

# 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

## HODNOCENÍ KONCENTRÁTU Z TLAKOVÝCH MEMBRÁNOVÝCH PROCESŮ

EVALUATION OF CONCENTRATE FROM PRESSURE-DRIVEN MEMBRANE PROCESSES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE **BACHELOR'S THESIS** 

AUTOR PRÁCE AUTHOR

Petr Vejlupek

**VEDOUCÍ PRÁCE** SUPERVISOR

Mgr. Martina Repková, Ph.D.

**BRNO 2022** 

### ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá koncentrátem pocházejícím UF-RO jednotky z čistírny městských odpadních vod a jeho nakládáním v legislativním prostředí České republiky. Koncentrát byl vzorkován z UF-RO jednotky. Stanovovaly se u něj běžné parametry, kterými jsou chemická spotřeba kyslíku, biochemická spotřeba kyslíku, rozpuštěné a nerozpuštěné látky, dusičnanové anionty, dusitanové anionty, amonné kationty a chloridové anionty.

V koncentrátu byly určeny hodnoty CHSK<sub>Mn</sub> od 16 mg/l do 33 mg/l, stanovené hodnoty BSK<sub>5</sub> byly určeny od 5,04 mg/l do 5,43 mg/l, koncentrace rozpuštěných látek byly v rozmezí od 1,19 g/l do 1,61 g/l, koncentrace nerozpuštěných látek byly v rozmezí od 5 mg/l do 17 mg/l, koncentrace amonných kationtů byly v rozmezí od 0,24 mg/l do 2,56 mg/l, koncentrace dusitanových aniontů byly v rozmezí od 0,15 mg/l do 6,50 mg/l, koncentrace dusičnanových aniontů byly v rozmezí od 175 mg/l a koncentrace chloridových aniontů byly v rozmezí od 100 mg/l do 300 mg/l.

Na základě vyhodnocených dat se určilo, že koncentrát překročil některé limity dané *Nařízením vlády č. 445/2021 Sb.* [1] není možné vypouštět do povrchových vod. Vzhledem k charakteru koncentrátu by se nemohl vypouštět ani do podzemních vod.

#### ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the concentrate from the municipal wastewater treatment plant (MWTTP) and its disposal in the legislative power of the Czech Republic. The concentrate was sampled from UF-RO system. Common parameters such as chemical oxygen demand (COD), biochemical oxygen demand (BOD), dissolved and undissolved solids, nitrate anions, nitrite anions, ammonium cations and chloride anions were determined.

In the RO concentrate COD were determined from 16 mg/l to 33 mg/l, BOD<sub>5</sub> were determined from 5,04 mg/l to 5,43 mg/l, concentration of dissolved solids were in the range of 1,19 g/l – 1,61 g/l, concentration of undissolved solids were in the range of 5 mg/l – 17 mg/l, concentration of ammonium cations were in the range of 0,24 mg/l – 2,56 mg/l, concentration of nitrite anions were in range of 0,15 mg/l – 6,50 mg/l, concentration of nitrate anions were in the range of 50 mg/l – 175 mg/l and concentration of chloride anions were in the range of 100 mg/l to 300 mg/l.

It was determined that the RO concentrate exceed limits set by Czech Republic Government Decree No. 445/2021 Coll. [1] cannot be discharged into surface waters. Also it cannot be discharged into groundwater because of RO concentrate composition.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Tlakové membránové procesy, reverzní osmóza, koncentrát z reverzní osmózy, odpadní vody, koncentrát z komunálních odpadních vod

#### **KEYWORDS**

Pressure-driven membrane processes, reverse osmosis, reverse osmosis concentrate, wastewater, reverse osmosis municipal wastewater

VEJLUPEK, Petr. *Hodnocení koncentrátu z tlakových membránových procesů*. Brno, 2022. Dostupné také z: <u>https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/139959</u>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, Ústav chemie a technologie ochrany životního prostředí. Vedoucí práce Martina Repková.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citoval. Bakalářská práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty chemické VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího bakalářské práce a děkana FCH VUT.

.....

podpis studenta

## PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucí mé bakalářské práce Mgr. Martině Repkové, Ph.D., Ing. Marku Minichovi a Bc. Janu Vespalcovi za jejich odborný dohled, konstruktivní zpětnou vazbu, cenné rady a připomínky, velkou trpělivost a ochotu mi pomoct a obzvláště za jejich čas, který mi věnovali v průběhu psaní práce.

V neposlední řadě bych chtěl poděkovat i své rodině a známým za velkou podporu během studia a při vypracovávání této bakalářské práce.

## OBSAH

1	ÚVOD		7
2	TEORET	ICKÁ ČÁST	8
	2.1 Men	nbránové procesy	8
	2.1.1	Tlakové membránové procesy	9
	2.1.1.1	Mikrofiltrace	9
	2.1.1.2	Ultrafiltrace	10
	2.1.1.3	Nanofiltrace	10
	2.1.1.4	Reverzní osmóza	10
	2.2.1	Používané materiály	12
	2.2.1.1	Polymerní materiály	12
	2.2.1.2	Anorganické materiály	12
	2.2.2	Membránové moduly	13
	2.2.2.1	Deskové moduly	13
	2.2.2.2	Spirálně vinuté moduly	14
	2.2.2.3	Trubkové moduly	14
	2.2.2.4	Kapilární moduly	15
	2.2.2.5	Moduly s dutými vlákny	15
	2.3 Kon	centrát	16
	2.3.1	Rozdělení koncentrátu na základě typu vstupní vody	16
	2.3.1.1	Koncentrát z komunálních odpadních vod	16
	2.3.1.2	Koncentrát z desalinace mořské vody	18
	2.3.2	Možnosti nakládání s koncentrátem	19
	2.3.2.1	Fyzikálně-chemické metody	20
	2.3.2.2	Pokročilé oxidační procesy	20
	2.3.2.3	Biologické metody	22
	2.4 Apli	kace tlakových membránových procesů v praxi	22
	2.4.1	Pitné vody	22
	2.4.2	Dešťové vody	23
	2.4.3	Odsolování mořské vody	24
3	CÍLE PR	ÁCE	25
4	EXPERI	MENTÁLNÍ ČÁST	26
	4.1 Sezr	am použitých chemikálií	26
	4.2 Pouz	źité přístroje a pomůcky	26
	4.3 Prac	ovní postupy	27
	4.3.1	Vzorkování a skladování	27
	4.3.2	Plán vzorkování	28

	4.3.3	3 Stanovení chemické spotřeby kyslíku manganistanem draselným
	4.	3.3.1 Výpočet CHSK <sub>Mn</sub>
	4.3.4	4 Stanovení biochemické spotřeby kyslíku po 5 dnech
	4.	3.4.1 Výpočet BSK <sub>n</sub>
	4.3.5	5 Stanovení rozpuštěných látek a nerozpuštěných látek
	4.3.6	5 Stanovení dusičnanů
	4.3.7	7 Stanovení dusitanů
	4.3.8	Stanovení amonných kationtů
	4.3.9	9 Stanovení chloridů
	4.4	UF-RO Jednotka
5	VÝS	SLEDKY A DISKUZE
	5.1	Základní parametry
	5.2	Chemická spotřeba kyslíku
	5.3	Biochemická spotřeba kyslíku
	5.4	Dusičnanové, dusitanové a amonné ionty
	5.5	Chloridy
6	ZÁV	/ĚR
7	POU	JŽITÁ LITERATURA
8	SEZ	NAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK 41

## 1 ÚVOD

S rostoucí světovou populací a industrializací se zvyšuje poptávka po sladké vodě. K tomu ovšem nepřispívají problémy souvisejícími s globálním oteplováním, ať už je řeč o vysychání vodních toků, ubývaní podzemních vod nebo tání ledovců, které tvoří největší zásobárnou sladké vody. Navíc nejvíce vody je obsaženo v oceánech a mořích. Proto se v posledním desetiletí zaměřuje pozornost na získávání sladké vody z vody mořské. Vedle výše zmíněných problémů zaujímá své místo i získávání sladké vody z odpadních vod. Pozornost se tak dostává technologiím čištění a recyklace odpadních vod a technologiím úpravy pitné vody. Mezi tyto technologie spadají tlakové membránové procesy, zvláště pak reverzní osmóza.

Tlakové membránové procesy jsou jedním ze separačních procesů schopných zachytávat různě velké částice. O tom, jaké částice budou separovány, rozhoduje typ tlakového membránového procesu, resp. jeho typ membrány. V průběhu těchto procesů vznikají v podstatě dva produkty. Prvním z nich je hlavní produkt, který se nazývá permeát. Druhým vznikajícím produktem je odpadní produkt nebo-li retentát. U reverzní osmózy (a někdy i u nanofiltrace) se pro odpadní produkt používá termín koncentrát.

Koncentrát může pocházet z různých typů technologii v závislosti na druhu vstupní vody. Z toho vyplývá, že koncentrát bude obsahovat širokou škálu různých polutantů, které poškozují životní prostředí nebo mohou být toxické pro živé organismy. Příkladem může být koncentrát z odsolování mořské vody, který je svým složením nebezpečný různým mořským organismům žijících u mořského dna. Proto je vhodné koncentrát upravit, než se vypustí do přírodních vodních zdrojů. K dispozici je naštěstí celá řada možností od fyzikálně-chemických metod po biologické metody.

Tato bakalářská práce je zaměřena na hodnocení koncentrátu z reverzní osmózy. Dále jsou zde popsány tlakové membránové procesy a jejich aplikace. Praktická část se zabývá analýzou koncentrátu, kde se stanovují chemická spotřeba kyslíku, biologická spotřeba kyslíku, rozpuštěné a nerozpuštěné látky, amonné ionty, dusičnany, dusitany a chloridy. Na základě provedené analýzy se zhodnotí, jakým způsobem nakládat s koncentrátem z reverzní osmózy pocházející z čistírny městských odpadových vod.

## 2 TEORETICKÁ ČÁST

#### 2.1 Membránové procesy

Membránové procesy patří mezi separační metody. Vlastní separace probíhá na základě přestupu látek přes polopropustnou membránu. Jak už slovo "polopropustná" napovídá, pro některé látky bude membrána sloužit jako bariéra, která jim nedovolí projít na druhou stanu membrány. Pro ostatní látky bude membrána propustná. O tom, jaké látky budou vyseparovány, rozhodují vlastnosti látek procházejících membránou a charakter samotné membrány. Transport látek membránou je závislý na přítomnosti hnací síly. Membránové procesy se mohou dělit na základě typu hnací síly. Rozdělení membránových procesů podle typu hnací síly je uvedeno v **Tabulce 1** [2-5].

	Mikrofiltrace	
	Ultrafiltrace	
Gradient tlaku	Nanofiltrace	
	Reverzní osmóza	
	Separace plynů a par	
Gradient parciálních tlaků složky směsi	Pervaporace	
Gradient elektrického	Elektrodialýza	
potenciálu	Elektrodeionizace	
Gradient koncentrace	Dialýza	

Tabulka 1: Rozdělení membránových procesů dle hnací síly [3;5]

Samotný membránový proces probíhá způsobem uvedeným na **Obrázku 1**. Nejprve je nutné přivést k membráně vstupní proud, kterému se také říká nástřik. Nástřik je následně rozdělen na dva proudy, na permeát (produkt) a retentát (odpad). U pervaporace se permeátu říká pervaporát. U reverzní osmózy se retentát nazývá koncentrát (viz. kapitola 2.3). Permeát se skládá z látek, které prošly membránou. Ostatní látky zachycené membránou zůstávají v retentátu [2-5].



Obrázek 1: Schéma principu membránového procesu [4]

Jsou známy dva způsoby nástřiku přiváděného k membráně, které jsou znázorněné na **Obrázku 2**. Prvním ze způsobů je dead-end uspořádání. V tomto uspořádání je nástřik naveden přímo na povrch membrány [4]. Zachycené částice zůstávají na povrchu membrány, což způsobuje zanášení membrány a následné snížení jejího výkonu [6-8]. Proto je nutné membránu čistit. Na rozdíl od cross-flow uspořádání se nástřik nedělí a vzniká pouze jeden

proud – permeát. V cross-flow uspořádání protéká nástřik podél povrchu membrány. Díky tomu se membrána méně zanáší v porovnání s dead-end uspořádáním [4].



Obrázek 2: Schéma principu dead-end a cross-flow uspořádání [4]

#### 2.1.1 Tlakové membránové procesy

Tlakové membránové procesy jsou jedním z typů membránových technologií založených na selektivní membráně. Hnací silou je zde tlakový rozdíl nad a pod membránou tzv. gradient tlaku. Tlakové membránové procesy se dělí na mikrofiltraci, ultrafiltraci, nanofiltraci a reverzní osmózu. Tyto technologie se od sebe liší velikostí tlakových rozdílů, velikostí pórů membrány nebo transportním mechanismem. Mikrofiltrace a ultrafiltrace je charakteristická nízkým rozdílem tlaků (do 1 MPa). Nanofiltrace a reverzní osmóza funguje při vysokých rozdílech tlaků (1-10 MPa). Na **Obrázku 3** je možné vidět rozdíly v separačních vlastnostech jednotlivých membránových procesů [4].



Obrázek 3: Srovnání separačních vlastností tlakových membránových procesů [9]

#### 2.1.1.1 Mikrofiltrace

Mikrofiltrace patří k nejstarším komerčně využívaným tlakovým membránovým procesům. Jedná se o metodu, kde se využívá membrána o průměru pórů 0,05 μm – 10 μm [4]. Taková membrána je schopná separovat suspendované a dispergované pevné částice, bakterie a kvasinky [4;10]. Mikrofiltrace (MF) se často využívá jako předúprava nástřiku před nanofiltrací a reverzní osmózou [11-14]. Pro mikrofiltrační membrány se používají polymerní materiály a anorganické materiály. Mezi využívané polymerní materiály patří polyethylen (PE), polypropylen (PP), polytetrafluorethylen (PTFE) a poly(vinyliden)fluorid (PVDF).

Naproti tomu se také využívají kovy např. ocel, palladium a stříbro a keramické materiály [2-4].

Mikrofiltrace se využívá při úpravě pitné vody (kapitola 2.4) [4], desalinizaci mořské vody (kapitola 2.4.3) [11;12] a při čištění odpadních vod [13]. Dále se uplatňuje v potravinářském průmyslu např. při úpravě mléka [15;16], piva [17], vína [18;19] a nealkoholických nápojů [4;7;19;20].

#### 2.1.1.2 Ultrafiltrace

Ultrafiltrace (UF) využívá membrány o průměru pórů 10 nm – 0,05  $\mu$ m [4]. Separuje tedy makromolekulární a koloidní látky. Podobně jako mikrofiltrace se ultrafiltrace používá jako předstupeň před reverzní osmózou [11;21;22]. Oproti mikrofiltraci má ultrafiltrace menší póry a vyšší hydrodynamický odpor, proto je nutné zvýšit hnací sílu tedy v tomto případě gradient tlaku. Pro výrobu ultrafiltračních membrán se používají polymerní materiály a anorganické materiály. Mezi využívané polymerní materiály patří např. polysulfony, polyvinylfluoridy, polyakrylonitril (PAN), acetáty celulózy, polyamidy a polyimidy. Také se využívají materiály z oxidu hlinitého nebo oxidu zirkoničitého [4].

Využití ultrafiltrace spočívá v úpravě pitné vody [4] (kapitola 2.4), desalinizaci mořské vody [11;21;22] a čištění odpadních vod [23]. V potravinářském průmyslu se uplatňuje např. při úpravě džusů[20;24], mléka [25;26]. a třtinového cukru [4;27].

#### 2.1.1.3 Nanofiltrace

Nanofiltrace (NF) využívá membránu o velikosti pórů menších než 2 nm[4]. Je vhodná pro separaci herbicidů, pesticidů, barviv, cukrů, bakterií a virů. Narozdíl od mikrofiltrace a ultrafiltrace je nanofiltrace schopná separovat vícemocné ionty a jednovalentní ionty. Jednovalentní ionty ovšem neseparuje úplně, ale pouze s účinností do 50 % [4]. Pro výrobu nanofiltračních membrán se používají např. polysulfon a polyamidy [4].

Nanofiltrace se využívá na desalinizaci mořské vody (kapitola 2.4.3) [7;28-30], při úpravě pitné vody [4] a při čištění odpadních vod [31-33]. V průmyslu se uplatňuje např. při čištění textilních průmyslových odpadních vod [4;34;35].

#### 2.1.1.4 Reverzní osmóza

Reverzní osmóza (RO) separuje koloidní látky, molekuly organických látek, nízkomolekulární látky, bakterie, viry, vícemocné ionty a jednovalentní ionty. Jedná se o metodu, kde se využívá membrána s vysokým hydrodynamickým odporem (2 – 10 MPa) [4]. Princip reverzní osmózy je zobrazen na **Obrázku 4**. Při klasické osmóze molekuly vody proudí z roztoku s nižší koncentrací rozpuštěných látek do roztoku s vyšší koncentrací rozpuštěných látek. Transport vody se zastaví ve chvíli, kdy se osmotický tlak vody vyrovná s hydrostatickým tlakem. Při reverzní osmóze dojde k obrácení toku vody pomocí vnějšího tlaku [4;36;37]. Pro výrobu reverzně-osmotických membrán se používají např. estery celulózy hlavně diacetát a triacetát a aromatické polyamidy [4].



Obrázek 4: Ilustrační schéma reverzní osmózy [4]

Reverzní osmóza se využívá na úpravu pitné vody [4] (kapitola 2.4), průmyslových odpadních vod [38-40] a při desalinizaci brakické nebo mořské vody [36;38;41-43] (kapitola 2.4.3). V potravinářském průmyslu se uplatňuje např. při zahušťování ovocných šťáv [44] a zpracování mléka [16;45;46].

#### 2.2 Membrány (M69-87, P8-17,23-44) P3.a4.

Membrány jsou polopropustné (semipermeabilní) tenké bariéry, které od sebe oddělují dvě fáze. Efektivita membrány závisí na vlastnostech daného materiálu např. na velikosti a tvaru pórů, na velikosti částic a intenzitě toku. S velikostí pórů souvisí odpor membrány vůči toku. Čím menší jsou póry membrány, tím je vyšší odpor membrány. Kromě pórovitých membrán existují i membrány bez pórů. Ty fungují na základě sorpce na povrchu membrány a uvnitř membrány, difúze membránou a desorpce z povrchu membrány na její druhé straně [3;4]. V tlakových membránových procesech hraje důležitou roli typ membrány. Jak je zřejmé z **Obrázku 5**, membrány je možné rozdělit na základě různých kritérií [2].



Obrázek 5: Rozdělení membrán [2]

#### 2.2.1 Používané materiály

Rozmach membránových materiálu nastal počátkem 20. století vlivem vývoje polymerní a anorganické chemie. Předtím než se do filtračních a membránových technologií dostaly pokročilejší syntentické materiály, tak se používaly např. zvířecí střívka, textilní vlákna a později i celulóza. K hojně využívaným membránovým materiálům patří polymerní materiály. Dále se používají keramické membrány, membrány ze skla a kovů. Mezi důležité vlastnosti membrán patří mechanická odolnost, chemická odolnost, tepelná odolnost, hydrofilita, hydrofobicita a odolnost vůči zanášení [2;4]

#### 2.2.1.1 Polymerní materiály

Membrány z polysulfonu mají dobrou mechanickou, chemickou a tepelnou odolnost. Konkrétně jsou schopné pracovat při rozsahu pH 3 – 11 [46] a jsou odolné vůči chloru [47]. Díky svým vlastnostem se mohou čistit agresivními chemickými prostředky. Nevýhodou je jejich hydrofobní charakter, který způsobuje zanášení membrány (tzv. fouling). Příčinou zanášení jsou biologické vysokomolekulární látky (např. bílkoviny), které mají tendenci se vázat na povrch membrány. Problém s hydrofobicitou je možné řešit modifikacemi polysulfonových materiálů, kterými lze dosáhnout vyšší hydrofility. Příkladem takové modifikace může být přidání hydrofilního materiálu do membrány během její výroby nebo úprava povrchu membrány [4;47-51]. Vhodnými materiály určenými pro modifikaci polysulfonových membrán mohou být např. oxid grafenu [49;51-54], oxid titaničitý [51;57-59] a chitosan [51;61-62].

