s. ISBN 1905839235.
- [3] TEJÓN, J. M.: Fundamentos de bioquímica estructural. Madrid: Editorial Tebar, 2006. 444 s. ISBN 8473602285.
- [4] MANAHAN, S. E.: Introducción a la química ambiental. Barcelona: Reverte, 2006. 760 s. ISBN 8429179070.
- [5] SÝKORA, V., KUJALOVÁ, H., PITTER, P. : Hydrochemie: pro studenty bakalářského studia. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2016. 219 s. ISBN 978-80-7080-949-5.
- [6] VALIGURA, D., GRACZA, T., LÁSIKOVÁ, A., MAŠLEJOVÁ, A., PAPÁNKOVÁ, B., ŠIMA, J., ŠPIRKOVÁ K., TATARKO, M.: CHEMICKÉ TABULKY. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2014. 464 s. ISBN 978-20-227-4203-0.
- [7] GRAY, H. B., DICKERSON, R. E: Principios de química. Barcelona: Reverte, 1976. 968 s.
- [8] AUGUSTIJNS, P., BREWSTER, M.: Solvent Systems and Their Selection in Pharmaceutics and Biopharmaceutics. New York: Springer, 2007. 462 s. ISBN: 978-0-387-69149-7.
- [9] American Water Works Association: Water Treatment – Principles and Practices of Water Supply Operations. Third Edition. Denver: American Water Works Association, 2003. 552 s. ISBN 978-15-8321-230-1.

- [10] BINDZAR, J., JANDA, V., JENÍČEK, P. RŮŽIČKOVÁ, I., STRNADOVÁ, N.: ZÁKLADY ÚPRAVY A ČIŠTĚNÍ VOD. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2009. 251 s. ISBN 978-80-7080-729-3.
- [11] JELÍNEK, L. et al.: Desalinační a separační metody v úpravě vody. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická Praha, 2009. 169 s. ISBN 9788070807057.
- [12] MIKULÁŠEK P. et al.: Tlakové membránové procesy. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2013. 260 s. ISBN 978-80-7080-862-7.
- [13] SOLÍS, C. A., VELÉZ, C. A., RAMÍREZ, J. S.: Tecnología de membranas: desarrollo histórico. Pereira: Universidad Católica de Pereira; Entre Ciencia e Ingeniería, 2016. s. 89-98. ISSN 1909-8367.
- [14] HOEK, E. M. V. , PENDERGAST, M. M., TARABARA, V. V.: Introduction. Encyclopedia of Membrane Science and Technology. Hoboken, New Jersey : John Wiley & Sons, 2013. 2390 s. ISBN 978-0-470-90687-3.
- [15] SINGH, R. : Membrane Technology and Engineering for Water Purification, Second Edition, Amsterdam: Elsevier, 2015. 452 s. ISBN 978-0-444-63362-0.
- [16] CHERYAN, M: Ultrafiltration and Microfiltration Handbook. Boca Raton: CRC Press, 1998. 552 s. ISBN 1566765986.
- [17] MÍKA, V., NEUŽIL, L.: Chemické inženýrství II. Vyd. 2. přeprac. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 1999. 310 s. ISBN 80-7080-359-2.
- [18] ŠNITA D.: Chemické inženýrství I. First Edition. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze. 2006. s. 286. ISBN 80-7080-589-7.
- [19] HONZAJKOVÁ, Z., PODHOLOVÁ, E., PATOČKA T., PODHOLA, M.: Využití nanofiltrace a ultrafiltrace k úpravě vody na vodu pitnou. Sborník konference Pitná voda 2010, s. 107-112. W&ET Team, Č. Budějovice 2010. ISBN 978-80-254-6854-8.

- [20] CUI, Z. F., MURALIDHARA, H. S.: Membrane Technology: A Practical Guide to Membrane Technology and Applications in Food and Bioprocessing. Amsterdam: Elsevier, 2010. 312 s. ISBN 0080951341.
- [21] MULDER, M.: Basic Principles of Membrane Technology, Berlín: Springer Science & Business Media, 2012. 564 s. ISBN: 9789400917668.
- [22] GALANAKIS, C., M.: Separation of Functional Molecules in Food by Membrane Technology. Amsterdam: Elsevier, 2019. 432 s. ISBN 978-0-12-815056-6.
- [23] ISMAIL., A. F., KHULBE, K. C., MATSUURA, T.: Reverse Osmosis. Amsterdam: Elsevier, 2019. 302 s. ISBN 978-0-12-811468-1
- [24] KŮDELA, V., MIKULÁŠEK, P., PALATÝ, Z.: Anglicko-český a česko-anglický membranologický výkladový slovník: English-Czech and Czech-English explanatory dictionary of membranology. Česká Lípa: Česká membránová platforma, 2010. 73 s. ISBN 978-80-904517-0-4.
- [25] PALATÝ, Z. et al: Membránové procesy. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2012. 296 s. ISBN 978-80-7080-808-5.
- [26] BASILE, A., PEREIRA., S.: Advanced Membrane Science and Technology for Sustainable Energy and Environmental Applications. Cambridge: Wildhead Publishing, 2011. 848 s. ISBN 978-1-84569-969-7.
- [27] RAHMAN, M., A., MATSUURA, T., OTHMAN, M., H., D., ISMAIL, A. F.: Membrane Separation Principles and Applications , First Edition, Amsterdam: Elsevier, 2018. 494 s. ISBN 978-0-12-812815-2.
- [28] EZUGBE, E. O., RATHILAL, S.: Membrane Technologies in Wastewater Treatment: A review. Membranes 2020, vol. 10, 89. 2020, s. 1-28.
- [29] SINGH, R., HANKINS, N.: Emerging Membrane Technology for Sustainable Water Treatment. Amsterdam: Elsevier, 2016. 480 s. ISBN 978-04-4463-316-3.

- [30] PETROVIC, M., BARCELO, D., PÉREZ, S.: Analysis, Removal, Effects and Risk of Pharmaceuticals in the Water Cycle. Vol. 62. Amsterdam: Elsevier, 2013. 734 s. ISBN 978-0444-62657-8.
- [31] JYE, L. W., ISMAIL, A. F.: Nanofiltration Membranes: Synthesis, Characterization, and Applications. Boca Raton: CRC Press, 2016. 167 s. ISBN 978-14-9875-139-1.
- [32] PAL, P. Introduction to membrane-based technology applications. Membrane-Based Technologies for Environmental Pollution Control. Amsterdam: Elsevier, 2020. 784 s. ISBN 978-0-12-819455-3.
- [33] KOYUNCU, I., SENGUR, R., TURKEN, T., GUCLU, S., PASAOGLU, M., E.: Advances in Membrane Technologies for Water Treatment: Materials, Processes and Applications. Amsterdam: Elsevier, 2015. 666 s. ISBN 978-1-78242-121-4.
- [34] CHARCOSSET, C.: MEMBRANE PROCESSES IN BIOTECHNOLOGY AND PHARMACEUTICS. Amsterdam: Elsevier, 2012. 350 s. ISBN 978-0-444-56334-7.
- [35] PURKAIT, M. K., SINGH, R.: Membrane Technology in Separation Science. Boca Raton: CRC Press, 2018. 228 s. ISBN 978-13-5185-856-4.
- [36] NARASIMHA, M. V. P., GROBELAK, A.: Waterborne Pathogens: Detection and Treatment. Oxford: Butterworth – Heinemann, 2020. 528 s. ISBN 978-0-12-818783-8.
- [37] NAGY, E.: Basic Equations of Mass Transport Through a Membrane Layer, Second Edition. Amsterdam: Elsevier, 2019. 594 s. ISBN 978-0-12-813722-2.
- [38] NAGY, E.: Basic Equations of Mass Transport Through a Membrane Layer. Amsterdam: Elsevier, 2012. 326 s. ISBN 978-0-12-416025-5.
- [39] HAILEMARIAM, R., H., WOO, Y. C., DAMTIE, M., M., KIM. B. C., PARK, K., D., CHOI, J., S: Reverse osmosis membrane fabrication and modification technologies and future trends: A review. Advances in Colloid and Interface Science, vol. 276, 2019. s. 1-22