Membrány z acetátu celulosy jsou hydrofilního charakteru [63-67]. Tepelná odolnost je u nich nízká [68]. Tyto membrány jsou schopné pracovat za teplot nepřevyšujících  $35^{\circ}$ C [4]. Dále mají malou chemickou odolnost [63;66;68-70], která se vyznačuje úzkým pracovním rozsahem pH 4 – 6 [4]. V kyselém a alkalickém prostředí podléhají hydrolýze. Tato hydrolýza je podmíněna přítomností silné kyseliny nebo silné báze, které tento poces katalyzují [4;71]. Pracovní vlastnosti těchto materiálů je možné zlepšit pomocí různých modifikací. Příkladem mohou být např. nanokrystaly celulosy [67], oxid titaničitý [72-74] a oxid grafenu [75-77].

Membrány z polyvinylidenfluoridu se vyznačují dobrou mechanickou, tepelnou a chemickou odolností [78-80]. Problémy s odolností mohou nastat v alkalickém prostředí [4-80]. Tento polymer patří k hydrofóbním materiálům [79-81]. Pro srovnání je hydrofóbnější než např. polysulfon a polyethersulfon [4;81]. Díky svým hydrofóbním vlastnostem dochází k zanášení povrchu membrány, které je způsobeno proteiny [80;82;83] nebo mikroorganismy [84]. Řešením je modifikace těchto membrán za účelem zvýšení hydrofility membrány [82;83;85].

#### 2.2.1.2 Anorganické materiály

Na výrobu anorganických membrán se používají kovy jako např. korozivzdorná ocel, bronz, nikl a slitiny niklu, stříbra, titanu nebo platiny. Dále se využívají oxidy kovů jako např. oxid hlinitý, oxid křemičitý a oxid titaničitý. Použití nalezly i materiály na bázi ZrO<sub>2</sub> a mikroporézního uhlíku. Mezi výhody anorganických membrán je jejich chemická, tepelná a mechanická odolnost. Díky svým vlastnostem se dobře čistí. Navíc jsou odolnější vůči zanášení mikroorganismy (tzv. biofouling) narozdíl od polymerních membrán. Nevýhodou je vyšší cena anorganických materiálů [4;86;87].

#### 2.2.2 Membránové moduly

Pro funkčnost a účinnost membránových procesů je důležité, aby se membrána nezanášela a netvořil se na ní filtrační koláč. Tento problém řeší membránové moduly, což jsou pouzdra pro uložení membrány. Jejich použitím se dosáhne větší specifické plochy membrán. Také jsou nenáročné v provozu, protože se snadno čistí, mají malou náchylnost na znečištění a dají se lehce vyměnit. Aby nedocházelo ke hromadění nástřiku na povrchu membrán, používá se tangenciální nátok nebo-li cross-flow [4].

Membránové moduly se mohou dělit na základě typu membrány na dvě skupiny. První skupina zahrnuje deskové a spirálně vinuté moduly s plošnými membránami. Ve druhé skupině se nachází trubkovité, kapilární moduly a moduly s dutými vlákny. Dále ještě existují rotační moduly [4].

#### 2.2.2.1 Deskové moduly

Deskový modul se skládá ze dvou plošných membrán umístěných v opakujících se sendvičových sekvencích. Mezi těmito membránami je vložený rozdělovač (spacer). Z **Obrázku 6 a 7** je možné vidět, jakým způsobem nástřik proudí mezi membránami. Permeát prochází membránou a dále odtéká centrální trubicí. Měrný aktivní povrch membrán je nízký a pohybuje se pouze okolo 100–400 m<sup>2</sup>·m<sup>-3</sup> [4]. Vzhledem k jejich poměru membránové plochy k objemu zařízení jsou finančně náročné na provoz a nejsou příliš účinné [36;88]. Výhodou je snadné čištění deskových modulů. Toho se využívá při čištění vod s vysokým obsahem suspendovaných pevných látek [4;36].



Obrázek 6: Schematické znázornění deskového modulu [4]



Obr. 7: Schematické znázornění dráhy tekutiny v deskovém modulu [4]

#### 2.2.2.2 Spirálně vinuté moduly

Spirálně vinuté moduly jsou válcovitého tvaru, které jsou zobrazené na **Obrázku 8**. Skládají se z centrální sběrné trubice, na které jsou namotané membrány a rozdělovací síťky. Tyto síťky jsou vložené mezi membránami. Nástřik proudí podélně celým modulem. Permeát protéká membránou, kde se síťkou dostane k centrální trubici, kterou odtéká pryč. Měrný aktivní povrch membrán je vyšší (300–1000 m<sup>2</sup>·m<sup>-3</sup> [4]) oproti deskovým modulům. Nevýhodou je jejich složité čištění. Zanášení těchto modulů způsobují suspendované pevné látky [89]. Proto je dobré používat spirálně vinuté moduly spolu s předupravovacími technologiemi [36]. Spirálně vinuté moduly se využívají k odsolování vod [4;36;90].



Obrázek 8: Schematické znázornění spirálně vinutého modulu [4]

#### 2.2.2.3 Trubkové moduly

Trubkové moduly se skládají z porézních trubek, které jsou uložené v korozivzdorném ocelovém nebo plastovém pouzdře. Trubky jsou nejčastěji zhotovené z keramických materiálů (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a ZrO<sub>2</sub>). Nástřik proudí trubkami, ve kterých dochází k oddělení nástřiku od permeátu. Permeát proteče porézního povrchem trubek a je dále odveden vývodem z modulu. Nevýhodou trubkových modulů je jejich nízký měrný aktivní povrch membrán (obvykle menší než 300 m<sup>2</sup>·m<sup>-3</sup> [4]) a vysoká finanční náročnost. Na druhou stranu se v porovnání s deskovými moduly méně zanášejí. Další výhodou je jejich snadné čistění. Proto se využívají v případech, kdy nástřik obsahuje vysoké množství suspendovaných pevných částic [4;36;91].



Obrázek 9: Průřez multikanálovým keramickým modulem [4]

#### 2.2.2.4 Kapilární moduly

Kapilární moduly obsahují svazky, ve kterých jsou uspořádány kapiláry. Pracují na stejném způsobu jako tubulární moduly. Na rozdíl od nich mají menší průměr kapilár. Měrný aktivní povrch membrán se tak zvýší na 600–1200 m<sup>2</sup>·m<sup>-3</sup> [4]. Se snížením průměru kapilár se však současně zvyšuje náchylnost na zanášení. Na **Obrázku 10** jsou uvedené dva způsoby uspořádání kapilárních modulů [4;92].



Obrázek 10: Inside-out a outside-in uspořádání kapilárních modulů [4]

#### 2.2.2.5 Moduly s dutými vlákny

Tyto moduly uvedené na **Obrázku 11** se skládají z dutých vláken, jejichž průměr je podobný lidskému vlasu. Celý systém vláken je uložen v tlakové nádobě. Pracují na stejném způsobu jako tubulární a kapilární moduly, od kterých se liší menším průměrem vláken. Nástřik se může přivádět k modulu dvěma způsoby stejně jako u kapilárních modulů. Vzhledem ke svému uspořádání mají vysoký měrný aktivní povrch membrán, který se může pohybovat i okolo 20 000–30 000 m<sup>2</sup>·m<sup>-3</sup> [4]. Podobně jako u spirálních vinutých modulů se tyto moduly špatně čistí. Zanášení je dáno malým průměrem vláken. Využití nalézají v odsolování mořské vody nebo při úpravě průmyslových odpadních vod, kde se vyskytuje nízký obsah znečišťujících látek [4;36;93;94].



Obrázek 11: Schéma modulu s dutými vlákny (přeloženo) [95]

#### 2.3 Koncentrát

Během reverzní osmózy se nástřik rozdělí na permeát a koncentrát. Koncentrát vzniká jako odpadní produkt, který obsahuje látky zachycené membránou. S koncentrátem se obvykle můžeme setkat v průmyslu, při odsolování vod a v čistírnách odpadních vod. Složení koncentrátu závisí na charakteru a složení nástřiku, předúpravě nástřiku, použitém typu předupravovací technologie nebo chemikáliích použitých v průběhu úpravy nástřiku. Během procesu se využívají chemikálie při čištění membrán, dále zabraňují zanášení membrán a upravují hodnotu pH. Zabýváme se jím, protože se v takových koncentrátech vyskytují polutanty, které znečišťují půdní a vodní ekosystémy a jsou toxické pro člověka. K nebezpečným polutantům patří látky uvolňující se z léků a produktů každodenní potřeby, perzistentní organické polutanty (POPs), endokrinní disruptory (EDCs), těžké kovy a některé ionty [96-99]. Na základě druhu vstupní vody lze koncentrát zařadit do kategorií koncentrát z desalinace mořské vody, koncentrát vzniklý v průmyslu a koncentrát z městských odpadních vod.

Snahou je tedy dosáhnout vysoké výtěžnosti, tzn. minimalizovat objem koncentrátu a získat co největší množství objemu produktu [99]. Otázkou tedy je, jakým způsobem lze řešit nakládání koncentrátu a za jakých podmínek lze koncentrát vypouštět do povrchových vod nebo podzemních vod.

#### 2.3.1 Rozdělení koncentrátu na základě typu vstupní vody

#### 2.3.1.1 Koncentrát z komunálních odpadních vod

Zákon č. 544/2020 Sb., kterým se mění zákon č. 254/2001 Sb., o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon), ve znění pozdějších předpisů, a další související zákony definuje odpadní vody jako vody, které pochází z budov, průmyslových, zemědělských, zdravotnických a jiných stavbách, zařízeních nebo dopravních prostředků, kde dochází ke změně jakosti vod a jejich vypouštění by znehodnotilo jakost povrchových a podzemních vod [100].

Koncentrát z komunálních odpadních vod může obsahovat dle **Tabulky 2** vysoké hodnoty chemické spotřeby kyslíku (CHSK), dusičnanových aniontů a chloridových aniontů. Vypouštění takového koncentrátu by mělo negativní účinky na vodní organismy a podporovovalo by eutrofizaci vod. Koncentrát je tedy nutné nejdříve zbavit těchto nebezpečných polutantů [101-104]. Vhodnými technologiemi na úpravu tohoto koncentrátu by mohly být koagulace ve spojení s pokročilými oxidačními procesy založené na ultrafialovém záření a biologickou úpravou, které jsou dle studie schopné společně snížit rozpuštěný organický uhlík (DOC) až o 67 % [105].

	pH [-]	konduktivita [mS/cm]	rozpuštěné pevné látky [mg/l]	CHSK [mg/l]	BSK5 [mg/l]	NO3 <sup>-</sup> [mg/l]	NO2 <sup>-</sup> [mg/l]	NH4 <sup>+</sup> [mg/l]	Cl <sup>-</sup> [mg/l]
Hurwitz et al. [106]	8,8	3,8							954
Xiao Quan et al. [107]	7,9	10,16	5500	80–90	20–22	31,87	0,62	0,07	
Zhang et al. [108]		1,705	1129	60		91			
Zhang et al. [108]		1,972	1218	64,6		88,5			
Bagastyo et al. [109]	$8,03\pm0,08$	$5,02 \pm 0,11$				$50,7\pm7,8$	$1,\!22\pm0,\!07$		$1229\pm25$
Mohseni et al. [110]	$7,7 \pm 0,2$	$11,1 \pm 0,5$	$5500\pm300$	$164,0 \pm 7,8$		164,7 ± 6,6	$5,58 \pm 0,26$	3,35 ± 0,13	
Zhou et al. [102]	$6,9 \pm 0,2$	$1,71 \pm 0,02$	$1129\pm40$	$60\pm5$		$91\pm4$	$2 \pm 1$		$256 \pm 16$
Liu et al. [111]	8,5	2,82	1685	65		35			780
Justo et al. [112]	8,3	5,96				83,7		3,23	1540
Shanmuganat han et al. [113]	7,5	2,35	2250	77,5	2,2	23–26	1,3 – 1,5		400-600

Tabulka 2: Přehled koncentrátů z čistíren komunálních odpadních vod a jejich vybraných sledovaných parametrů

#### 2.3.1.2 Koncentrát z desalinace mořské vody

Jedním z typů je koncentrát z desalinace mořské vody. Ten vzniká jako odpadní produkt při desalinaci mořské vody, který se pak vypouští zpátky do moře. Nicméně se ukazuje, že vypouštění koncentrátu do moře má lokální dopad na životní prostředí. Zvyšuje se tak koncentrace rozpuštěných látek ve vodě v místě vypouštění, což může mít negativní vliv na mořské organismy např. na ryby, řasy, plankton a mořské rostliny. Zvláště v ohrožení jsou pak organismy citlivé na změny koncentrací rozpuštěných látek, které si nedokáží regulovat osmotické pochody v buňkách a mají tak stejné množství rozpuštěných látek zvýší natolik, že jsou buňky těchto organismů donuceny vydávat vodu. Důsledkem tohoto děje je dehydratace buněk a jejich následná smrt. Nejvíce náchylné na tento jev jsou např. korálové útesy, mořské rostliny, někteří měkkýši a plankton [114-116].

#### 2.3.1.3 Koncentrát z průmyslu

Průmyslová odvětví zahrnují celou řadu různých chemických procesů. S tím souvisí i složení průmyslových odpadních vod. Tyto odpadní vody jsou velmi variabilní vzhledem k typu průmyslu, ze kterého pocházejí.

Prvním popisovaným koncentrátem je koncentrát z textilního průmyslu. Koncentrát z textilního průmyslu obsahuje organické látky jako např. barviva a aditiva, a dále nerozpuštěné látky, těžké kovy a povrchově aktivní látky. S tímto složením souvisí chemická spotřeba kyslíku, která bývá zpravidla vysoká. Vzhledem k tomu, že jsou tyto látky toxické pro člověka a vodní organismy, je nutné koncentrát vhodně vyčistit. Efektivní technologií pro vyčištění koncentrátu jsou pokročilé oxidační procesy [99;117;118]. Studie ukázala, že Fentonova oxidace snížila chemickou spotřebu kyslíku o 84,7 % a v kombinaci s ultrafialovým zářením dokonce až o 92,2 % [109]. Dalšími vhodnými technologiemi mohou být využití adsorpce a aktivní uhlí [99] [117].

Koncentrát se může vyskytovat i v chemickém uhelném průmyslu, kde se přečišťuje odpadní voda a následně se vrací zpátky do vodního cyklu chemické uhelné továrny [120]. Koncentrát z reverzní osmózy obsahuje různé organické polutanty. Stejně jako v předchozím odstavci je možné využít pokročilé oxidační procesy k čistění koncentrátu. Ve studii se srovnávalo použití dvou oxidačních činidel – peroxid vodíku a peroxydisulfát za využití ultrafialového záření jako katalyzátoru. Výsledky studie ukázaly, že peroxid vodíku byl účinnější ve snížení chemické spotřeby kyslíku (CHSK) a rozpuštěného organického uhlíku (DOC) (o 62,0 %) [121].

Další oblastí je kožedělný průmysl, který patří k jednomu z největších znečišťujících průmyslů. Problémem je, že během provozu vzniká koncentrát obsahující anorganické soli a organické látky [122]. Hlavní pozornost se ale dostává sloučeninám chromu. Ty se do tohoto průmyslu dostávají díky využívaným chromitým solím (např. síran chromitý [123]), které se využívají jako činidla [123-125]. V souvislosti s tímto průmyslem jsou často zmiňované dvě formy chromu, trojmocný chrom a šestimocný chrom. Trojmocný chrom (Cr<sup>III</sup>) není sám o sobě škodlivý [126]. Maximálně může vyvolat kožní alergickou reakci [126]. Jeho rizikovost však spočívá ve schopnosti přecházet na mnohem nebezpečnější šestimocný chrom (Cr<sup>VI</sup>). Šestimocný chrom může také vyvolat kožní alergickou reakci [127]. Ovšem hlavními důvody, proč je šestimocný chrom tolik diskutovaný, jsou jeho dopady na zdraví člověka a na vodní organismy. Šestimocný chrom je totiž považován za látku, která může způsobit rakovinu [127]. Navíc se u něj prokázala vysoká toxicita pro vodní organismy [127]. Vzhledem k těmto vlastnostem je nutná úprava.

#### 2.3.2 Možnosti nakládání s koncentrátem

Obecně lze rozdělit všechny metody nakládání s koncentrátem do několika možností. První možností je vypouštění koncentrátu do povrchových a podzemních vod jako je tomu v případě ostatních odpadních vod [1;128]. Vypouštění odpadních vod do povrchových vod a podzemních vod je v České republice regulováno *Nařízením vlády č. 445/2021 Sb., kterým se mění nařízení vlády č. 401/2015 Sb., o ukazatelích a hodnotách přípustného znečištění povrchových vod a odpadních vod, náležitostech povolení k vypouštění odpadních vod do vod povrchových a do kanalizací a o citlivých oblastech [1] a Nařízením vlády č. 57/2016 Sb. o ukazatelích a hodnotách přípustného znečištění odpadních vod do vod povrchových a do kanalizací a o citlivých oblastech [1] a Nařízením vlády č. 57/2016 Sb. o ukazatelích a hodnotách přípustného znečištění odpadních vod a náležitostech povolení k vypouštění odpadních vod do vod podzemních [128]. Vodoprávní úřady vydávají povolení a stanovují emisní limity a podmínky k vypouštění odpadních vod [1;128]. O odpadních vodách se zmiňuje i Zákon č. 544/2020 Sb., který ukládá povinnost každému, kdo vypouští odpadních vod podzemních vod, aby nejdříve zajistil vyčištění odpadních vod podle předem stanovených podmínek uvedených v povolení [100]. Mezi vhodné separační způsoby patří fyzikálně-chemické metody, pokročilé oxidační procesy a biologické metody, které jsou uvedené v Tabulce 3.* 

Jak je možné vidět v **Tabulce 3**, existuje široká škála metod, kterými lze čistit koncentrát. V následujích třech podkapitolách se tedy zaměřím na ty nejperspektivnější metody.

	Koagulace
	Adsorbce
	Membránová destilace
Fyzikálně-chemické metody	Elektrodialýza
	Membránová krystalizace
	Iontová výměna
	Odpařování (evaporace)
	Fentonova oxidace
	Ozonizace
Pokrocne oxidacni procesy	Fotokatalytická oxidace
	Fotolýza
	Kořenové čistírny
Dialagialtá matada	Biosorpce
Biologicke metody	Aktivovaný kal
	Membránový bioreaktor

Tabulka 3: Přehled technologií používajících se na čištění koncentrátu [99;104]

#### 2.3.2.1 Fyzikálně-chemické metody

Koagulace je metoda založená na přidávání chemických látek tzv. koagulantů do čištěné vody. Příkladem koagulantů mohou být síran hlinitý, síran železitý, chlorid železitý nebo hlinitan sodný. Tyto látky napomáhají agregaci a sedimentaci malým částicím, které by se jinak usazovaly velmi pomalu nebo by se neusazovaly vůbec. Koagulanty reagují s vodou za vzniku příslušného hydroxidu. Ten je schopný adsorbovat ionty nebo reagovat s koloidními látkami anorganického nebo organického charakteru. Dochází tak k procesu, kdy se malé částice shlukují do větších celků. Následně se tyto shluky usazují na dně nádrže. Po koagulaci zpravidla probíhá sedimentace a po ní filtrace. Koagulace může používat jako předupravovací technologie k pokročilým oxidačním procesům (AOPs) [97;129-131].

Autoři studie zkoumali účinnost koagulace při čištění koncentrátu z komunálních odpadních vod. Koagulace byla schopná snížit chemickou spotřeba kyslíku (CHSK) zhruba o 26 % a rozpuštěný organický uhlík (DOC) o 26 % [132]. Lepších výsledků se ale dosáhlo ve spojení koagulace s AOPs a za použití granulovaného aktivního uhlí (GAC), kdy se CHSK snížila o 46 % a DOC o 67 % [132]. Koagulace se dále ukázala jako nevhodná pro snížení dusičnanového dusíku (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N) a amoniakálního dusíku (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N). Naopak celkový fosfor (TP) dokázala snížit až o 93 % [132].

Elektrodialýza je metoda založená na membránových procesech, kde se používají ionexové membrány. Skládá se z katexových a anexových membrán, které se mezi sebou střídají. Na opačných koncích elektrodialytické jednotky se naproti sobě nachází anoda a katoda. Ionty migrují ve směru elektrody, která má náboj opačný než daný ion. Ionty prochází katexovými a anexovými membránami. Katexová membrána je selektivně propustná pouze pro kladné ionty a anexová membrána je selektivně propustná pouze pro kladné ionty a anexová membrána je selektivně propustná pouze pro záporné ionty. Elektrolýza je proto schopná odstraňovat např. ionty těžkých kovů. Používá se při odsolování vod, při čištění odpadních vod a v potravinářem a farmaceutickém průmyslu [130;133;134].

V této studii byl čištěn koncentrát z čistírny odpadních vod za pomocí elektrodialýzy. Elektrolýza se zde ukázala jako účinná, protože u všech měřených parametrů došlo zásadnímu snížení o několik desítek procent. Konduktivita byla snížena o 68,5 %, chloridy o 78,7 % a dusičnany o 79,7 % [135].

#### 2.3.2.2 Pokročilé oxidační procesy

Pokročilé oxidační procesy (AOPs) fungují na principu neselektivní oxidace reaktivními radikály, které dokáží odstranit organické látky. Reaktivní radikály se generují prostřednictvím oxidačních činidel (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>), katalyzátorů (Fe<sup>2+</sup>, TiO<sub>2</sub>), ultrafialového záření a ultrazvuku. Základní pokročilé oxidační procesy jsou uvedeny v **Tabulce 4** [98;104;105;136]. Níže jsou odstavce této kapitoly zaměřeny na Fentonovu oxidaci a ozonizaci.

Proces	Reakce			
Fentonova oxidace	$Fe^{2+} + H_2O_2 \rightarrow Fe^{3+} + HO^- + HO^-$	(1)		
Ozonizace	$\begin{array}{c} O_3 + h \nu_{(\lambda < 310nm)} \rightarrow O_2 + O (^1D) \\ O (^1D) + H_2O \rightarrow 2HO^{\bullet} \end{array}$	(2)		
Fotokatalytická oxidace	$\begin{aligned} \text{TiO}_2 + h\nu &\rightarrow \text{e}^- + \text{TiO}_2 (\text{h}^+) \\ \text{TiO}_2(\text{h}^+) + \text{OH}^- &\rightarrow \text{TiO}_2 + \text{HO}^* \\ \text{H}_2\text{O}_2 + \text{e}^- &\rightarrow \text{HO}^* + \text{HO}^- \end{aligned}$	(3)		
Fotolýza	$\begin{array}{c} H_2O_2 + h\nu \rightarrow 2HO^{\bullet} \\ 2H_2O_2 + 2HO^{\bullet} \rightarrow H_2O + HO_2^{\bullet} \\ 2HO_2^{\bullet} \rightarrow H_2O + O_2 \end{array}$	(4)		

 Tabulka 4: Přehled základních pokročilých oxidačních procesů a jejich reakčních mechanismů [137]

Fentonova oxidace je založená na reakci peroxidu vodíku s železnatým iontem. Reakce je vyjádřena **rovnicí č.1** v **Tabulce 4**. Vznikne hydroxylový radikál, který oxiduje organické sloučeniny za vzniku oxidu uhličitého a vody. Výhody této metody spočívají v její účinnosti a také v tom, že reakce probíhá už za laboratorní teploty a tlaku. Nicméně tato metoda má své omezení [136;138;139]. Ukázalo se totiž, že pro dosažení nejlepších výsledků je nutné reakci provádět v kyselém prostředí [140-142]. K dalším nevýhodám patří vysoká spotřeba peroxidu vodíku a samotná manipulace s peroxidem vodíku. Peroxid vodíku může způsobit požár, explozi, popáleniny kůže, poškozuje oči a je toxický při požití a vdechnutí [143]. Problémy způsobuje i odpadní produkt (železité ionty), který se hromadí za vzniku kalu. To vše se pak promítá do nákladů na čištění odpadních vod [136;138;139].

Ve dvou studiích se autoři zabývali možností aplikace Fentonové oxidace na čištění koncentrátu. Koncentráty z těchto studií byly získány z průmyslových odpadních vod, které byly nejprve čištěny biologickými procesy a po té reverzní osmózou [144;145]. V první studii se dosáhlo snížení CHSK o 65,1 % [144]. Ve druhé studii dokázala Fentonova oxidace snížit CHSK o 72 % [145].

Jak už název ozonizace napovídá, jde o technologii založenou na silném oxidačním činidle - ozonu. Reakce je obecně vyjádřena **rovnicí č.2** v **Tabulce 4**. Oxidace může probíhat buď přímým nebo nepřímým mechanismem. V přímé oxidaci reaguje samotná molekula ozonu s organickou sloučeninou. Reakce vyžaduje kyselé nebo neutrální prostředí. Nepřímá oxidace se vyznačuje složitými reakcemi, kterými dojde k rozkladu ozonu za vzniku hydroxylového radikálu. Stejně jako v případě Fentonovy oxidace je schopný tento radikál oxidovat organické polutanty [98;136;146]. Ozonizace se využívá při čištění odpadních vod na odstranění barvy, zápachu, mikroorganismů a organických polutantů. Problém nastává, pokud odpadní voda obsahuje bromidové ionty. Při ozonizaci by pak vznikaly toxické vedlejší produkty bromičnany [146-149].

Ve studii byla zkoumána účinnost ozonizace v čištění koncentrátu z komunálních odpadních vod. Ozonizace dokázala snížit CHSK o 64 % a DOC o 33 % [150].

#### 2.3.2.3 Biologické metody

Při čištění koncentrátu se mohou také uplatňovat kořenové čistírny. Kořenové čistírny jsou založené na řadě fyzikálních, chemických a biologických procesech. Výhodou kořenových čistíren je jejich snadná údržba, nízké provozní náklady a vysoká účinnost při odstraňování polutantů. Částice podléhají sedimentaci nebo jsou zachyceny kořenovým systémem rostlin. Mikroorganismy, které se nachází v kořenovém systému rostlin nebo v půdě kořenové čistírny, jsou schopné rozložit biodegradabilní polutanty nebo snížit koncentraci dusičnanových iontů pomocí denitrifikačních procesů [147;151]

Kořenová čistírna byla využita ve studii, kde se pomocí ní podařilo snížit dusitanový dusík o 31 %, dusičnanový dusík o 62 %, amoniakální dusík o 42 % a BSK<sub>5</sub> o 43 % [152].

#### 2.4 Aplikace tlakových membránových procesů v praxi

#### 2.4.1 Pitné vody

Tlakové membránové procesy jsou nepostradatelnou součástí při čištění vod. V české legislativě však nejsou zakotveny. Jediná zmínka o nich je ve *Vyhlášce č.448/2017 Sb., kterou se mění vyhláška č. 428/2001 Sb., kterou se provádí zákon č. 274/2001 Sb., o vodovodech a kanalizacích pro veřejnou potřebu a o změně některých zákonů (zákon o vodovodech a kanalizacích), ve znění pozdějších předpisů [153], kde se objevují ve standardních metodách úpravy vody v kategorii A3. Jejich použití je zatím omezeno pro mimořádné účely [153].* 

Hygienickými požadavky na pitnou vodu se v České republice zabývá Vyhláška č. 70/2018 Sb., kterou se mění vyhláška č. 252/2004 Sb., kterou se stanoví hygienické požadavky na pitnou a teplou vodu a četnost a rozsah kontroly pitné vody, ve znění pozdějších předpisů [154].

V **Tabulce 5** je zobrazený přehled tlakových membránových procesů, ve kterém je možné vidět, co je daný proces schopný vyseparovat. U mikrofiltračních a ultrafiltračních procesů se pro úpravu pitné vody využívají membránové moduly s dutými vlákny, popř. spirálně vinuté moduly. Systémy pro úpravu pitné vody se zařazenou mikrofiltrací a ultrafiltrací mají schopnost separovat bakterie, viry a další mikroorganismy ze zpracovávané vody. Využití při úpravě pitné vody nalézá i nanofiltrace. Pro svoji schopnost separovat vícevalentní ionty se používá ke změkčování tvrdé vody, resp. ke snížení množství vápenatých a hořečnatých iontů [4]. *Vyhláška č. 70/2018 Sb.* stanovuje v pitné vodě mezní hodnoty pro hořčík 10 mg/l a pro vápník 30 mg/l [154]. Reverzní osmóza se uplatňuje při výrobě pitné vody z vody mořské viz. kapitola 2.4.3 [4].

Separované látky	Druh membránové separace				
Separovale laky	MF	UF	NF	RO	
Suspendované látky	С	С	С	С	
Prvoci	С	С	С	С	
Bakterie	С	С	С	С	
Viry	Р	С	С	С	
Železo, mangan	D	D	С	С	
Huminové látky	—	Р	С	С	
Vápník, hořčík	_	—	Р	С	
Dusičnany	—	—	—	С	
Amoniak	_	_	—	С	

Tabulka 5: Separace látek tlakovými membránovými procesy [4]

C kompletní odstranění

P částečné odstranění

D odstranění v závislosti na chemické formě

#### 2.4.2 Dešťové vody

Technologie pro získávání vody nabývají stále větších a větší důležitosti. S růstem populace a s důsledky globálního oteplování se neustále zvyšuje poptávka po pitné a užitkové vodě. Vedle klasických technologií získávání vody z povrchových a podzemních vod se objevují i nové technologie jako např. kondenzace vzduchu ať už bohatého na vlhkost nebo i vzduchu s nízkou vlhkostí, čehož se může následně využít v pouštních oblastech. Jinou možností je i získávání vody pomocí odsolování mořské vody (viz kapitola 2.4.3) nebo zachytávání dešťových vod.

Co se týká úpravy dešťové vody pomocí tlakových membránových procesů tak je možné využít všechny její typy. Mikrofiltrace neodstraňuje úplně všechny organické látky, suspendované pevné částice, patogeny atd., proto je vhodné ji používat spolu s jinými technologiemi úpravy vody. Zatím je její využití pro úpravu dešťové vody vyvíjeno v laboratořích. Ultrafiltrace je schopná odstranit suspendované pevné látky a koloidy i jiné škodlivé látky. Špatně ovšem odstraňuje těžké kovy. Nanofiltrační membrána zhotovená z polymerních materiálů vykazuje dobrou účinnost při odstraňovaní organických a anorganických iontů solí, čehož se dá využít při úpravě dešťových vod na vodu pitnou. S patogeny se vypořádá kombinace nanofiltrace, filtrace přes granulované aktivní uhlí a chlorace při nízkých dávkách. Dosáhne se tak ještě vyššího snížení patogenů než jen při samotné nanofiltraci. Reverzní osmózu je výhodnější používat současně s mikrofiltrací, ultrafiltrací a UV zářením. Upravená dešťová voda pak neobsahuje žádné mikroorganismy [155].

#### 2.4.3 Odsolování mořské vody

Při odsolování mořské vody se uplatňuje nanofiltrace a reverzní osmóza. Jejich cílem je snížit obsah soli ve vodě a zajistit tak pitnou vodu v oblastech, kde je její nedostatek. Takovým příkladem může být např. Izrael, který má svých pět odsolovacích zařízení nainstalováných podél pobřeží moře fungujících na principu reverzní osmózy. Pro představu mořská voda obsahuje více než 35 000 mg/l soli. Podle Světové zdravotnické organizace má pitná voda obsahovat do 500 mg/l soli [4;41].

Nanofiltrace na rozdíl od reverzní osmózy nezadržuje účinně všechny ionty. Používá se, pokud chceme, aby výsledná voda byla pouze částečně demineralizována. Proto se více hodí pro úpravu mořské vody, kde je koncovým produktem pitná voda. Mořská voda upravená reverzní osmózou na pitnou vodu by musela podstoupit remineralizační procesy, protože účinnost odsolování je u ní vyšší. Není ovšem stoprocentní, protože i při použití dvoustupňového systému RO projde membránami 10 % až 0,001 % látek. Upravená odsolená voda určená k pitným účelům by měla splňovat parametry pitné vody. V České republice by taková voda musela splňovat Vyhlášku č. 70/2018 Sb., která stanovuje hygienické požadavky na pitnou vodu [4;154;156].

## **3** CÍLE PRÁCE

Cílem této bakalářské práce je zjistit složení koncentrátu z čistírny městských odpadních vod pomocí vybraných parametrů. Mezi sledované parametry patřily chemická spotřeba kyslíku, biochemická spotřeba kyslíku, rozpuštěné a nerozpuštěné látky, dusičnanové anionty, dusitanové anionty, amonné kationty a chloridové anionty.

Na základě zjištěných dat se určilo, jakým způsobem by se nakládalo s koncentrátem v rámci legislativy České republiky. Koncentrát se v tomto ohledu řídí platnou legislativou, resp. stanovenými limity dané *Nařízením vlády č. 445/2021 Sb.* [1] a *Nařízením vlády č. 57/2016 Sb* [128]

## 4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

#### 4.1 Seznam použitých chemikálií

- Destilovaná voda, FCH VUT Brno, ČR
- Kyselina sírová, p.a., Merci s.r.o, ČR
- Šťavelan disodný, p.a., Lach-Ner s.r.o, ČR
- Manganistan draselný, p.a., Lachema a.s, závod Neratovice, ČR
- Dihydrogenfosforečnan draselný, p.a., Lachema a.s, závod Neratovice, ČR
- Hydrogenfosforečnan didraselný, p.a., Lachema a.s, závod Neratovice, ČR
- Dodekahydrát hydrogenfosforečnanu sodného, p.a., Lachema a.s, závod Neratovice, ČR
- Chlorid amonný, Lachema a.s, závod Neratovice, ČR
- Síran hořečnatý krystalický (heptahydrát), Lachema a.s, závod Neratovice, ČR
- Chlorid vápenatý dihydrát, p.a., Penta s.r.o, ČR
- Chlorid železitý bezvodý, čistý, Lach-Ner s.r.o, ČR
- D-glukóza bezvodá, p.a., Lach-Ner s.r.o, ČR
- Kyselina L-glutamová, p.a., Lach-Ner s.r.o, ČR
- N-allylthiomočovina, čistota 98 %, Sigma-Aldrich Chemie GmbH, Německo

#### 4.2 Použité přístroje a pomůcky

Běžné laboratorní sklo a pomůcky

Vzorkovnice 1000 ml, HDPE

Pec laboratorní muflová, LAC s.r.o, ČR

Sušárna laboratorní, model 500, Memmert GmbH + Co.KG, Německo

Vařič ETA E 2117, 2500 W, ETA a.s, ČR

Laboratorní chlazený inkubátor serie Q-Cell, Verkon s.r.o, ČR

Vakuová pumpa MV-2, Ser. No. 25939201, Vacuubrand GmbH + Co.KG, Německo

Míchačka elektrom. typ MM4, Lavat Chotutice, Československo

Váhy analytické HR-120-EC, A&D Instruments Ltd., Velká Británie

Spektrofotometr UV/VIS Spectroquant ® Prove 300, Merck KGaA, Německo

Filtry ze skelného mikrovlákna GF/C<sup>TM</sup>, GE Healthcare UK Limited, Velká Británie

Oximetr přenosný, Greisinger GMH 3651, GHM Group, Německo

pH metr, Oakton, USA

Kondumetr, ECTestr 11+ multi-range, Oakton, USA

#### 4.3 Pracovní postupy

#### 4.3.1 Vzorkování a skladování

Při vzorkování byly dodrženy zásady norem ČSN EN ISO 5667-3 Kvalita vod – Odběr vzorků – Část 3: Konzervace vzorků vod a manipulace s nimi [157], ČSN ISO 5667-5 Jakost vod – Odběr vzorků – Část 5: Návod pro odběr vzorků pitné vody z úpraven vody a z vodovodních sítí [158] a ČSN EN ISO 5667-14 Kvalita vod – Odběr vzorku – Část 14: Návod pro prokazování a řízení kvality odběru vzorků vod a manipulace s nimi [159]. Dále byly dodrženy zdravotnické a bezpečnostní předpisy. Při odběru byl kladen důraz na reprezentativnost odebraných vzorků.

Pro vzorkování byly použity nové a nepoužité vzorkovnice. Byly provedeny odběry vzorku do třech plastových vzorkovnic z HDPE. Vzorkovnice byly naplněny až po okraj. Vzorkovnice se po naplnění ihned uzavřely, aby nedošlo ke kontaminaci z vnějších zdrojů, adsorpci, difúzi nebo úniku plynné fáze. Během odběru a manipulace se vzorky byly dodrženy všechny opatření, aby se minimalizovala šance na znečištění vzorku vlastním přičiněním.

Vzorkovnice byly popsány těmito údaji: jménem osoby, číslem vzorku, popisem vzorku, bodem odběru, datem a časem odběru.

Vzorkovnice byly přepravovány automobilem v přepravním boxu, který sloužil k ochraně vzorkovnic před mechanickým poškozením. Dále se dbalo na to, aby vzorkovnice nebyly vystaveny mrazu, teplu a světlu. Vzorky byly dovezeny do laboratoře v den vzorkování a byly uskladněny v lednici při teplotě do 4 °C. Vzorky byly analyzovány ještě v den vzorkování. V případech, kdy se nestihly zanalyzovat všechny parametry, bylo nutné vzorky uložit do lednice. V analýze se pak pokračovalo následující den.

#### 4.3.2 Plán vzorkování

Typ vzorkování: prosté, aktivní, periodické

Časové období: každé druhé úterý od 1.2.2022 do 15.3.2022, následně každé úterý do 29.3.2022

Čas odběru: 9:30

#### Počasí a teplota:

- 1.2.2022 Jasno, 5 °C
- 15.2.2022 Polojasno, 1 °C
- 1.3.2022 Jasno, -2 °C
- 15.3.2022 Jasno, 7 °C
- 22.3.2022 Jasno, 9 °C
- 29.3.2022 Jasno, 12 °C

**Místo odběru vzorků:** UF-RO jednotka umístěná na mechanicko-biologické ČOV s nitrifikačním a denitrifikačním stupněm s počtem ekvivalentních obyvatel: 529 073 EO (2019) [160]

Počet a typ vzorkovnice: tři vzorkovnice z HDPE materiálu každá o objemu 1000 ml

Způsob přepravy vzorkovnice: přepravní box

Způsob skladování vzorkovnice: lednice při teplotě do 4 °C

#### 4.3.3 Stanovení chemické spotřeby kyslíku manganistanem draselným

Postup byl zpracován v souladu s českou normou ČSN EN ISO 8467:1997 Jakost vod – Stanovení chemické spotřeby kyslíku manganistanem (CHSK<sub>Mn</sub>) [161].