- [40] HÜBNER, P. et al.: Úprava vody pro průmyslové účely. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze. 2006. 132 s. ISBN 80-7080-624-9.
- [41] PRASAD, M. N. V., GROBELAK, A.: Waterborne Pathogens: Detection and Treatment. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2020. 528 s. ISBN 978-0-12-818783-8.
- [42] ŠÍPEK, M.: ZÁKLADNÍ MEMBRÁNOVÉ PROCESY. Česká Lípa: Česká membránová platforma, 2018. 61 s. ISBN 978-80-906831-5-0.
- [43] BIELA, R., BERÁNEK, J.: Úprava vody a balneotechnika. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004, 134 s. ISBN 80-214-2563-6.
- [44] CHAN., E., T.: A Guide to swimming Pool Maintenance and Filtration Systems: An Instructional Know-How on Everything You Need to Know. Singapur: Patridge Publishing Singapore, 2015. 128 s. ISBN 978-14-8283-165-8.
- [45] Tintometer GmbH: Swimming and Spa Pool Water Treatment. Dortmund: Tintometer GmbH, 2009. 55 s.
- [46] Asociace pracovníků v regeneraci: Tradiční a nové technologie, zkušenosti s bazénovými a wellness provozy. Praha: Asociace pracovníků v regeneraci, 2011. 46 s. ISBN 978-80-904904-0-6.
- [47] ŁASKAWIEC, E., MADER, M., DUDZIAK, M., WYCZARSKA-KOKOT, J.: THE USE OF MEMBRANE TECHNIQUES IN SWIMMING POOL WATER TREATMENT. Journal of Ecological Engineering, vol. 18, 2017. s. 130-136.
- [48] REIßMANN, F., G., SCHULZE, E., ALBRECHT, V.: Application of a combined UF/RO system for reuse of filter backwash water from treated swimming pool water. Desalination, vol. 178, 2005. s. 41-49.
- [49] Případová studie. Brno: ASIO, spol s.r.o.

[50] Vyhláška č. 568/2020 Sb. [online]. [cit. 2021-01-26]. Dostupné na internetovej stránke: <<https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2020-568>>

[51] Provozní řád recyklace bezénových vod. Brno: ASIO, spol s.r.o

[52] Inge Ultrafiltration [online]. [cit. 2021-05-10]. Dostupné na internetovej stránke: <https://www.lenntech.com/products/uf-modules/inge_uf.htm>

[53] Product Datasheet TMG (D) Series [online]. [cit. 2021-05-10]. Dostupné na internetovej stránke: <https://www.water.toray/products/ro/pdf/TMGD_v0_202104.pdf>

[54] ČSN EN ISO 8467: 1996. Jakost vod – Stanovení spotřeby kyslíku manganistanem (CHSK_{Mn}). Praha: Český normalizační institut, 1996. 12 s.

[55] ČSN EN ISO 6222: 2000. Jakost vod – Stanovení kultivovatelných mikroorganismů – Stanovení počtu kolonií očkovaním do živného agarového kultivačního média. Praha: Český normalizační institut, 2000. 8 s.

[56] ČSN EN ISO 8199: 2008. Jakost vod – Obecný návod pro stanovení mikroorganismů kultivačními metodami. Praha: Český normalizační institut, 2008. 40 s.

[57] ČSN EN 872: 2005. Jakost vod – Stanovení nerozpuštěných látek – Metoda filtrace filtrem ze skleněných vláken. Praha: Český normalizační institut, 2005. 9 s.

[58] ČSN ISO 6059: 1996. Jakost vod: Stanovení sumy vápníku a horčíku Odměrná metoda s EDTA. Praha: Český normalizační institut, 1996. 7 s.

[59] PAVELEKOVÁ, I.: ANALYTICKÁ CHÉMIA. Trnava: Trnavská univerzita, 2010. 134 s. ISBN: 978-80-8082-388-7.

[60] ČSN EN ISO 7027: 2000. Jakost vod – Stanovení zákalu. Praha: Český normalizační institut, 2000. 13 s.

[61] ČSN EN 1484: 1998. Jakost vod – Stanovení celkového organického uhlíku (TOC) a rozpuštěného organického uhlíku (DOC). Praha: Český normalizační institut, 1998. 12 s.

[62] ČSN EN ISO 7887: Kvalita vod – Stanovení barvy. Praha: Český normalizační institut, 2012. 19 s.

[63] RO Permeate/RO Water Conductivity [online]. [cit. 2021-05-10]. Dostupné na internetovej <<https://complete-water.com/blog/ro-permeate-ro-water-high-conductivity-why-do-i-have-high-conductivity-in-ro>>.

8 ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK

CFF	Cross flow filtration
DEF	Dead-end filtration
EDTA	Kyselina etyléndiamíntetraoctová
CHSK _{Mn}	Chemická spotreba kyslíka manganistanom
KNK	Kyselinová neutralizačná kapacita
KTJ	Kolóniu tvoriaca jednotka
PA	Polyamid
PES	Polyétersulfón
PP	Polypropylén
PS	Polysulfón
PVDF	Polyvinylidénfluorid
RAN	Akumulačne reakčná nádrž
RO	Reverzná osmóza
SDI	Silt density index
TOC	Celkový organický uhlík
UF	Ultrafiltrácia