Nejdříve byl připraven zásobní roztok kyseliny sírové (7,5 mol/l), zásobní roztok šťavelanu sodného (0,05 mol/l) a zásobní roztok manganistanu draselného (20 mmol/l). Z těchto zásobních roztoků byly následně připraveny odměrné roztoky kyseliny sírové (2 mol/l), šťavelanu sodného (5 mmol/l) a manganistanu draselného (2 mmol/l).

Do titračních baněk bylo připraveno 25 ml zředěného vzorku a 5 ml kyseliny sírové (2 mol/l). Taktéž bylo provedeno slepé stanovení, kde bylo do jedné titrační banky napipetováno 25 ml destilované vody. Titrační banky byly vařeny na vařiči ETA po dobu 10 minut. Potom byly odstaveny a do každé banky se přidalo 5 ml odměrného roztoku šťavelanu sodného (5 mmol/l). Po odbarvení roztoku byla provedena titrace odměrným roztokem manganistanu draselného (2 mmol/l). Roztok po titraci slepého stanovení byl dále využit ke kalibraci odměrného roztoku 5 ml odměrného roztoku 5 ml odměrného (2 mmol/l). Při kalibraci bylo přidáno do roztoku 5 ml odměrného roztoku šťavelanu sodného (5 mmol/l). Tento roztok byl titrován za horka odměrným roztokem manganistanu draselného (2 mmol/l).

#### 4.3.3.1 Výpočet CHSK<sub>Mn</sub>

Rovnice č.5 vyjadřuje výpočet hodnoty CHSK<sub>Mn</sub>. Níže je vysvětlen význam jednotlivých členů této rovnice.

$$CHSK_{Mn} = \frac{V_1 - V_0}{V_2} \cdot f \tag{5}$$

Vo spotřeba roztoku manganistanu k titraci slepého stanovení

V<sub>1</sub> spotřeba roztoku manganistanu k titraci zkoušeného objemu vzorku

V2 spotřeba roztoku manganistanu k titraci při kalibraci

f přepočítávací faktor k přepočtu na kyslík

**Rovnice č.6** vyjadřuje výpočet přepočítávacího faktoru. Níže je vysvětlen význam jednotlivých členů této rovnice.

$$f = \frac{V_4 \cdot c(\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4) \cdot M_0 \cdot 1000}{1000 \cdot V_5} \tag{6}$$

V4 objem odměrného roztoku šťavelanu sodného, v mililitrech

 $c(Na_2C_2O_4)$  hodnota látkové koncentrace odměrného roztoku šťavelanu sodného, v milimolech na litr

1000 (v čitateli) je přepočítávací faktor k převodu  $c(Na_2C_2O_4)$  z mmol/l na mmol/ml, v mililitrech na litr

Mo molekulární hmotnost kyslíku v miligramech na milimol, k přepočtu na kyslík

V5 objem vzorku vzatý do práce, v mililitrech

1000 (ve jmenovateli) je přepočítávací faktor k převodu změřené hodnoty na 1 litr vzorku, v mililitrech na litr

#### 4.3.4 Stanovení chemické spotřeby kyslíku dichromanem draselným

Byly využité kyvetové testy Spectroquant ® pro stanovení CHSK<sub>Cr</sub> (v rozmezí 25–1500 mg/l) a od firmy Merck spol. s.r.o a kyvetové testy Spectroquant ® pro stanovení CHSK<sub>Cr</sub> (v rozmezí 15–300 mg/l) a od firmy Merck spol. s.r.o, které jsou analogické s německou normou *DIN ISO 15705 – Jakost vod - Stanovení chemické spotřeby kyslíku (CHSK<sub>Cr</sub>) - Metoda ve zkumavkách* [162].

Do připravené reakční zkumavky s reagentem bylo napipetováno 3 ml koncentrátu při použití testu s vyšším rozsahem. U testu s nižším rozsahem stačilo napipetovat 2 ml koncentrátu do reakční zkumavky. Roztok ve zkumavce byl promíchán a nechal se zahřát na 148 °C na dvě hodiny. Po dvou hodinách se reakční zkumavka nechala odstát při laboratorní teplotě alespoň po dobu 30 minut. Poté byla zjištěna hodnota CHSK<sub>Cr</sub> pomocí spektrofotometru.

#### 4.3.5 Stanovení biochemické spotřeby kyslíku po 5 dnech

Postup byl zpracován v souladu s českou normou ČSN EN ISO 5815-1 Kvalita vod – Stanovení biochemické spotřeby kyslíku po n dnech  $(BOD_n) - Čast 1$ : Zřeďovací a očkovací metoda s přídavkem allylthiomočoviny [163].

Nejprve byly odlity 3 l destilované vody, která byla následně provzdušňována kyslíkem po dobu 2 hodin a poté byla ponechána v klidu na 30 minut. Na přípravu ředící vody bylo nutné připravit roztoky solí, konkrétně fosforečnanový tlumivý roztok, roztok heptahydrátu síranu hořečnatého (22,5 g/l), roztok chloridu vápenatého (27,5 g/l) a roztok hexahydrátu chloridu železitého (0,25 g/l). Do nádoby na ředící vodu byly nality 2 l provzdušněné destilované vody. Do této nádoby bylo napipetováno 2 ml od každého roztoku soli. Dále byl připraven kontrolní roztok glukózy a kyseliny glutamové a roztok N-allylthiomočoviny (1,0 g/l).

Do nádob (250 ml) bylo napipetováno požadované množství zkoušeného vzorku v závislosti na vybraných zřeďovacích faktorech a bylo do nich přidáno 0,5 ml roztoku N-allylthiomočoviny (1,0 g/l). Tyto nádoby (250 ml) byly doplněny očkovací vodou. Dále byl připraven roztok slepého stanovení, která byla naplněna pouze očkovací vodou a 0,5 ml roztoku N-allylthiomočoviny (1,0 g/l). Do jiné nádoby (250 ml) bylo napipetováno 5 ml kontrolního roztoku a 0,5 ml roztoku N-allylthiomočoviny (1,0 g/l). Byl tak připraven kontrolní vzorek. Potom byly změřeny počáteční koncentrace kyslíku u všech nádob (250 ml). Následně se všechny nádoby uzavřely zátkou, aby v nich nevznikla bublina a nádoby se přemístily do inkubátoru bez přístupu světla. Pátý den byla změřena konečná koncentrace kyslíku u všech nádob (250 ml).

#### 4.3.5.1 Výpočet BSK<sub>n</sub>

Výpočet  $BSK_n$  je vyjádřen **rovnicí č.7**. Níže je vysvětlen význam jednotlivých členů této rovnice.

$$BSK_{n} = \left[ (\rho_{1} - \rho_{2}) - \frac{V_{t} - V_{sam}}{V_{t}} \cdot (\rho_{3} - \rho_{4}) \right] \cdot \frac{V_{t}}{V_{sam}}$$
(7)

 $r_1$ koncentrace rozpuštěného kyslíku některého ze zkoušených roztoků v čase nula v miligramech na litr

 $r_2$  koncentrace rozpuštěného kyslíku téhož roztoku po n dnech inkubace v miligramech na litr

 $r_3$ koncentrace rozpuštěného kyslíku roztoku pro slepé stanovení v čase nula v miligramech na litr

 $r_4$  koncentrace rozpuštěného kyslíku roztoku pro slepé stanovení po n dnech inkubace v miligramech na litr

 $V_{\rm sam}$ objem vzorku použitého k přípravě příslušného zkoušeného roztoku v mililitrech

Vt celkový objem tohoto zkoušeného roztoku v mililitrech

#### 4.3.6 Stanovení rozpuštěných látek a nerozpuštěných látek

Postup byl zpracován v souladu s českou normou ČSN 75 7346 Jakost vod – Stanovení rozpuštěných látek [164]. a českou normou ČSN EN 872 Jakost vod – Stanovení nerozpuštěných látek – Metoda filtrace filtrem ze skleněných vláken [165]. Dvě porcelánové misky byly sušeny v peci a poté byly ochlazeny v exsikátoru. Porcelánové misky byly zváženy. Dva filtry byly taktéž zváženy. Poté byl koncentrát zfiltrován pomocí filtrace za sníženého tlaku. Zfiltrovaný koncentrát byl nalit do porcelánových misek a byl sušen v sušárně při teplotě 105 °C po dobu 1 hodiny. Použité filtry byly sušeny při teplotě 105 °C po dobu 1 hodiny. Použité filtry byly sušeny při teplotě 105 °C po dobu 1 hodiny. Použité filtry byly sušeny při teplotě 105 °C po teplota sušárny na 180°C. Po uplynutí 2 h byly porcelánové misky ponechány k ochladnutí. Poté byly zváženy porcelánové misky a filtry na analytických vahách. Rozdíl hmotnosti porcelánových misek před a po stanovení

udává hmotnost rozpuštěných látek. Rozdíl hmotnosti filtrů před a po stanovení udává hmotnost nerozpuštěných látek.

#### 4.3.7 Stanovení dusičnanů

Byly využité analytické soupravy Spectroquant  $(0, 10-25, 0 \text{ mg/l NO}_3-N)$  od firmy Merck spol. s.r.o, které jsou analogické s německou normou DIN 38405-9 – German standard methods for examination of water, waste water and sludge - Anions (group D) - Part 9: Spectrometric determination of nitrate (D 9) [166].

Do připravené reakční zkumavky bylo napipetováno 4 ml reagentu NO<sub>3</sub><sup>-1</sup>, 0,5 ml koncentrátu a 0,5 ml reagentu NO<sub>3</sub><sup>-2</sup>. Roztok byl promíchán a nechal se odstát 10 minut. Poté byla zjištěna koncentrace NO<sub>3</sub>-N pomocí spektrofotometru.

#### 4.3.8 Stanovení dusitanů

Byly využité analytické soupravy Spectroquant ® pro stanovení dusitanů (0,002-1,00 mg/l NO<sub>2</sub>-N) od firmy Merck spol. s.r.o, které jsou analogické s *US Standard Methods*  $4500-NO_2^{-1}$  *B NITROGEN (NITRITE)* [167].

Do připravené reakční zkumavky bylo napipetováno 5 ml koncentrátu a 1 lžička reagentu NO<sub>2</sub><sup>-</sup> 1. Roztok byl promíchán a nechal se odstát 10 minut. Poté byla zjištěna koncentrace NO<sub>2</sub>-N pomocí spektrofotometru.

#### 4.3.9 Stanovení amonných kationtů

Byly využité analytické soupravy Spectroquant ® pro stanovení amonných iontů (v rozmezí 0,010–3,00 mg/l NH<sub>4</sub>-N) od firmy Merck spol. s.r.o, které jsou analogické s normou *ISO* 7150/1 – Jakost vod. Stanovení amonných iontů. Část 1: Manuální spektrometrická metoda [168].

Do připravené reakční zkumavky bylo napipetováno 5 ml koncentrátu a 0,6 ml reagentu NH<sub>4</sub>-1. Roztok byl promíchán a byla do něj přidána 1 lžička reagentu NH<sub>4</sub>-2. Roztok byl promíchán a nechal se odstát 5 minut. Do reakční zkumavky byly poté přidány 4 kapky reagentu NH<sub>4</sub>-3. Roztok se znovu nechal odstát 5 minut. Potom byla zjištěna koncentrace NH<sub>4</sub>-N pomocí spektrofotometru.

#### 4.3.10 Stanovení chloridů

Byly využité analytické soupravy Spectroquant ® pro stanovení chloridů (v rozmezí 3-300 mg/l Cl) od firmy Merck spol. s.r.o.

Stanovení chloridů probíhalo pouze pomocí okometrického komparátoru, protože k dispozici nebyly jiné testy. Do dvou zkumavek bylo odpipetováno 6 ml koncentrátu. Do první zkumavky byly navíc přidány 6 kapky reagentu Cl<sup>-</sup>1 a Cl<sup>-</sup>2. První zkumavka byla promíchána. Následně se pomocí okometrického komparátoru zjistila přibližná koncentrace chloridů.

#### 4.4 UF-RO Jednotka

Koncentrát byl vzorkován z pilotní poloprovozní membránové jednotky firmy ASIO TECH spol. s.r.o. Tato jednotka se nachází na městské čistírně odpadních vod. Princip jednotky spočívá ve spojení ultrafiltrace a reverzní osmózy. Celý systém je uložen ve dvou lodních kontejnerech. V prvním kontejneru probíhá in-line koagulace koagulantem Prefloc o dávce 50 ml/m<sup>3</sup> a ultrafiltrace. Retentát z ultrafiltrace je vypouštěn do kanalizačního systému a permeát pokračuje dále do druhého kontejneru, kde se hromadí ve dvou nádržích. Ve druhém kontejneru je permeát čištěn reverzní osmózou, před kterou je dávkovaný antiscalant VITEC

3000 o dávce 5 g/m<sup>3</sup>. Vzniklý koncentrát je vypouštěn do kanalizačního systému. Permeát je následně shromažďován v nádrži.

Ultrafiltrační membránový modul pochází od společnosti společnosti Inge GmbH (DuPont) typu XL-1,5 MB-40, který obsahuje membránu typu Multibore® 1.5. Reverzně-osmotický modul je dodaný od společnosti Lenntech typu CSM® 4040-BLF tvořený vnitřní spirálovo-vinutou tenkovrstvou polyamidovou membránou.

### 5 VÝSLEDKY A DISKUZE

#### 5.1 Základní parametry

Základními parametry, měřenými v této práci, byla teplota, konduktivita a pH. Běžnými stanovovanými parametry jsou dále rozpuštěné a nerozpuštěné látky, které byly taktéž měřeny. Tyto parametry uvedené v **Tabulce 6** poskytují předběžný obraz o složení analyzované vody.

Teplota patří do organoleptických parametrů, která má vliv na biochemické procesy probíhající ve vodě. Proto je důležité uchovávat vzorek v chladu, aby tyto procesy probíhaly co možná nejméně.

Konduktivita udává přibližnou míru koncentrace anorganických a organických iontů. Naměřené hodnoty konduktivit uvedené v **Tabulce 6** se pohybovaly v rozmezí 1,89-3,22 mS/cm. Nejnižší naměřené hodnoty bylo dosaženo u měření č. 2 a nejvyšší hodnoty bylo dosaženo u měření č. 4. Aritmetický průměr naměřených hodnot činí 2,92 mS/cm a medián nabývá hodnoty 3,125 mS/cm. *Nařízení vlády č. 445/2021 Sb* [1] se nijak nevyjadřuje k limitním hodnotám konduktivity při vypouštění odpadních vod do vod povrchových. Nicméně pro srovnání, ve studiích uvedených v **Tabulce 7** autoři stanovovali konduktivitu u koncentrátu z reverzní osmózy, kde vstupní vodou byla voda z čistírny komunálních vod. Hodnoty konduktivit se pohybovaly od 1,705 do 11,1 mg/l a vykazují až na vyšší hodnoty poměrně dobrou spojitost s mými naměřenými hodnotami.

Rozpuštěné látky (RL) vyjadřují přibližnou míru koncentrace anorganických a organických látek rozpuštěných ve vodě. Naměřené koncentrace rozpuštěných látek uvedených v **Tabulce 6** se pohybovaly v rozmezí od 1,19 do 1,61 g/l. Nejnižší naměřené hodnoty bylo dosaženo u měření č. 3 a nejvyšší hodnoty bylo dosaženo u měření č. 1. Aritmetický průměr naměřených hodnot činí 1,354 g/l a medián nabývá hodnoty 1,271 g/l. Stejně jako u hodnot konduktivit nelze ani zde porovnat naměřené hodnoty s *Nařízením vlády č. 445/2021 Sb* [1]. Ve studiích uvedených v **Tabulce 7** se koncentrace rozpuštěných látek pohybovaly v rozmezí 1,129-5,5 g/l.

Nerozpuštěné látky (NL) vyjadřují koncentraci pevných látek zachycených na skelném filtru. V **Tabulce 6** jsou uvedeny naměřené hodnoty koncentrací nerozpuštěných látek. Nejnižší naměřené hodnoty bylo dosaženo u měření č. 3 a nejvyšší hodnoty bylo dosaženo u měření č. 2. Aritmetický průměr naměřených hodnot činí 13,07 mg/l a medián nabývá hodnoty 13 mg/l. Naměřené hodnoty je možné porovnat s *Nařízením vlády č. 445/2021 Sb.* [1], které stanovuje pro odpadní vody vypouštěné z ČOV kategorie nad 100 000 EO přípustné hodnoty do 20 mg/l a maximální hodnoty do 40 mg/l [169]. Z naměřených hodnot vyplývá, že ani jedna hodnota nepřesáhla limity stanovené *Nařízením vlády č. 445/2021 Sb.* [1].

Měření č.	Datum	teplota při odběru [°C]	konduktivita [mS/cm]	pH [-]	rozpuštěné látky [g/l]	nerozpuštěné látky [mg/l]
1	01.02.2022	12	2,34	7,48	1,61	6,33
2	15.02.2022	13	1,89	7,56	1,44	17,00
3	01.03.2022	14	3,08	7,51	1,19	5,00
4	15.03.2022	14	3,22	7,42	1,27	9,00
5	22.03.2022	-	3,17	7,16		
6	29.03.2022	15	3,18	7,63	1,26	7,00

Tabulka 6: Naměřené hodnoty teplot, konduktivit, pH, rozpuštěných a nerozpuštěných látek

Tabulka 7: Hodnoty pH, konduktivit, rozpuštěných látek ze studií

Studie	pH [-]	konduktivita [mS/cm]	rozpuštěné látky [g/l]
Hurwitz et al. [106]	8,8	3,8	
Xiao Quan et al. [107]	7,9	10,16	5,5
Zhang et al. [108]		1,705	1,129
Zhang et al. [108]		1,972	1,218
Bagastyo et al. [109]	$8,\!03\pm0,\!08$	$5,02 \pm 0,11$	
Mohseni et al. [110]	$7,7 \pm 0,2$	$11,1 \pm 0,5$	$5,5 \pm 0,3$
Zhou et al. [102]	$6,9\pm0,2$	$1,\!71\pm0,\!02$	$1,13 \pm 0,04$
Liu et al. [111]	8,5	2,82	1,685
Justo et al. [112]	8,3	5,96	
Shanmuganathan et al. [113]	7,5	2,35	2,250

#### 5.2 Chemická spotřeba kyslíku

Chemická spotřeba kyslíku (CHSK) patří mezi parametry vyjadřující koncentraci organických látek ve stanovované vodě. Koncentrace organických látek je určena spotřebou kyslíku při oxidaci těchto látek za pomocí oxidačních činidel. Oxidačními činidly se rozumí manganistan draselný a dichroman draselný, které se liší svým použitím při analýze vod. Dichroman draselný má větší oxidační schopnost než manganistan draselný, a proto se se využívá při analýze odpadních vod. Výstupním parametrem je pak chemická spotřeba kyslíku dichromanem draselným (CHSK<sub>Cr</sub>). Chemická spotřeba kyslíku manganistanem draselným (CHSK<sub>Mn</sub>) se naopak používá pro přírodní vody a pitné vody.

První dvě hodnoty CHSK<sub>Mn</sub> chybějí z důvodu nefunkčnosti použité metody. Kyvetové testy CHSK<sub>Cr</sub> jsou poměrně drahé, a navíc při jejich použití vzniká toxický odpad. Hodnoty CHSK<sub>Cr</sub> byly tedy změřeny společně s kolegou, který shodou okolností měřil stejné vzorky koncentrátu jako já. V prvních dvou měřeních se využívaly kyvetové testy o rozsahu 25-1500 mg/l CHSK<sub>Cr</sub>. V následujících měřeních se používaly kyvetové testy o nižším rozsahu 15-300 mg/l CHSK<sub>Cr</sub>. Proto jsou první dvě hodnoty CHSK<sub>Cr</sub> mnohem vyšší než ostatní hodnoty.

Z **Grafu 1** vyplývá, že hodnoty  $CHSK_{Cr}$  se liší od hodnot  $CHSK_{Mn}$ . Literatura [169] uvádí, že hodnota  $CHSK_{Cr}$  vychází nejméně dvakrát až třikrát více než hodnota  $CHSK_{Mn}$ . Tento jev se potvrdil pouze u 6. měření, kde  $CHSK_{Mn}$  činila 25 mg/l a  $CHSK_{Cr}$  vyšla 76 mg/l.

Z **Grafu 1** je možné vyčíst, že naměřené hodnoty CHSK<sub>Mn</sub> se pohybovaly v rozmezí od 16 mg/l do 33 mg/l. Nejnižší naměřené hodnoty bylo dosaženo u měření č. 3 a nejvyšší hodnoty bylo dosaženo u měření č. 4. Aritmetický průměr naměřených hodnot činí 23,07 mg/l a medián nabývá hodnoty 21,78 mg/l. Naměřené hodnoty CHSK<sub>Cr</sub> při použitém rozsahu 25-1500 mg/l byly 138 mg/l a 140 mg/l. Při nižším rozsahu 15-300 mg/l byly naměřeny hodnoty CHSK<sub>Cr</sub> 5 mg/l, 24 mg/l a 76 mg/l. Nejnižší naměřené hodnoty bylo dosaženo u měření č. 3 a nejvyšší hodnoty bylo dosaženo u měření č. 3 a nejvyší hodnoty bylo dosaženo u měření č. 2. Aritmetický průměr naměřené hodnoty 21,78 mg/l a 76 mg/l. Nejnižší naměřené hodnoty bylo dosaženo u měření č. 3 a nejvyší hodnoty bylo dosaženo u měření č. 2. Aritmetický průměr naměřených hodnot činí 35 mg/l a medián nabývá hodnoty 24 mg/l.

Naměřené hodnoty  $CHSK_{Cr}$  je možné porovnat s hodnotami  $CHSK_{Cr}$  ze studií uvedených v **Tabulce 8**, které autoři stanovovali u koncentrátů pocházejících z komunální čistírny odpadních vod. Hodnoty  $CHSK_{Cr}$  se pohybovaly od 60 mg/l do 164 mg/l.

Měření hodnot CHSK<sub>Cr</sub> mohlo být ovlivněno přítomností chloridů a dusíkatých látek, které svými vedlejšími reakcemi zkreslují výslednou hodnotu. Hodnoty CHSK<sub>Mn</sub> mohly být ovlivněny nízkou oxidační schopností manganistanu draselného. *Nařízení vlády č. 445/2021 Sb.* [1] stanovuje limity CHSK<sub>Cr</sub> pro ČOV vypouštějící odpadní vody do vod povrchových. Pro ČOV nad 100 000 EO platí přípustná hodnota CHSK<sub>Cr</sub> nepřesahující 75 mg/l a maximální hodnota CHSK<sub>Cr</sub> nepřesahující 125 mg/l. Maximální hodnota CHSK<sub>Cr</sub> byla překročena při prvním a druhém měření.



Graf 1: Naměřené hodnoty CHSK<sub>Mn</sub> v porovnání s hodnotami CHSK<sub>Cr</sub>

Tabulka 8: Hodnoty CHSK<sub>Cr</sub> ze studií

Studie	CHSK <sub>Cr</sub> [mg/l]
Xiao Quan et al. [107]	80–90
Zhang et al. [108]	60
Zhang et al. [108]	64,6
Mohseni et al. [110]	$164,0\pm7,8$
Zhou et al. [102]	$60 \pm 5$
Liu et al. [111]	65
Shanmuganathan et al. [113]	77,5

#### 5.3 Biochemická spotřeba kyslíku

Biochemická spotřeba kyslíku (BSK<sub>n</sub>) je další z parametrů vyjadřující koncentraci organických látek ve vodě. Tento parametr je charakterizován jako koncentrace kyslíku spotřebovaného při biochemické oxidaci organických látek za aerobních podmínek. Koncentrace kyslíku se vlivem oxidace v čase snižuje. Běžně se hodnota BSK<sub>n</sub> stanovuje po 5 nebo 7 dnech.

V této práci byla BSK<sub>n</sub> stanovována po pěti dnech. První a druhé měření BSK<sub>5</sub> nevycházela. Hodnoty BSK<sub>5</sub> začaly vycházet až na třetím měření, kdy se při měření koncentrace kyslíku pomocí oximetru použilo míchadélko a elektrická míchačka. Mícháním připravených vzorků se dosáhlo zvýšení přesnosti měření. Páté měření se nepodařilo z důvodu výskytu kyslíkových bublin v nádobách, které bylo pravděpodobně způsobeno špatným uzavřením nádob. Z **Tabulky 9** je možné vidět, že se naměřené hodnoty BSK<sub>5</sub> pohybovaly v rozmezí 5,04-5,53 mg/l. Nejnižší naměřené hodnoty bylo dosaženo u měření č. 6 a nejvyšší hodnoty bylo dosaženo u měření č. 4. Aritmetický průměr naměřených hodnot činí 5,33 mg/l a medián nabývá hodnoty 5,43 mg/l. Hodnoty BSK<sub>5</sub> se pohybují pod přípustnou koncentrací 15 mg/l i maximální koncentrací 30 mg/l danou *Nařízením vlády č. 445/2021 Sb* [1].

Měření č.	Datum	BSK5 [mg/l]
1	01.02.2022	
2	15.02.2022	
3	01.03.2022	5,43
4	15.03.2022	5,53
5	22.03.2022	
6	29.03.2022	5,04

Tabulka 9: Naměřené hodnoty BSK5

#### 5.4 Dusičnanové, dusitanové a amonné ionty

Dusičnanové, dusitanové a amonné ionty patří k parametrům poukazujícím na možné fekální znečištění vod. Nadměrné množství dusíku se projevuje eutrofizací vod [170]. Vzhledem k tomu, že původem koncentrátu v této práci je právě čistírna městských odpadních vod, tak jsou tyto ionty jasnými ukazateli fekálního znečištění. Problémem při měření těchto iontů je, že podléhají biochemickým reakcím, resp. redukci dusičnanů na molekulární dusík a oxidaci amoniakálního dusíku na dusitany a dusičnany.

Z **Tabulky 10** je možné vyčíst vysoký rozptyl naměřených hodnot u všech tří stanovovaných iontů. Tento rozptyl mohl být způsoben výše zmiňovanými biochemickými reakcemi. Naměřené koncentrace amonných iontů se pohybovaly v rozmezí od 0,24 do 2,56 mg/l. Nejnižší naměřené hodnoty bylo dosaženo u měření č. 1 a nejvyšší hodnoty bylo dosaženo u měření č. 5. Aritmetický průměr naměřených hodnot činí 1,03 mg/l a medián nabývá hodnoty 0,82 mg/l. Ze studií uvedených v **Tabulce 11** byly vybrány hodnoty amonných iontů, které byly naměřeny u koncentrátů z reverzní osmózy, kde vstupní vodou byla odpadní voda z komunální čistírny odpadních vod. Hodnoty amonných iontů se pohybovaly v rozmezí 0,07-3,35 mg/l.

Naměřené koncentrace dusičnanových iontů se pohybovaly v rozmezí od 50 mg/l do 175 mg/l. Nejnižší naměřené hodnoty bylo dosaženo u měření č. 2 a nejvyšší hodnoty bylo dosaženo u měření č. 6. Aritmetický průměr naměřených hodnot činí 104 mg/l a medián nabývá hodnoty 96 mg/l. V **Tabulce 11** jsou uvedeny hodnoty dusičnanových iontů, které byly naměřeny u koncentrátů z reverzní osmózy, kde vstupní vodou byla odpadní voda z komunální čistírny odpadních vod. Hodnoty dusičnanových iontů se pohybovaly v rozmezí 24-164,7 mg/l.

Naměřené koncentrace dusitanových iontů se pohybovaly v rozmezí od 0,15 do 6,50 mg/l. Nejnižší naměřené hodnoty bylo dosaženo u měření č. 1 a nejvyšší hodnoty bylo dosaženo u měření č. 6. Aritmetický průměr naměřených hodnot činí 2,33 mg/l a medián nabývá hodnoty 0,33 mg/l. **Tabulka 11** uvádí hodnoty dusitanových iontů, které byly naměřeny u koncentrátů z reverzní osmózy, kde vstupní vodou byla odpadní voda z komunální čistírny odpadních vod. Hodnoty dusičnanových iontů se pohybovaly v rozmezí 0,62-5,58 mg/l.

*Nařízení vlády č. 445/2021 Sb.* [1] nespecifikuje limity pro dusičnanové a dusitanové ionty. U amoniakálního dusíku se objevují limity jen u čistíren odpadních vod kategorie 500 - 2000 EO a 2001 - 10000 EO. Jediné, co by se mohlo vzít v úvahu jsou limity pro celkový dusík, kterými jsou aritmetický průměr za kalendářní rok 10 mg/l a maximální hodnota koncentrace celkového dusíku 20 mg/l. Celkový dusík je dán součtem anorganického dusíku a organického dusíku. Anorganický dusík je tvořen dusitanovým dusíkem, dusičnanovým dusíkem a amoniakálním dusíkem. Pokud by se sečetly naměřené hodnoty uvedené v **Tabulce 10**, tak jen anorganického dusíku vešla do limitu 20 mg/l. Otázkou by bylo, jak by dopadlo měření organického dusíku, který v této práci nebyl měřen. A jaký by byl aritmetický průměr za kalendářní rok, kde nesmí být překročena hodnota 10 mg/l. Z těchto naměřených dat nelze nic jiného než konstatovat, že analyzovaný koncentrát by nesplnil podmínku pro vypouštění koncentrátu do povrchových vod danou *Nařízením vlády č. 445/2021 Sb* [1].

Měření č.	Datum	NH4 <sup>+</sup> [mg/l]	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> [mg/l]	NO2 <sup>-</sup> [mg/l]	Součet anorganického dusíku [mg/l]
1	01.02.2022	0,24	81	0,15	18,39
2	15.02.2022	0,40	50	0,33	11,46
3	01.03.2022				
4	15.03.2022	1,10			
5	22.03.2022	2,56	111		
6	29.03.2022	0,82	175	6,50	41,19

Tabulka 10: Naměřené hodnoty amonných iontů, dusičnanových iontů a dusitanových iontů

Tabulka 11: Hodnoty amonných, dusičnanových a dusitanových iontů ze studií

Studie	NH₄⁺ [mg/l]	NO3 <sup>-</sup> [mg/l]	NO2 <sup>-</sup> [mg/l]
Xiao Quan et al. [107]	0,07	31,87	0,62
Zhang et al. [108]		91	
Zhang et al. [108]		88,5	
Bagastyo et al. [109]		$50,7\pm7,8$	$1,22 \pm 0,07$
Mohseni et al. [110]	$3,35 \pm 0,13$	$164,7 \pm 6,6$	$5{,}58\pm0{,}26$
Zhou et al. [102]		$91\pm4$	$2 \pm 1$
Liu et al. [111]		35	
Justo et al. [112]	3,23	83,7	
Shanmuganathan et al. [113]		23–26	1,3–1,5

#### 5.5 Chloridy

Chloridy se řadí k parametrům, které mohou indikovat fekální původ odpadních vod, protože člověk vyloučí denně močí asi 9 g chloridů [169]. Dalším zdrojem chloridů mohou být posypové soli využívající se v zimním období.

Naměřené hodnoty chloridových iontů byly měřeny pouze semikvantitativně prostřednictvím analytického setu s okometrickým komparátorem. **Tabulka 12** obsahuje naměřené hodnoty koncentrací chloridových iontů. Tyto koncentrace se pohybovaly v rozmezí od 100 mg/l do 300 mg/l. Nejnižší naměřené hodnoty bylo dosaženo u měření č. 2 a nejvyšší hodnoty bylo dosaženo u měření č. 3 a č. 6. Aritmetický průměr naměřených hodnot činí 218 mg/l a medián nabývá hodnoty 215 mg/l. Pro srovnání jsou uvedeny v **Tabulce 12** hodnoty chloridových iontů ze studií, kde autoři analyzovali koncentráty z reverzní osmózy. Vstupní voda pocházela

z komunální čistírny odpadních vod. Hodnoty chloridových iontů ze studií se pohybovaly v rozmezí 256-1229 mg/l. Prosté povrchové a podzemní vody mívají koncentrace chloridů v řádech jednotek až desítek mg/l.

Měření č.	Datum	Cl <sup>-</sup> [mg/l]	Studie	Cl <sup>-</sup> [mg/l]
1	01.02.2022	250	Hurwitz et al. [106]	954
2	15.02.2022	100	Bagastyo et al. [109]	$1229\pm25$
3	01.03.2022	300	Zhou et al. [102]	$256\pm16$
4	15.03.2022	180	Liu et al. [111]	780
5	22.03.2022	300	Justo et al. [112]	1540
6	29.03.2022	180	Shanmuganathan et al. [113]	400–600

Tabulka 12: Naměřené hodnoty chloridových iontů a hodnoty chloridových iontů z vybraných studií

## 6 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývá studiem koncentrátu a jeho nakládáním v legislativním prostředí České republiky. Dále jsou zde popsány tlakové membránové procesy se stručnou kapitolou o jejich aplikacích. Samostatná kapitola je věnována koncentrátu, kde se řeší možnosti nakládání s koncentrátem v souladu s českou legislativou a různé způsoby čištění koncentrátu. V této práci byl využit koncentrát z pilotní membránové jednotky firmy ASIO TECH s.r.o, do které byla přiváděna vyčištěná voda z městské čistírny odpadních vod.

V experimentální části byly stanoveny základní parametry, kterými byly teplota, pH a konduktivita. Následně byly určeny hodnoty rozpuštěných a nerozpuštěných látek, chemická spotřeba kyslíku manganistanem draselným a dichromanem draselným a biologická spotřeba kyslíku. V neposlední řadě byly stanoveny hodnoty amonných, dusitanových, dusičnanových a chloridových iontů.

Vypouštění odpadních vod do vod povrchových a podzemních je rámci legislativního prostředí České republiky regulováno Zákonem č. 544/2020 Sb. [100], Nařízením vlády č. 445/2021 Sb. [1] a Nařízením vlády č. 57/2016 Sb. [128]. Na základě Zákonu č. 544/2020 Sb. [100], nelze přímo vypouštět odpadní vodu do povrchových a podzemních vod. Odpadní voda vypouštěná do povrchových a podzemních vod musí splňovat emisní limity a podmínky uvedené v povolení k jejich vypouštění dané vodoprávním úřadem. Nařízení vlády č. 57/2016 Sb. [128] se ovšem týká jen staveb pro bydlení a rodinnou rekreaci a staveb poskytující ubytovací služby, proto nebylo v této práci bráno v potaz.

Naměřené hodnoty byly porovnány s limity stanovené *Nařízením vlády č. 445/2021 Sb* [1]. V tomto nařízení jsou čistírny odpadních vod rozděleny do pěti kategorií na základě počtu ekvivalentních obyvatel. Čistírna odpadních vod, na které se nachází pilotní membránová jednotka – původce analyzovaného koncentrátu, se dle tohoto nařízení řadí do kategorie nad 100 000 EO. Každá kategorie má určeny své emisní limity.

U nerozpuštěných látek jsou přípustné hodnoty do 20 mg/l a maximální hodnoty do 40 mg/l [169]. Naměřené hodnoty nerozpuštěných látek nepřekročily dané limity. Chemická spotřeba kyslíku dichromanem draselným může překročit přípustnou hodnotu CHSK<sub>Cr</sub> do 75 mg/l, nicméně maximální hodnota do 125 mg/l už nesmí být překročena [169]. Naměřené hodnoty CHSK<sub>Cr</sub> překročily dané limity. Biologická spotřeba kyslíku po pěti dnech má stanovenou překročitelnou přípustnou hodnotu 15 mg/l a nepřekročitelnou maximální hodnotu 30 mg/l. Limity naměřených hodnot BSK<sub>5</sub> nebyly překročeny ani v jednom případě. *Nařízení vlády č. 445/2021 Sb* [1] dále stanovuje limity pro celkový dusík (organický + anorganický dusík), kterými jsou aritmetický průměr za kalendářní rok 10 mg/l a maximální hodnota koncentrace celkového dusíku 20 mg/l [1]. Vysoké naměřené hodnoty 20 mg/l.

Celkově lze říci, že analyzovaný koncentrát by nesplnil podmínky uvedené v *Nařízení vlády* č. 445/2021 Sb. [1] vzhledem k výše překročeným limitům. Koncentrát by se tedy musel dále přečišťovat před vypouštěním do povrchových vod. K přečištění by se mohly využít některé metody uvedené v kapitole 2.3.2.

## 7 POUŽITÁ LITERATURA

[1] Nařízení vlády č. 445/2021 Sb.: Nařízení vlády, kterým se mění nařízení vlády č. 401/2015 Sb., o ukazatelích a hodnotách přípustného znečištění povrchových vod a odpadních vod, náležitostech povolení k vypouštění odpadních vod do vod povrchových a do kanalizací a o citlivých oblastech. In: Zákony pro lidi [online]. [cit. 2022-04-26]. Dostupné z: https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2021-445#cl2

[2] Základní membránové procesy. První. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2021. ISBN 978-80-7592-023-2.

[3] PALATÝ, Zdeněk. Membránové procesy. Praha: Vysoká škola chemickotechnologická, 2021.

[4] MIKULÁŠEK, Petr. Tlakové membránové procesy. První. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2021.

[5] JELÍNEK, Luděk. Desalinační a separační metody v úpravě vody [online]. První. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2009 [cit. 2021-11-28]. ISBN 978-80-7080-705-7. Dostupné z: https://vydavatelstvi.vscht.cz/katalog/publikace?uid=uid\_isbn-978-80-7080-705-7

[6] SHIRAZI, Saqib, Che-Jen LIN a Dong CHEN. Inorganic fouling of pressure-driven membrane processes — A critical review. Desalination [online]. 2010, 250(1), 236-248 [cit. 2022-01-16]. ISSN 00119164. Dostupné z: doi:10.1016/j.desal.2009.02.056

[7] LU, Cheng, Yiwen BAO a Jen-Yi HUANG. Fouling in membrane filtration for juice processing. Current Opinion in Food Science [online]. 2021, 42, 76-85 [cit. 2022-01-16]. ISSN 22147993. Dostupné z: doi:10.1016/j.cofs.2021.05.004

[8] GAO, Wei, Heng LIANG, Jun MA, Mei HAN, Zhong-lin CHEN, Zheng-shuang HAN a Gui-bai LI. Membrane fouling control in ultrafiltration technology for drinking water production: A review. Desalination [online]. 2011, 272(1-3), 1-8 [cit. 2022-01-16]. ISSN 00119164. Dostupné z: doi:10.1016/j.desal.2011.01.051

[9] ŠKORVAN, Ondřej. Znázornění separačních vlastností v závislosti na zvolené technologii. In: Asio: čištění a úprava vod [online]. [cit. 2022-01-20]. Dostupné z: https://www.asio.cz/cz/264.tlakove-membranove-procesy-ve-vodnim-hospodarstvi

[10] ANIS, Shaheen Fatima, Raed HASHAIKEH a Nidal HILAL. Microfiltration membrane processes: A review of research trends over the past decade. Journal of Water Process Engineering [online]. 2019, 32 [cit. 2021-11-30]. ISSN 22147144. Dostupné z: doi:10.1016/j.jwpe.2019.100941

[11] ANIS, Shaheen Fatima, Raed HASHAIKEH a Nidal HILAL. Reverse osmosis pretreatment technologies and future trends: A comprehensive review. Desalination [online]. 2019, 452, 159-195 [cit. 2022-01-15]. ISSN 00119164. Dostupné z: doi:10.1016/j.desal.2018.11.006

[12] BELGADA, Abdessamad, Brahim ACHIOU, Saad ALAMI YOUNSSI, Fatima Zohra CHARIK, Mohamed OUAMMOU, Jason A. CODY, Rachid BENHIDA a Khaoula KHALESS. Low-cost ceramic microfiltration membrane made from natural phosphate for pretreatment of raw seawater for desalination. Journal of the European Ceramic Society [online]. 2021, 41(2), 1613-1621 [cit. 2022-01-17]. ISSN 09552219. Dostupné z: doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2020.09.064

[13] BEHROOZI, Amir Hossein a Maryam Rostami ATAABADI. Improvement in microfiltration process of oily wastewater: A comprehensive review over two decades.