9 ZOZNAM PRÍLOH

Príloha A: Poloprevádzková membránová jednotka

Príloha B: Technologická schéma prevádzky

Príloha C: Výsledky jednotlivých meraní

Tab.1 Stanovenie pH

Tab. 2 Stanovenie vodivosti

Tab. 3 Koncentrácia voľného chlóru

Tab. 4 Stanovenie zákalu

Tab. 5 Chemická spotreba kyslíka manganistanom

Tab. 6 Stanovenie farby

Tab. 7 Stanovenie nerozpustných látok

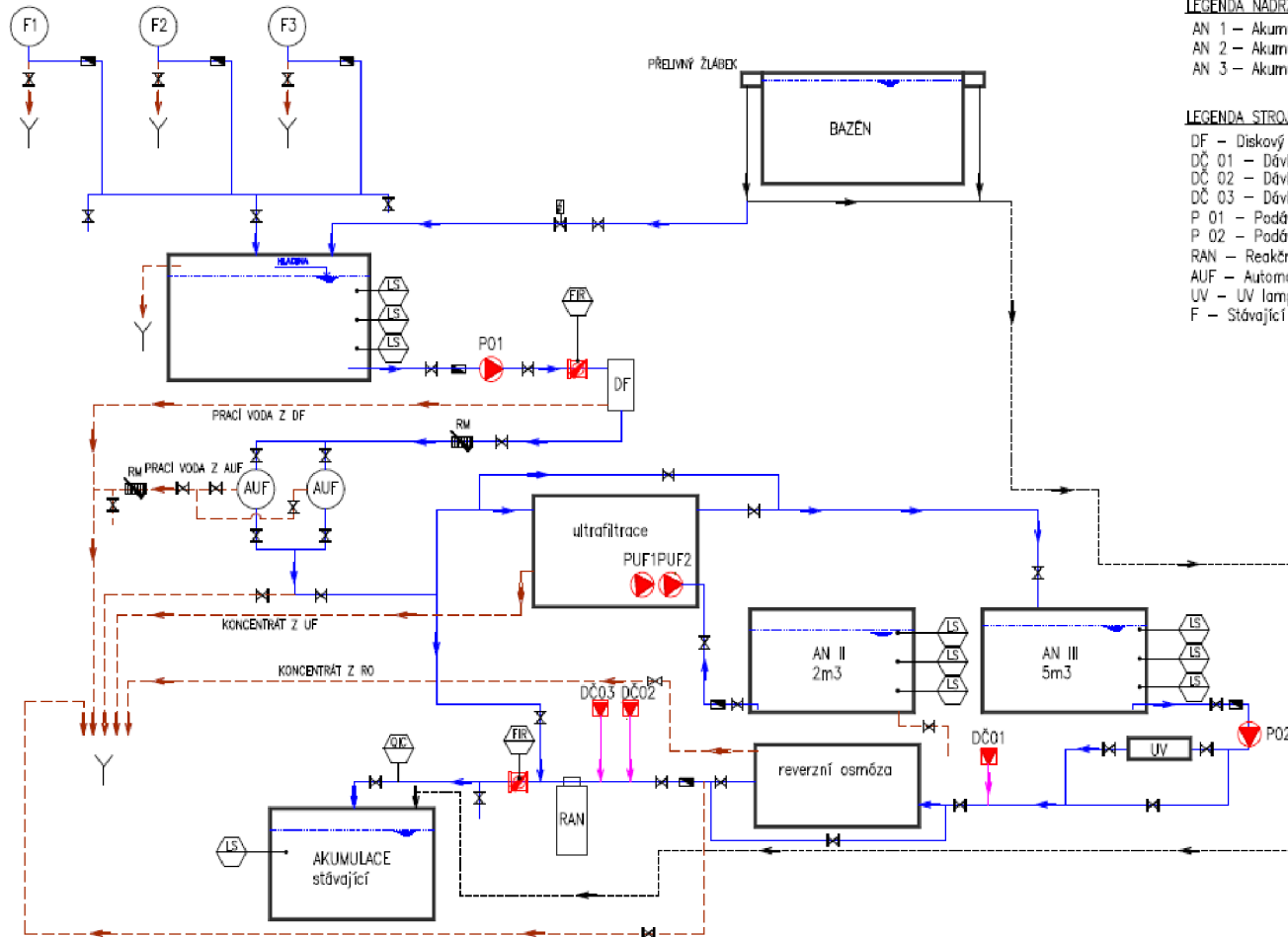
Tab. 8 Koncentrácia N-NH₄⁺

Tab. 9 Stanovenie tvrdosti vody

Príloha A: Poloprevádzková membránová jednotka



TECHNOLOGICKÉ SCHÉMA ÚV



LEGENDA NÁDRŽÍ:

- AN 1 – Akumulační nádrž pod stripovací kolonou
- AN 2 – Akumulační nádrž upravené a prací vody
- AN 3 – Akumulační nádrž upravené a prací vody

LEGENDA STROJŮ A ZAŘÍZENÍ:

- DF – Diskový filtr
- DČ 01 – Dávkovací čerpadlo – antiscaling
- DČ 02 – Dávkovací čerpadlo NaClO
- DČ 03 – Dávkovací čerpadlo NaOH
- P 01 – Podávací čerpadlo
- P 02 – Podávací čerpadlo
- RAN – Reakčně akumulační nádrž
- AUF – Automatický tlakový filtr
- UV – UV lampa
- F – Stávající pískové filtry

LEGENDA MEDIÍ:

- Surová voda
- Upravovaná voda
- Upravená voda
- Prací voda
- - - Odpadní voda
- - - Vzduch

LEGENDA ZNAČEK:

- | | | | |
|--|--------------------------|--|-------------------|
| | Průtokoměr | | Zpětná klapka |
| | Ruční ventil | | Manometr |
| | Elektromagnetický ventil | | Kanalizace |
| | Rotametr | | Trojcestný ventil |