Journal of Environmental Chemical Engineering [online]. 2021, 9(1) [cit. 2022-01-17]. ISSN 22133437. Dostupné z: doi:10.1016/j.jece.2020.104981

[14] WARSINGER, David M., Sudip CHAKRABORTY, Emily W. TOW et al. A review of polymeric membranes and processes for potable water reuse. Progress in Polymer Science [online]. 2018, 81 [cit. 2022-01-17]. ISSN 00796700. Dostupné z: doi:10.1016/j.progpolymsci.2018.01.004

[15] CARTER, B.G., N. CHENG, R. KAPOOR, G.H. MELETHARAYIL a M.A. DRAKE. Invited review: Microfiltration-derived casein and whey proteins from milk. Journal of Dairy Science [online]. 2021, 104(3), 2465-2479 [cit. 2022-01-17]. ISSN 00220302. Dostupné z: doi:10.3168/jds.2020-18811

[16] BLAIS, Herehau, Quang Tri HO, Eoin G. MURPHY, Karin SCHROËN a John T. TOBIN. A cascade microfiltration and reverse osmosis approach for energy efficient concentration of skim milk. Journal of Food Engineering [online]. 2021, 300 [cit. 2022-01-20]. ISSN 02608774. Dostupné z: doi:10.1016/j.jfoodeng.2021.110511

[17] CIMINI, Alessio a Mauro MORESI. Combined enzymatic and crossflow microfiltration process to assure the colloidal stability of beer. LWT [online]. 2018, 90, 132-137 [cit. 2022-01-17]. ISSN 00236438. Dostupné z: doi:10.1016/j.lwt.2017.12.008

[18] EL RAYESS, Y., C. ALBASI, P. BACCHIN, P. TAILLANDIER, J. RAYNAL, M. MIETTON-PEUCHOT a A. DEVATINE. Cross-flow microfiltration applied to oenology: A review. Journal of Membrane Science [online]. 2011, 382(1-2), 1-19 [cit. 2022-01-17]. ISSN 03767388. Dostupné z: doi:10.1016/j.memsci.2011.08.008

[19] ROUQUIÉ, Camille, Layal DAHDOUH, Julien RICCI, Christelle WISNIEWSKI a Michèle DELALONDE. Immersed membranes configuration for the microfiltration of fruitbased suspensions. Separation and Purification Technology [online]. 2019, 216, 25-33 [cit. 2022-01-17]. ISSN 13835866. Dostupné z: doi:10.1016/j.seppur.2019.01.062

[20] UROŠEVIć, Tijana, Dragan POVRENOVIć, Predrag VUKOSAVLJEVIć, Ivan UROŠEVIć a Snežana STEVANOVIć. Recent developments in microfiltration and ultrafiltration of fruit juices. Food and Bioproducts Processing [online]. 2017, 106, 147-161 [cit. 2022-01-17]. ISSN 09603085. Dostupné z: doi:10.1016/j.fbp.2017.09.009

[21] BADRUZZAMAN, Mohammad, Nikolay VOUTCHKOV, Lauren WEINRICH a Joseph G. JACANGELO. Selection of pretreatment technologies for seawater reverse osmosis plants: A review. Desalination [online]. 2019, 449, 78-91 [cit. 2022-01-19]. ISSN 00119164. Dostupné z: doi:10.1016/j.desal.2018.10.006

[22] BROVER, Semion, Yaal LESTER, Asher BRENNER a Eyal SAHAR-HADAR. Optimization of ultrafiltration as pre-treatment for seawater RO desalination. Desalination [online]. 2022, 524 [cit. 2022-01-19]. ISSN 00119164. Dostupné z: doi:10.1016/j.desal.2021.115478

[23] AHMAD, Tausif, Chandan GURIA a Ajay MANDAL. A review of oily wastewater treatment using ultrafiltration membrane: A parametric study to enhance the membrane performance. Journal of Water Process Engineering [online]. 2020, 36 [cit. 2022-01-15]. ISSN 22147144. Dostupné z: doi:10.1016/j.jwpe.2020.101289

[24] ABD-RAZAK, Nurul Hainiza, Arto PIHLAJAMÄKI, Tiina VIRTANEN, Y.M. JOHN CHEW a Michael R. BIRD. The influence of membrane charge and porosity upon fouling and cleaning during the ultrafiltration of orange juice. Food and Bioproducts Processing [online].

2021, 126, 184-194 [cit. 2022-01-19]. ISSN 09603085. Dostupné z: doi:10.1016/j.fbp.2021.01.009

[25] NG, Kenneth S.Y., Malavika HARIBABU, Dalton J.E. HARVIE, Dave E. DUNSTAN a Gregory J.O. MARTIN. Mechanisms of flux decline in skim milk ultrafiltration: A review. Journal of Membrane Science [online]. 2017, 523, 144-162 [cit. 2022-01-19]. ISSN 03767388. Dostupné z: doi:10.1016/j.memsci.2016.09.036

[26] NG, Kenneth S.Y., Dave E. DUNSTAN a Gregory J.O. MARTIN. Influence of processing temperature on flux decline during skim milk ultrafiltration. Separation and Purification Technology [online]. 2018, 195, 322-331 [cit. 2022-01-19]. ISSN 13835866. Dostupné z: doi:10.1016/j.seppur.2017.12.029

[27] VU, Thevu, Jeffrey LEBLANC a Chung Chi CHOU. Clarification of sugarcane juice by ultrafiltration membrane: Toward the direct production of refined cane sugar. Journal of Food Engineering [online]. 2020, 264 [cit. 2022-01-19]. ISSN 02608774. Dostupné z: doi:10.1016/j.jfoodeng.2019.07.029

[28] ROY, Yagnaseni, Mostafa H. SHARQAWY a John H. LIENHARD. Modeling of flatsheet and spiral-wound nanofiltration configurations and its application in seawater nanofiltration. Journal of Membrane Science [online]. 2015, 493, 360-372 [cit. 2022-01-19]. ISSN 03767388. Dostupné z: doi:10.1016/j.memsci.2015.06.030

[29] ZHOU, Dong, Lijing ZHU, Yinyi FU, Minghe ZHU a Lixin XUE. Development of lower cost seawater desalination processes using nanofiltration technologies — A review. Desalination [online]. 2015, 376, 109-116 [cit. 2022-01-19]. ISSN 00119164. Dostupné z: doi:10.1016/j.desal.2015.08.020

[30] LIU, Jianlu, Maowen YUE, Lin ZHAO, Jinliang HE, Xiuli WU a Lingli WANG. Semi batch dual-pass nanofiltration as scaling-controlled pretreatment for seawater purification and concentration with high recovery rate. Desalination [online]. 2021, 506 [cit. 2022-01-19]. ISSN 00119164. Dostupné z: doi:10.1016/j.desal.2021.115015

[31] ABDEL-FATAH, Mona A. Nanofiltration systems and applications in wastewater treatment: Review article. Ain Shams Engineering Journal [online]. 2018, 9(4), 3077-3092 [cit. 2022-01-19]. ISSN 20904479. Dostupné z: doi:10.1016/j.asej.2018.08.001

[32] SHI, Yuan-Teng, Xiaoting MENG, Lei YAO a Miao TIAN. A full-scale study of nanofiltration: Separation and recovery of NaCl and Na2SO4 from coal chemical industry wastewater. Desalination [online]. 2021, 517 [cit. 2022-01-19]. ISSN 00119164. Dostupné z: doi:10.1016/j.desal.2021.115239

[33] ZHENG, Junfeng, Rui ZHAO, Adam A. ULIANA et al. Separation of textile wastewater using a highly permeable resveratrol-based loose nanofiltration membrane with excellent anti-fouling performance. Chemical Engineering Journal [online]. 2022, 434 [cit. 2022-01-19]. ISSN 13858947. Dostupné z: doi:10.1016/j.cej.2022.134705

[34] HAN, Gang, Tai-Shung CHUNG, Martin WEBER a Christian MALETZKO. Low-Pressure Nanofiltration Hollow Fiber Membranes for Effective Fractionation of Dyes and Inorganic Salts in Textile Wastewater [online]. 2018, 52(6), 3676-3684 [cit. 2022-03-14]. ISSN 0013-936X. Dostupné z: doi:10.1021/acs.est.7b06518

[35] MONDAL, Mrinmoy a Sirshendu DE. Treatment of textile plant effluent by hollow fiber nanofiltration membrane and multi-component steady state modeling. Chemical Engineering Journal [online]. 2016, 285, 304-318 [cit. 2022-03-14]. ISSN 13858947. Dostupné z: doi:10.1016/j.cej.2015.10.005

[36] QASIM, Muhammad, Mohamed BADRELZAMAN a Nidal HILAL. Reverse osmosis desalination: A state-of-the-art review. Desalination [online]. 2019, 459, 59-104 [cit. 2022-01-20]. ISSN 00119164. Dostupné z: doi:10.1016/j.desal.2019.02.008

[37] KOTAS, Jindřich. Základní funkce a princip reverzní osmózy (RO). In: Tzbinfo: Nejnavštěvovanější odborný portál pro stavebnictví a technická zařízení budov [online]. [cit. 2022-01-21]. Dostupné z: https://voda.tzb-info.cz/vlastnosti-a-zdroje-vody/14589-zakladni-funkce-a-princip-reverzni-osmozy-ro

[38] WENTEN, I.G. a KHOIRUDDIN. Reverse osmosis applications: Prospect and challenges. Desalination [online]. 2016, 391, 112-125 [cit. 2022-01-20]. ISSN 00119164. Dostupné z: doi:10.1016/j.desal.2015.12.011

[39] COLLA, Valentina, Teresa Annunziata BRANCA, Felice ROSITO, Carmelo LUCCA, Beatriz Padilla VIVAS a Vanesa Menéndez DELMIRO. Sustainable Reverse Osmosis application for wastewater treatment in the steel industry. Journal of Cleaner Production [online]. 2016, 130, 103-115 [cit. 2022-01-20]. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2015.09.025

[40] SAHINKAYA, Erkan, Selen TUNCMAN, Ibrahim KOC, Ali Riza GUNER, Suheyla CIFTCI, Ahmet AYGUN a Serhat SENGUL. Performance of a pilot-scale reverse osmosis process for water recovery from biologically-treated textile wastewater. Journal of Environmental Management [online]. 2019, 249 [cit. 2022-01-20]. ISSN 03014797. Dostupné z: doi:10.1016/j.jenvman.2019.109382

[41] KRESS, Nurit, Yaron GERTNER a Efrat SHOHAM-FRIDER. Seawater quality at the brine discharge site from two mega size seawater reverse osmosis desalination plants in Israel (Eastern Mediterranean). Water Research [online]. 2020, 171 [cit. 2022-01-01]. ISSN 00431354. Dostupné z: doi:10.1016/j.watres.2019.115402

[42] AL-OBAIDI, M.A., A.A. ALSARAYREH, A.M. AL-HROUB, S. ALSADAIE a I.M. MUJTABA. Performance analysis of a medium-sized industrial reverse osmosis brackish water desalination plant. Desalination [online]. 2018, 443, 272-284 [cit. 2022-01-20]. ISSN 00119164. Dostupné z: doi:10.1016/j.desal.2018.06.010

[43] RAHIMI, Bijan, Mahdi AFZALI, Fatola FARHADI a Ali Asghar ALAMOLHODA. Reverse osmosis desalination for irrigation in a pistachio orchard. Desalination [online]. 2021, 516 [cit. 2022-01-20]. ISSN 00119164. Dostupné z: doi:10.1016/j.desal.2021.115236

[44] ONSEKIZOGLU BAGCI, Pelin, Hayriye KAHVECIOGLU, Haci Ali GULEC a Ufuk BAGCI. Pomegranate juice concentration through the consecutive application of a plasma modified reverse osmosis membrane and a membrane contactor. Food and Bioproducts Processing [online]. 2020, 124, 233-243 [cit. 2022-01-20]. ISSN 09603085. Dostupné z: doi:10.1016/j.fbp.2020.09.003

[45] CHRISTIANSEN, Morten Vormsborg, Anant DAVE, Leif H. SKIBSTED a Lilia AHRNÉ. Functional properties of skim milk concentrates produced by reverse osmosis filtration and reconstituted commercial powders. International Dairy Journal [online]. 2022, 126 [cit. 2022-02-07]. ISSN 09586946. Dostupné z: doi:10.1016/j.idairyj.2021.105225

[46] CHRISTIANSEN, Morten Vormsborg, Troels Bjerregaard PEDERSEN, Jesper Nagstrup BRøND, Leif H. SKIBSTED a Lilia AHRNÉ. Physical properties and storage stability of reverse osmosis skim milk concentrates: Effects of skim milk pasteurisation, solid content and thermal treatment. Journal of Food Engineering [online]. 2020, 278 [cit. 2022-02-07]. ISSN 02608774. Dostupné z: doi:10.1016/j.jfoodeng.2020.109922

[47] BALAKRISHNA PRABHU, K., M.B. SAIDUTTA, Arun M. ISLOOR, Raghavendra HEBBAR a Zhibing ZHANG. Improvement in performance of polysulfone membranes through the incorporation of chitosan-(3-phenyl-1h-pyrazole-4-carbaldehyde). Cogent Engineering [online]. 2017, 4(1) [cit. 2022-03-16]. ISSN 2331-1916. Dostupné z: doi:10.1080/23311916.2017.1403005

[48] GANESH, B.M., Arun M. ISLOOR a A.F. ISMAIL. Enhanced hydrophilicity and salt rejection study of graphene oxide-polysulfone mixed matrix membrane. Desalination [online]. 2013, 313, 199-207 [cit. 2022-03-16]. ISSN 00119164. Dostupné z: doi:10.1016/j.desal.2012.11.037

[49] NGUYEN, Hoan Thi Vuong, Thu Hong Anh NGO, Khai Dinh DO, Minh Ngoc NGUYEN, Nu Thi To DANG, Tham Thi Hong NGUYEN, Vo VIEN a Tuan Anh VU. Preparation and Characterization of a Hydrophilic Polysulfone Membrane Using Graphene Oxide. Journal of Chemistry [online]. 2019, 2019, 1-10 [cit. 2022-03-16]. ISSN 2090-9063. Dostupné z: doi:10.1155/2019/3164373

[50] IONITA, Mariana, Eugenia VASILE, Livia Elena CRICA et al. Synthesis, characterization and in vitro studies of polysulfone/graphene oxide composite membranes. Composites Part B: Engineering [online]. 2015, 72, 108-115 [cit. 2022-03-16]. ISSN 13598368. Dostupné z: doi:10.1016/j.compositesb.2014.11.040

[51] MAMAH, Stanley Chinedu, Pei Sean GOH, Ahmad Fauzi ISMAIL, Nor Diyana SUZAIMI, Lukka Thuyavan YOGARATHINAM, Yusuf Olabode RAJI a Tijjani Hassan EL-BADAWY. Recent development in modification of polysulfone membrane for water treatment application. Journal of Water Process Engineering [online]. 2021, 40 [cit. 2022-03-16]. ISSN 22147144. Dostupné z: doi:10.1016/j.jwpe.2020.101835

[52] SALI, Safae, Hamish R. MACKEY a Ahmed A. ABDALA. Effect of Graphene Oxide Synthesis Method on Properties and Performance of Polysulfone-Graphene Oxide Mixed Matrix Membranes. Nanomaterials [online]. 2019, 9(5) [cit. 2022-03-17]. ISSN 2079-4991. Dostupné z: doi:10.3390/nano9050769

[53] HWANG, Taeseon, Joon-Suk OH, Woosoon YIM, Jae-Do NAM, Chulsung BAE, Hyung-ick KIM a Kwang Jin KIM. Ultrafiltration using graphene oxide surface-embedded polysulfone membranes. Separation and Purification Technology [online]. 2016, 166, 41-47 [cit. 2022-03-17]. ISSN 13835866. Dostupné z: doi:10.1016/j.seppur.2016.04.018

[54] JALEH, Babak, Elham ZARE, Saeid AZIZIAN, Omid QANATI, Mahmoud NASROLLAHZADEH a Rajender S. VARMA. Preparation and Characterization of Polyvinylpyrrolidone/Polysulfone Ultrafiltration Membrane Modified by Graphene Oxide and Titanium Dioxide for Enhancing Hydrophilicity and Antifouling Properties. Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials [online]. 2020, 30(6), 2213-2223 [cit. 2022-03-17]. ISSN 1574-1443. Dostupné z: doi:10.1007/s10904-019-01367-x

[55] KUSWORO, Tutuk Djoko, Nita ARIYANTI a Dani Puji UTOMO. Effect of nano-TiO2 loading in polysulfone membranes on the removal of pollutant following natural-rubber wastewater treatment. Journal of Water Process Engineering [online]. 2020, 35 [cit. 2022-03-17]. ISSN 22147144. Dostupné z: doi:10.1016/j.jwpe.2020.101190

[56] YU, Chenghui, Baoyu GAO, Wenyu WANG, Xing XU a Qinyan YUE. Alleviating membrane fouling of modified polysulfone membrane via coagulation pretreatment/ultrafiltration hybrid process. Chemosphere [online]. 2019, 235, 58-69 [cit. 2022-03-17]. ISSN 00456535. Dostupné z: doi:10.1016/j.chemosphere.2019.06.146

[57] AYAZ, Muhammad, Amir MUHAMMAD, Mohammad YOUNAS, Asim Laeeq KHAN a Mashallah REZAKAZEMI. Enhanced Water Flux by Fabrication of Polysulfone/Alumina Nanocomposite Membrane for Copper(II) Removal. Macromolecular Research [online]. 2019, 27(6), 565-571 [cit. 2022-03-17]. ISSN 1598-5032. Dostupné z: doi:10.1007/s13233-019-7086-4

[58] SHERUGAR, Prajwal, Nagaraj S. NAIK, Mahesh PADAKI, Vignesh NAYAK, Athulya GANGADHARAN, Akshatha R. NADIG a Sébastien DÉON. Fabrication of zinc doped aluminium oxide/polysulfone mixed matrix membranes for enhanced antifouling property and heavy metal removal. Chemosphere [online]. 2021, 275 [cit. 2022-03-17]. ISSN 00456535. Dostupné z: doi:10.1016/j.chemosphere.2021.130024

[59] GHAEMI, Negin, Parisa DARAEI a Shiva PALANI. Surface Modification of Polysulfone Membranes Using Poly(Acrylic Acid)-Decorated Alumina Nanoparticles [online]. 2018, 41(2), 261-269 [cit. 2022-03-17]. ISSN 09307516. Dostupné z: doi:10.1002/ceat.201700124

[60] WANG, Can, Bingxian LIN a Yunren QIU. Enhanced hydrophilicity and anticoagulation of polysulfone materials modified via dihydroxypropyl, sulfonic groups and chitosan. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces [online]. 2022, 210 [cit. 2022-03-17]. ISSN 09277765. Dostupné z: doi:10.1016/j.colsurfb.2021.112243

[61] KUMAR, Rajesha, Arun M. ISLOOR, A. F. ISMAIL, Suraya A. RASHID a T. MATSUURA. Polysulfone–Chitosan blend ultrafiltration membranes: preparation, characterization, permeation and antifouling properties. RSC Advances [online]. 2013, 3(21) [cit. 2022-03-17]. ISSN 2046-2069. Dostupné z: doi:10.1039/c3ra00070b

[62] LIU, Leigen a Zhijuan PAN. Properties of Hydrophilic Chitosan/Polysulfone Nanofibrous Filtration Membrane. Journal of Engineered Fibers and Fabrics [online]. 2014, 9(1) [cit. 2022-03-17]. ISSN 1558-9250. Dostupné z: doi:10.1177/155892501400900109

[63] EL-DIN, L.A. Nezam, A. EL-GENDI, N. ISMAIL, K.A. ABED a Awd I. AHMED. Evaluation of cellulose acetate membrane with carbon nanotubes additives. Journal of Industrial and Engineering Chemistry [online]. 2015, 26, 259-264 [cit. 2022-03-29]. ISSN 1226086X. Dostupné z: doi:10.1016/j.jiec.2014.11.037

[64] ETEMADI, Habib, Reza YEGANI a Mahdi SEYFOLLAHI. The effect of amino functionalized and polyethylene glycol grafted nanodiamond on anti-biofouling properties of cellulose acetate membrane in membrane bioreactor systems. Separation and Purification Technology [online]. 2017, 177, 350-362 [cit. 2022-03-29]. ISSN 13835866. Dostupné z: doi:10.1016/j.seppur.2017.01.013

[65] VATANPOUR, Vahid, Mehmet Emin PASAOGLU, Hossein BARZEGAR, Oğuz Orhun TEBER, Recep KAYA, Muhammed BASTUG, Alireza KHATAEE a Ismail KOYUNCU. Cellulose acetate in fabrication of polymeric membranes: A review. Chemosphere [online]. 2022, 295 [cit. 2022-03-29]. ISSN 00456535. Dostupné z: doi:10.1016/j.chemosphere.2022.133914

[66] ASIRI, Abdullah M., Francesco PETROSINO, Valerio PUGLIESE et al. Synthesis and Characterization of Blended Cellulose Acetate Membranes. Polymers [online]. 2022, 14(1) [cit. 2022-03-29]. ISSN 2073-4360. Dostupné z: doi:10.3390/polym14010004

[67] LV, Jinling, Guoquan ZHANG, Hanmin ZHANG a Fenglin YANG. Exploration of permeability and antifouling performance on modified cellulose acetate ultrafiltration membrane with cellulose nanocrystals. Carbohydrate Polymers [online]. 2017, 174, 190-199 [cit. 2022-03-29]. ISSN 01448617. Dostupné z: doi:10.1016/j.carbpol.2017.06.064

[68] AHMAD, Adnan, Sidra WAHEED, Shahzad Maqsood KHAN, Sabad E-GUL, Muhammad SHAFIQ, Muhammad FAROOQ, Khairuddin SANAULLAH a Tahir JAMIL. Effect of silica on the properties of cellulose acetate/polyethylene glycol membranes for reverse osmosis. Desalination [online]. 2015, 355, 1-10 [cit. 2022-03-29]. ISSN 00119164. Dostupné z: doi:10.1016/j.desal.2014.10.004

[69] KAMAL, H., F.M. ABD-ELRAHIM a S. LOTFY. Characterization and some properties of cellulose acetate-co-polyethylene oxide blends prepared by the use of gamma irradiation. Journal of Radiation Research and Applied Sciences [online]. 2014, 7(2), 146-153 [cit. 2022-03-29]. ISSN 16878507. Dostupné z: doi:10.1016/j.jrras.2014.01.003

[70] PEIXOTO, Inês, Mónica FARIA a M. Clara GONÇALVES. Synthesis and Characterization of Novel Integral Asymmetric Monophasic Cellulose–Acetate/Silica/Titania and Cellulose–Acetate/Titania Membranes. Membranes [online]. 2020, 10(9) [cit. 2022-03-30]. ISSN 2077-0375. Dostupné z: doi:10.3390/membranes10090195

[71] YADAV, Nisha a Minna HAKKARAINEN. Degradable or not? Cellulose acetate as a model for complicated interplay between structure, environment and degradation. Chemosphere [online]. 2021, 265 [cit. 2022-03-30]. ISSN 00456535. Dostupné z: doi:10.1016/j.chemosphere.2020.128731

[72] EMADZADEH, D., W.J. LAU, T. MATSUURA, M. RAHBARI-SISAKHT a A.F. ISMAIL. A novel thin film composite forward osmosis membrane prepared from PSf–TiO2 nanocomposite substrate for water desalination. Chemical Engineering Journal [online]. 2014, 237, 70-80 [cit. 2022-03-30]. ISSN 13858947. Dostupné z: doi:10.1016/j.cej.2013.09.081

[73] NEELAPALA, Satya Deepika, Abhinav K. NAIR a P. E. JAGADEESHBABU. Synthesis and characterisation of TiO 2 nanofibre/cellulose acetate nanocomposite ultrafiltration membrane. Journal of Experimental Nanoscience [online]. 2017, 12(1), 152-165 [cit. 2022-03-30]. ISSN 1745-8080. Dostupné z: doi:10.1080/17458080.2017.1285446

[74] YU, Xiaopeng, Xueyang MI, Zhihui HE, Minjia MENG, Hongji LI a Yongsheng YAN. Fouling Resistant CA/PVA/TiO2 Imprinted Membranes for Selective Recognition and Separation Salicylic Acid from Waste Water. Frontiers in Chemistry [online]. 2017, 5 [cit. 2022-03-30]. ISSN 2296-2646. Dostupné z: doi:10.3389/fchem.2017.00002

[75] DE FARIA, Andreia Fonseca, Ana Carolina Mazarin DE MORAES, Patricia Fernanda ANDRADE, Douglas Soares DA SILVA, Maria DO CARMO GONÇALVES a Oswaldo Luiz ALVES. Cellulose acetate membrane embedded with graphene oxide-silver nanocomposites and its ability to suppress microbial proliferation. Cellulose [online]. 2017, 24(2), 781-796 [cit. 2022-03-31]. ISSN 0969-0239. Dostupné z: doi:10.1007/s10570-016-1140-6

[76] ANDRADE, Patricia Fernanda, Andreia Fonseca DE FARIA, Fernando Júnior QUITES, Silvana Ruella OLIVEIRA, Oswaldo Luiz ALVES, Marco Aurélio Zezzi ARRUDA a Maria do Carmo GONçALVES. Inhibition of bacterial adhesion on cellulose acetate membranes containing silver nanoparticles. Cellulose [online]. 2015, 22(6), 3895-3906 [cit. 2022-03-31]. ISSN 0969-0239. Dostupné z: doi:10.1007/s10570-015-0752-6

[77] SHI, Yexun, Chang LI, Dafang HE, Liming SHEN a Ningzhong BAO. Preparation of graphene oxide–cellulose acetate nanocomposite membrane for high-flux desalination. Journal of Materials Science [online]. 2017, 52(22), 13296-13306 [cit. 2022-03-31]. ISSN 0022-2461. Dostupné z: doi:10.1007/s10853-017-1403-0

[78] KANG, Guo-dong a Yi-ming CAO. Application and modification of poly(vinylidene fluoride) (PVDF) membranes – A review. Journal of Membrane Science [online]. 2014, 463, 145-165 [cit. 2022-03-31]. ISSN 03767388. Dostupné z: doi:10.1016/j.memsci.2014.03.055

[79] JI, Jing, Fu LIU, N. Awanis HASHIM, M.R. Moghareh ABED a Kang LI. Poly(vinylidene fluoride) (PVDF) membranes for fluid separation. Reactive and Functional Polymers [online]. 2015, 86, 134-153 [cit. 2022-03-31]. ISSN 13815148. Dostupné z: doi:10.1016/j.reactfunctpolym.2014.09.023

[80] SHEN, Liguo, Shushu FENG, Jianxi LI, Jianrong CHEN, Fengquan LI, Hongjun LIN a Genying YU. Surface modification of polyvinylidene fluoride (PVDF) membrane via radiation grafting: novel mechanisms underlying the interesting enhanced membrane performance. Scientific Reports [online]. 2017, 7(1) [cit. 2022-03-31]. ISSN 2045-2322. Dostupné z: doi:10.1038/s41598-017-02605-3

[81] OTITOJU, T.A., A.L. AHMAD a B.S. OOI. Polyvinylidene fluoride (PVDF) membrane for oil rejection from oily wastewater: A performance review. Journal of Water Process Engineering [online]. 2016, 14, 41-59 [cit. 2022-03-31]. ISSN 22147144. Dostupné z: doi:10.1016/j.jwpe.2016.10.011

[82] ZHAO, Chuanqi, Xiaochen XU, Jie CHEN a Fenglin YANG. Effect of graphene oxide concentration on the morphologies and antifouling properties of PVDF ultrafiltration membranes. Journal of Environmental Chemical Engineering [online]. 2013, 1(3), 349-354 [cit. 2022-03-31]. ISSN 22133437. Dostupné z: doi:10.1016/j.jece.2013.05.014

[83] TANG, Yu Pan, Tao CAI, Darwin LOH, Gregory S. O'BRIEN a Tai Shung CHUNG. Construction of antifouling lumen surface on a poly(vinylidene fluoride) hollow fiber membrane via a zwitterionic graft copolymerization strategy. Separation and Purification Technology [online]. 2017, 176, 294-305 [cit. 2022-03-31]. ISSN 13835866. Dostupné z: doi:10.1016/j.seppur.2016.12.012

[84] FAHRINA, Afrillia, Nasrul ARAHMAN, Sri MULYATI et al. Development of Polyvinylidene Fluoride Membrane by Incorporating Bio-Based Ginger Extract as Additive. Polymers [online]. 2020, 12(9) [cit. 2022-03-31]. ISSN 2073-4360. Dostupné z: doi:10.3390/polym12092003

[85] LIU, Lifen, Huiping CHEN a Fenglin YANG. Enhancing membrane performance by blending ATRP grafted PMMA–TiO2 or PMMA–PSBMA–TiO2 in PVDF. Separation and Purification Technology [online]. 2014, 133, 22-31 [cit. 2022-03-31]. ISSN 13835866. Dostupné z: doi:10.1016/j.seppur.2014.06.015

[86] GOH, P.S. a A.F. ISMAIL. A review on inorganic membranes for desalination and wastewater treatment. Desalination [online]. 2018, 434, 60-80 [cit. 2021-12-23]. ISSN 00119164. Dostupné z: doi:10.1016/j.desal.2017.07.023

[87] KAYVANI FARD, Ahmad, Gordon MCKAY, Anita BUEKENHOUDT, Huda AL SULAITI, Filip MOTMANS, Marwan KHRAISHEH a Muataz ATIEH. Inorganic Membranes: Preparation and Application for Water Treatment and Desalination. Materials [online]. 2018, 11(1) [cit. 2022-04-04]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma11010074

[88] Plate And Frame Membranes. In: Synder Filtration [online]. [cit. 2022-01-25]. Dostupné z: https://synderfiltration.com/learning-center/articles/module-configurations-process/plate-and-frame-membranes/

[89] Spiral-Wound Mebrane. In: Synder Filtration [online]. [cit. 2022-01-26]. Dostupné z: https://synderfiltration.com/learning-center/articles/module-configurations-process/spiral-wound-membranes/

[90] KARABELAS, A.J., M. KOSTOGLOU a C.P. KOUTSOU. Modeling of spiral wound membrane desalination modules and plants – review and research priorities. Desalination [online]. 2015, 356, 165-186 [cit. 2022-01-27]. ISSN 00119164. Dostupné z: doi:10.1016/j.desal.2014.10.002

[91] Tubular membranes. In: Synder Filtration [online]. [cit. 2022-01-28]. Dostupné z: https://synderfiltration.com/learning-center/articles/module-configurations-process/tubular-membranes/

[92] Capillary Filtration. In: Synder Filtration [online]. [cit. 2022-01-29]. Dostupné z: https://synderfiltration.com/learning-center/articles/module-configurations-process/capillary-filtration/

[93] Hollow Fiber Membranes. In: Synder Filtration [online]. [cit. 2022-01-29]. Dostupné z: https://synderfiltration.com/learning-center/articles/module-configurations-process/hollow-fiber-membranes/

[94] Hollow fiber forward osmosis membrane modules. In: Forward osmosis membranes, systems, and applications [online]. [cit. 2022-01-29]. Dostupné z: http://www.forwardosmosistech.com/hollow-fiber-forward-osmosis-membrane-modules/

[95] LIU, Danyu, Gongping LIU, Lie MENG, Ziye DONG, Kang HUANG a Wanqin JIN. Hollow fiber modules with ceramic-supported PDMS composite membranes for pervaporation recovery of bio-butanol. Separation and Purification Technology [online]. 2015, 146, 24-32 [cit. 2022-01-30]. ISSN 13835866. Dostupné z: doi:10.1016/j.seppur.2015.03.029

[96] JOO, Sung Hee a Berrin TANSEL. Novel technologies for reverse osmosis concentrate treatment: A review. Journal of Environmental Management [online]. 2015, 150, 322-335 [cit. 2022-02-05]. ISSN 03014797. Dostupné z: doi:10.1016/j.jenvman.2014.10.027

[97] XIANG, Qun, Youhei NOMURA, Shuji FUKAHORI, Tadao MIZUNO, Hiroaki TANAKA a Taku FUJIWARA. Innovative Treatment of Organic Contaminants in Reverse Osmosis Concentrate from Water Reuse: a Mini Review. Current Pollution Reports [online]. 2019, 5(4), 294-307 [cit. 2022-02-05]. ISSN 2198-6592. Dostupné z: doi:10.1007/s40726-019-00119-2

[98] UMAR, Muhammad, Felicity RODDICK a Linhua FAN. Recent Advancements in the Treatment of Municipal Wastewater Reverse Osmosis Concentrate—An Overview. Critical Reviews in Environmental Science and Technology [online]. 2014, 45(3), 193-248 [cit. 2022-02-05]. ISSN 1064-3389. Dostupné z: doi:10.1080/10643389.2013.852378

[99] VAN DER BRUGGEN, Bart, Liesbeth LEJON a Carlo VANDECASTEELE. Reuse, Treatment, and Discharge of the Concentrate of Pressure-Driven Membrane Processes [online]. 2003, 37(17), 3733-3738 [cit. 2021-12-24]. ISSN 0013-936X. Dostupné z: doi:10.1021/es0201754

[100] Zákon č. 544/2020 Sb.: Zákon, kterým se mění zákon č. 254/2001 Sb., o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon), ve znění pozdějších předpisů, a další související zákony. In: Zákony pro lidi [online]. [cit. 2022-04-27]. Dostupné z: https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2020-544

[101] Environmental impacts of nitrate pollution. In: Aquamonitrix [online]. [cit. 2022-05-27]. Dostupné z: https://aquamonitrix.com/environmental-impacts-nitrate/

[102] ZHOU, Tao, Teik-Thye LIM, Sze-Sze CHIN a A.G. FANE. Treatment of organics in reverse osmosis concentrate from a municipal wastewater reclamation plant: Feasibility test of advanced oxidation processes with/without pretreatment. Chemical Engineering Journal [online]. 2011, 166(3), 932-939 [cit. 2022-02-21]. ISSN 13858947. Dostupné z: doi:10.1016/j.cej.2010.11.078

[103] SUN, Ying-Xue, Zhe YANG, Tao YE, Na SHI a Yuan TIAN. Evaluation of the treatment of reverse osmosis concentrates from municipal wastewater reclamation by coagulation and granular activated carbon adsorption. Environmental Science and Pollution Research [online]. 2016, 23(13), 13543-13553 [cit. 2022-02-21]. ISSN 0944-1344. Dostupné z: doi:10.1007/s11356-016-6525-4

[104] AROLA, Kimmo, Bart VAN DER BRUGGEN, Mika MÄNTTÄRI a Mari KALLIOINEN. Treatment options for nanofiltration and reverse osmosis concentrates from municipal wastewater treatment: A review. Critical Reviews in Environmental Science and Technology [online]. 2019, 49(22), 2049-2116 [cit. 2022-02-12]. ISSN 1064-3389. Dostupné z: doi:10.1080/10643389.2019.1594519

[105] UMAR, M., F.A. RODDICK, L. FAN, O. AUTIN a B. JEFFERSON. Treatment of municipal wastewater reverse osmosis concentrate using UVC-LED/H2O2 with and without coagulation pre-treatment. Chemical Engineering Journal [online]. 2015, 260, 649-656 [cit. 2022-02-21]. ISSN 13858947. Dostupné z: doi:10.1016/j.cej.2014.09.028

[106] HURWITZ, Gil, Eric M.V. HOEK, Kai LIU, Linhua FAN a Felicity A. RODDICK. Photo-assisted electrochemical treatment of municipal wastewater reverse osmosis concentrate. Chemical Engineering Journal [online]. 2014, 249, 180-188 [cit. 2022-04-23]. ISSN 13858947. Dostupné z: doi:10.1016/j.cej.2014.03.084

[107] QUAN, Xiao, Kai HUANG, Mei LI, Meichao LAN a Baoan LI. Nitrogen removal performance of municipal reverse osmosis concentrate with low C/N ratio by membraneaerated biofilm reactor [online]. 2018, 12(6) [cit. 2022-04-23]. ISSN 2095-2201. Dostupné z: doi:10.1007/s11783-018-1047-6

[108] ZHANG, Xiaoyuan a Yu LIU. Reverse osmosis concentrate: An essential link for closing loop of municipal wastewater reclamation towards urban sustainability. Chemical Engineering Journal [online]. 2021, 421 [cit. 2022-04-24]. ISSN 13858947. Dostupné z: doi:10.1016/j.cej.2020.127773

[109] BAGASTYO, Arseto Y., Jelena RADJENOVIC, Yang MU, René A. ROZENDAL, Damien J. BATSTONE a Korneel RABAEY. Electrochemical oxidation of reverse osmosis concentrate on mixed metal oxide (MMO) titanium coated electrodes. Water Research [online]. 2011, 45(16), 4951-4959 [cit. 2022-04-24]. ISSN 00431354. Dostupné z: doi:10.1016/j.watres.2011.06.039

[110] MOHSENI, Arash, Matthew KUBE, Linhua FAN a Felicity A. RODDICK. Potential of Chlorella vulgaris and Nannochloropsis salina for nutrient and organic matter removal from municipal wastewater reverse osmosis concentrate. Environmental Science and Pollution Research [online]. 2020, 27(21), 26905-26914 [cit. 2022-04-24]. ISSN 0944-1344. Dostupné z: doi:10.1007/s11356-020-09103-6

[111] LIU, Kai, Felicity A. RODDICK a Linhua FAN. Impact of salinity and pH on the UVC/H2O2 treatment of reverse osmosis concentrate produced from municipal wastewater reclamation. Water Research [online]. 2012, 46(10), 3229-3239 [cit. 2022-04-24]. ISSN 00431354. Dostupné z: doi:10.1016/j.watres.2012.03.024