Príloha C: Výsledky jednotlivých meraní

Tab. 1 Stanovenie pH

Číslo vzorky	Vstupná voda [-]	Permeát z UF [-]	Permeát z RO [-]
1	6,59	6,54	6,41
2	6,71	6,71	6,4
3	6,98	6,85	6,45
4	6,97	6,86	6,61
5	6,99	-	6,27
6	6,81	-	6,27
7	7,03	-	6,21

Tab. 2 Stanovenie konduktivity

Číslo vzorky	Vstupná voda [mS·m ⁻¹]	Permeát z UF [mS·m ⁻¹]	Permeát z RO [mS·m ⁻¹]
1	71,1	54,7	1,9
2	59,9	59,1	0,8
3	57,5	59,5	0,227
4	61,1	60,5	0,355
5	53,8	-	5,96
6	51,2	-	0,25
7	43,1	-	0,21

Tab. 3 Koncentrácia voľného chlóru

Číslo vzorky	Vstupná voda [mg·l ⁻¹]	Permeát z UF [mg·l ⁻¹]	Permeát z RO [mg·l ⁻¹]
1	0,4	0,01	0,01
2	0,1	0,02	0,01
3	0,2	0,02	0,01
4	0,3	0,02	0,02

5	0,1	-	0,02
6	0,05	-	0,01
7	0,16	-	0,03

Tab. 4 Stanovenie zákalu

Číslo vzorky	Vstupná voda [FNU]	Permeát z UF [FNU]	Permeát z RO [FNU]
1	19,3	0,2	0,04
2	3	0,02	0,01
3	14	0,01	0,01
4	46,5	0,02	0,01
5	19,3	-	0,1
6	20,5	-	0,05
7	16,1	-	0,02

Tab. 5 Chemická spotreba kyslíka manganistanom

Číslo vzorky	Vstupná voda [mg·l ⁻¹]	Permeát z UF [mg·l ⁻¹]	Permeát z RO [mg·l ⁻¹]
1	197	0,8	0,5
2	135	0,7	0,5
3	157	1,17	0,5
4	245	0,5	0,5
5	150	-	2
6	13	-	0,72
7	24	-	0,8

Tab. 6 Stanovenie farby

Číslo vzorky	Vstupná voda [mg·l ⁻¹ Pt]	Permeát z UF [mg·l ⁻¹ Pt]	Permeát z RO [mg·l ⁻¹ Pt]
1	5	3	2

2	5	3	2
3	4	3	2
4	3	2	2
5	11	-	3
6	4	-	2
7	5	-	3

Tab. 7 Stanovenie nerozpustných látok

Číslo vzorky	Vstupná voda [mg·l ⁻¹]	Permeát z UF [mg·l ⁻¹]	Permeát z RO [mg·l ⁻¹]
1	184	2	2
2	12	2	2
3	25	2	2
4	192	2	2
5	20	-	2
6	17	-	2
7	30	-	2

Tab. 8 Koncentrácia NH₄⁺

Číslo vzorky	Vstupná voda [mg·l ⁻¹]	Permeát z UF [mg·l ⁻¹]	Permeát z RO [mg·l ⁻¹]
1	0,8	0,12	0,04
2	0,6	0,4	0,008
3	0,26	0,008	0,008
4	0,16	0,04	0,008
5	0,93	-	0,4
6	0,08	-	0,03
7	0,14	-	0,02

Tab. 9 Stanovenie tvrdosti vody

Číslo vzorky	Vstupná voda [mmol·l⁻¹]	Permeát z UF [mmol·l⁻¹]	Permeát z RO [mmol·l⁻¹]
1	2,258	2,129	0,05
2	2,136	2,117	0,05
3	2,072	2,053	0,05
4	2,068	2,087	0,05
5	1,932	-	0,05
6	1,75	-	0,05
7	1,9	-	0,05