[112] JUSTO, A., O. GONZÁLEZ, J. ACEñA, S. PÉREZ, D. BARCELÓ, C. SANS a S. ESPLUGAS. Pharmaceuticals and organic pollution mitigation in reclamation osmosis brines by UV/H2O2 and ozone. Journal of Hazardous Materials [online]. 2013, 263, 268-274 [cit. 2022-04-24]. ISSN 03043894. Dostupné z: doi:10.1016/j.jhazmat.2013.05.030

[113] SHANMUGANATHAN, Sukanyah, Tien Vinh NGUYEN, Sanghyun JEONG, Jaya KANDASAMY a Saravanamuthu VIGNESWARAN. Submerged membrane – (GAC) adsorption hybrid system in reverse osmosis concentrate treatment. Separation and Purification Technology [online]. 2015, 146, 8-14 [cit. 2022-04-24]. ISSN 13835866. Dostupné z: doi:10.1016/j.seppur.2015.03.017

[114] MISSIMER, Thomas M. a Robert G. MALIVA. Environmental issues in seawater reverse osmosis desalination: Intakes and outfalls. Desalination [online]. 2018, 434, 198-215 [cit. 2022-01-23]. ISSN 00119164. Dostupné z: doi:10.1016/j.desal.2017.07.012

[115] SOLIMAN, Mariam N., Fatima Z. GUEN, Somaya A. AHMED, Haleema SALEEM, Mohd Junaid KHALIL a Syed Javaid ZAIDI. Energy consumption and environmental impact assessment of desalination plants and brine disposal strategies. Process Safety and Environmental Protection [online]. 2021, 147, 589-608 [cit. 2022-01-24]. ISSN 09575820. Dostupné z: doi:10.1016/j.psep.2020.12.038

[116] PANAGOPOULOS, Argyris a Katherine-Joanne HARALAMBOUS. Environmental impacts of desalination and brine treatment - Challenges and mitigation measures. Marine Pollution Bulletin [online]. 2020, 161 [cit. 2022-02-20]. ISSN 0025326X. Dostupné z: doi:10.1016/j.marpolbul.2020.111773

[117] BALCIK-CANBOLAT, Cigdem, Tugba OLMEZ-HANCI, Cisel SENGEZER, Hacer SAKAR, Ahmet KARAGUNDUZ a Bulent KESKINLER. A combined treatment approach for dye and sulfate rich textile nanofiltration membrane concentrate. Journal of Water Process Engineering [online]. 2019, 32 [cit. 2022-03-01]. ISSN 22147144. Dostupné z: doi:10.1016/j.jwpe.2019.100919

[118] POURFADAKARI, Sudabeh, Nader YOUSEFI a Amir Hossein MAHVI. Removal of Reactive Red 198 from aqueous solution by combined method multi-walled carbon nanotubes and zero-valent iron: Equilibrium, kinetics, and thermodynamic. Chinese Journal of Chemical Engineering [online]. 2016, 24(10), 1448-1455 [cit. 2022-03-01]. ISSN 10049541. Dostupné z: doi:10.1016/j.cjche.2016.04.027

[119] MOREIRA, Victor Rezende, Yuri Abner Rocha LEBRON, Carolina Fonseca COUTO, Andreza MAIA, Wagner Guadagnin MORAVIA a Miriam Cristina Santos AMARAL. Process development for textile wastewater treatment towards zero liquid discharge: Integrating membrane separation process and advanced oxidation techniques. Process Safety and Environmental Protection [online]. 2022, 157, 537-546 [cit. 2022-02-22]. ISSN 09575820. Dostupné z: doi:10.1016/j.psep.2021.10.037

[120] XIONG, Rihua a Chang WEI. Current status and technology trends of zero liquid discharge at coal chemical industry in China. Journal of Water Process Engineering [online]. 2017, 19, 346-351 [cit. 2022-04-05]. ISSN 22147144. Dostupné z: doi:10.1016/j.jwpe.2017.09.005

[121] LI, Wentao, Miao ZHANG, Hui WANG, Junfeng LIAN a Zhimin QIANG. Removal of recalcitrant organics in reverse osmosis concentrate from coal chemical industry by UV/H2O2 and UV/PDS: Efficiency and kinetic modeling. Chemosphere [online]. 2022, 287 [cit. 2022-03-01]. ISSN 00456535. Dostupné z: doi:10.1016/j.chemosphere.2021.131999

[122] BOOPATHY, R. a G. SEKARAN. Electrochemical treatment of reverse osmosis concentrate generated by the leather industry using a Cu–graphite electrode. RSC Advances [online]. 2014, 4(20) [cit. 2022-05-27]. ISSN 2046-2069. Dostupné z: doi:10.1039/c3ra45199b

[123] JIANG, Huiyan, Junsheng LIU a Wei HAN. The status and developments of leather solid waste treatment: A mini-review [online]. 2016, 34(5), 399-408 [cit. 2022-03-09]. ISSN 0734-242X. Dostupné z: doi:10.1177/0734242X16633772

[124] FAMIELEC, Stanisław. Chromium Concentrate Recovery from Solid Tannery Waste in a Thermal Process. Materials [online]. 2020, 13(7) [cit. 2022-03-01]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma13071533

[125] SALMAN, Rasha H., Hassanain A. HASSAN, Khalid M. ABED, Ahmed Faiq AL-ALAWY, Dhulfiqar A. TUAMA, Karrar M. HUSSEIN a Hussein A. JABIR. Removal of chromium ions from a real wastewater of leather industry using electrocoagulation and reverse osmosis processes [online]. 020186- [cit. 2022-03-01]. Dostupné z: doi:10.1063/5.0000201

[126] Chromium(III). In: PubChem [online]. [cit. 2022-03-09]. Dostupné z: https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Chromium\_III

[127] Chromium(6+). In: PubChem [online]. [cit. 2022-03-09]. Dostupné z: https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/29131

[128] Nařízení vlády č. 57/2016 Sb.: Nařízení vlády o ukazatelích a hodnotách přípustného znečištění odpadních vod a náležitostech povolení k vypouštění odpadních vod do vod podzemních. In: Zákony pro lidi [online]. [cit. 2022-02-07]. Dostupné z: https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2016-57#p2

[129] AMBULKAR, Archis. Water purification. In: Britannica [online]. [cit. 2022-02-07]. Dostupné z: https://www.britannica.com/topic/water-purification

[130] NATHANSON, Jerry. Water supply system. In: Britannica [online]. [cit. 2022-02-07]. Dostupné z: https://www.britannica.com/technology/water-supply-system/Municipal-water-consumption

[131] Technologie vody. In: Aquacon [online]. [cit. 2022-02-07]. Dostupné z: https://www.aquacon.cz/technologie-vody

[132] PRADHAN, Shovana, Linhua FAN, Felicity A. RODDICK, Esmaeil SHAHSAVARI, Andrew S. BALL a Xiaolei ZHANG. A comparative study of biological activated carbon based treatments on two different types of municipal reverse osmosis concentrates. Chemosphere [online]. 2020, 240 [cit. 2022-05-01]. ISSN 00456535. Dostupné z: doi:10.1016/j.chemosphere.2019.124925

[133] WALTON, Harold. Ion-exchange reaction. In: Britannica [online]. [cit. 2022-02-07]. Dostupné z: https://www.britannica.com/science/ion-exchange-reaction

[134] GURRERI, Luigi, Alessandro TAMBURINI, Andrea CIPOLLINA a Giorgio MICALE. Electrodialysis Applications in Wastewater Treatment for Environmental Protection and Resources Recovery: A Systematic Review on Progress and Perspectives. Membranes [online]. 2020, 10(7) [cit. 2022-02-07]. ISSN 2077-0375. Dostupné z: doi:10.3390/membranes10070146

[135] ZHANG, Yang, Karel GHYSELBRECHT, Boudewijn MEESSCHAERT, Luc PINOY a Bart VAN DER BRUGGEN. Electrodialysis on RO concentrate to improve water recovery in wastewater reclamation. Journal of Membrane Science [online]. 2011, 378(1-2), 101-110 [cit. 2022-05-01]. ISSN 03767388. Dostupné z: doi:10.1016/j.memsci.2010.10.036

[136] DENG, Yang a Renzun ZHAO. Advanced Oxidation Processes (AOPs) in Wastewater Treatment. Current Pollution Reports [online]. 2015, 1(3), 167-176 [cit. 2022-02-13]. ISSN 2198-6592. Dostupné z: doi:10.1007/s40726-015-0015-z

MINICH, Marek. Aplikace membránových technologií pro výrobu pitné vody z [137] odtoku Z ĊOV [online]. Brno, 2021 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: Vysoké učení https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/131417. Diplomová práce. technické v Brně, Fakulta chemická, Ústav chemie a technologie ochrany životního prostředí. Vedoucí práce Martina Repková.

[138] ZHANG, Meng-hui, Hui DONG, Liang ZHAO, De-xi WANG a Di MENG. A review on Fenton process for organic wastewater treatment based on optimization perspective. Science of The Total Environment [online]. 2019, 670, 110-121 [cit. 2022-02-13]. ISSN 00489697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2019.03.180

[139] XU, Min, Changyong WU a Yuexi ZHOU. Advancements in the Fenton Process for Wastewater Treatment. Advanced Oxidation Processes - Applications, Trends, and Prospects [online]. IntechOpen, 2020 [cit. 2022-02-13]. ISBN 978-1-78984-890-8. Dostupné z: doi:10.5772/intechopen.90256

[140] VILARDI, Giorgio, Diego SEBASTIANI, Salvatore MILIZIANO, Nicola VERDONE a Luca DI PALMA. Heterogeneous nZVI-induced Fenton oxidation process to enhance biodegradability of excavation by-products. Chemical Engineering Journal [online]. 2018, 335, 309-320 [cit. 2022-02-13]. ISSN 13858947. Dostupné z: doi:10.1016/j.cej.2017.10.152

[141] SAEED, Mohamed Osman, Khairun AZIZLI, Mohamed Hasnain ISA a Mohammed J.K. BASHIR. Application of CCD in RSM to obtain optimize treatment of POME using Fenton oxidation process. Journal of Water Process Engineering [online]. 2015, 8, 7-16 [cit. 2022-02-13]. ISSN 22147144. Dostupné z: doi:10.1016/j.jwpe.2014.11.001

[142] SINGH, Shrawan K. a Walter Z. TANG. Statistical analysis of optimum Fenton oxidation conditions for landfill leachate treatment. Waste Management [online]. 2013, 33(1), 81-88 [cit. 2022-02-13]. ISSN 0956053X. Dostupné z: doi:10.1016/j.wasman.2012.08.005

[143] Hydrogen peroxide. In: PubChem [online]. [cit. 2022-02-13]. Dostupné z: https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Hydrogen-peroxide

[144] REN, Yi, Yue YUAN, Bo LAI, Yuexi ZHOU a Juling WANG. Treatment of reverse osmosis (RO) concentrate by the combined Fe/Cu/air and Fenton process (1stFe/Cu/air-Fenton-2ndFe/Cu/air). Journal of Hazardous Materials [online]. 2016, 302, 36-44 [cit. 2022-05-02]. ISSN 03043894. Dostupné z: doi:10.1016/j.jhazmat.2015.09.025

[145] CAI, Q.Q., M.Y. WU, L.M. HU, B.C.Y. LEE, S.L. ONG, P. WANG a J.Y. HU. Organics removal and in-situ granule activated carbon regeneration in FBR-Fenton/GAC process for reverse osmosis concentrate treatment. Water Research [online]. 2020, 183 [cit. 2022-05-02]. ISSN 00431354. Dostupné z: doi:10.1016/j.watres.2020.116119

[146] WANG, Jianlong a Hai CHEN. Catalytic ozonation for water and wastewater treatment: Recent advances and perspective. Science of The Total Environment [online]. 2020, 704 [cit. 2022-02-14]. ISSN 00489697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2019.135249

[147] SCHOLES, Rachel C., Angela N. STIEGLER, Cayla M. ANDERSON a David L. SEDLAK. Enabling Water Reuse by Treatment of Reverse Osmosis Concentrate: The Promise of Constructed Wetlands. ACS Environmental Au [online]. 2021, 1(1), 7-17 [cit. 2021-12-24]. ISSN 2694-2518. Dostupné z: doi:10.1021/acsenvironau.1c00013

[148] JOSHI, Ruchi, Thunyalux RATPUKDI, Kristofer KNUTSON, Amit BHATNAGAR a Eakalak KHAN. Bromate formation control by enhanced ozonation: A critical review. Critical Reviews in Environmental Science and Technology [online]. 1-46 [cit. 2022-02-14]. ISSN 1064-3389. Dostupné z: doi:10.1080/10643389.2020.1850169

[149] WU, Qian-Yuan, Yu-Ting ZHOU, Wanxin LI, Xiangru ZHANG, Ye DU a Hong-Ying HU. Underestimated risk from ozonation of wastewater containing bromide: Both organic byproducts and bromate contributed to the toxicity increase. Water Research [online]. 2019, 162, 43-52 [cit. 2022-02-14]. ISSN 00431354. Dostupné z: doi:10.1016/j.watres.2019.06.054

[150] DENG, Hui. Ozonation mechanism of carbamazepine and ketoprofen in RO concentrate from municipal wastewater treatment: Kinetic regimes, removal efficiency and matrix effect. Science of The Total Environment [online]. 2020, 717 [cit. 2022-04-23]. ISSN 00489697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2020.137150

[151] Constructed Wetlands - Wastewater Treatment Systems. In: Global wetland technology [online]. [cit. 2022-02-14]. Dostupné z: https://www.globalwettech.com/about-constructed-wetlands.html

[152] CHAKRABORTI, Rajat K. a James S. BAYS. Natural Treatment of High-Strength Reverse Osmosis Concentrate by Constructed Wetlands for Reclaimed Water Use. Water [online]. 2020, 12(1) [cit. 2022-05-02]. ISSN 2073-4441. Dostupné z: doi:10.3390/w12010158

[153] Vyhláška č. 448/2017 Sb.: Vyhláška, kterou se mění vyhláška č. 428/2001 Sb., kterou se provádí zákon č. 274/2001 Sb., o vodovodech a kanalizacích pro veřejnou potřebu a o změně některých zákonů (zákon o vodovodech a kanalizacích), ve znění pozdějších předpisů. In: Zákony pro lidi [online]. [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2017-448

[154] Vyhláška č. 70/2018 Sb.: Vyhláška, kterou se mění vyhláška č. 252/2004 Sb., kterou se stanoví hygienické požadavky na pitnou a teplou vodu a četnost a rozsah kontroly pitné vody, ve znění pozdějších předpisů. In: Zákony pro lidi [online]. [cit. 2022-01-02]. Dostupné z: https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2018-70

[155] LIU, Xiao, Zixiao REN, Huu Hao NGO, Xu HE, Peter DESMOND a An DING. Membrane technology for rainwater treatment and reuse: A mini review. Water Cycle [online]. 2021, 2, 51-63 [cit. 2022-01-08]. ISSN 26664453. Dostupné z: doi:10.1016/j.watcyc.2021.08.001

[156] LESIMPLE, Alain, Farah Ejaz AHMED a Nidal HILAL. Remineralization of desalinated water: Methods and environmental impact. Desalination [online]. 2020, 496 [cit. 2022-01-02]. ISSN 00119164. Dostupné z: doi:10.1016/j.desal.2020.114692

[157] ČSN EN ISO 5667-3 Kvalita vod - Odběr vzorků - Část 3: Konzervace vzorků vod a manipulace s nimi. In: . Praha: Český normalizační institut, 2019.

[158] ČSN ISO 5667-5 Jakost vod. Odběr vzorků, část 5: Návod pro odběr vzorků pitné vody z úpraven vody a z vodovodních sítí. In: . Praha: Český normalizační institut, 2008.

[159] ČSN EN ISO 5667-14 Kvalita vod - Odběr vzorků - Část 14: Návod pro prokazování a řízení kvality odběru vzorků vod a manipulace s nimi. In: . Praha: Český normalizační institut, 2017.

[160] Čistírna odpadních vod Brno - Modřice. In: Brněnské vodárny a kanalizace, a. s. [online]. [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: https://www.bvk.cz/o-spolecnosti/odvadeni-a-cisteni-odpadnich-vod/cov-brno-modrice

[161] ČSN EN ISO 8467 (757519) Jakost vod. Stanovení chemické spotřeby kyslíku manganistanem (CHSKMn). In: . Praha: Český normalizační institut, 1997.

[162] DIN ISO 15705 – Jakost vod - Stanovení chemické spotřeby kyslíku (CHSKcr) - Metoda ve zkumavkách. In: . Berlín: Německý institut pro normalizaci, 2003.

[163] ČSN EN ISO 5815-1 Kvalita vod – Stanovení biochemické spotřeby kyslíku po n dnech (BODn) – Část 1: Zřeďovací a očkovací metoda s přídavkem allylthiomočoviny. In: . Praha: Český normalizační institut.

[164] ČSN 75 7346 Jakost vod – Stanovení rozpuštěných látek. In: . Praha: Český normalizační institut, 2002.

[165] ČSN EN 872 (757349) Jakost vod - Stanovení nerozpuštěných látek - Metoda filtrace filtrem ze skleněných vláken. In: . Praha: Český normalizační institut, 2005.

[166] DIN 38405-9 – German standard methods for examination of water, waste water and sludge - Anions (group D) - Part 9: Spectrometric determination of nitrate (D 9). In: . Berlín: Německý institut pro normalizaci, 2011.

[167] US Standard Methods 4500-NO2<sup>-</sup> B NITROGEN (NITRITE). In: . Washington DC: U.S. Environmental Protection Agency, 2018.

[168] ISO 7150/1 – Jakost vod. Stanovení amonných iontů. Část 1: Manuální spektrometrická metoda. In: . Praha: Český normalizační institut, 1994.

[169] PITTER, Pavel. Hydrochemie. 5. aktualizované a doplněné vydání. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2015. ISBN 978-80-7080-928-0.

[170] Indicators: Nitrogen. In: United States Environmental Protection Agency [online]. [cit. 2022-05-02]. Dostupné z: https://www.epa.gov/national-aquatic-resourcesurveys/indicators-nitrogen

## 8 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

AOPs – pokročilé oxidační procesy

BAC – biologické aktivní uhlí

BSK – biochemická spotřeba kyslíku

DOC – rozpuštěný organický uhlík

č. – číslo

 $\check{C}OV - \check{c}ist$ írna odpadních vod

ČR – Česká republika

EDCs – endokrinní disruptory

EO – ekvivalentní obyvatel

FCH VUT – Fakulta chemická Vysokého učení technického

GAC- granulované aktivní uhlí

HDPE – vysokohustotní polyethylen

CHSK – chemická spotřeba kyslíku

CHSK<sub>Cr</sub>- chemická spotřeba kyslíku dichromanem draselným

 $CHSK_{Mn}$  – chemická spotřeba kyslíku manganistanem draselným

KTJ – kolonii tvořící jednotka

MF-mikrofiltrace

NF-nanofiltrace

NH4<sup>+</sup>-N – amoniakální dusík

NL – nerozpuštěné látky

NO2-N – dusičnanový dusík

NO3-N – dusičnanový dusík

PAN - polyakrylonitril

PE-polyethylen

PP-polypropylen

POPs – perzistentní organické polutanty

PTFE-polytetra fluorethylen

PVDF-poly (vinyliden) fluorid

RO-reverzní osmóza

RL – rozpuštěné látky

TP-celkový fosfor

UF-ultrafiltrace

UV – ultrafialové záření