



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

# SYSTÉMY PRO BEZODPADOVÉ VODNÍ HOSPODÁŘSTVÍ

ZERO LIQUID DISCHARGE SYSTEMS

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Petra Štylárková

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Touš, Ph.D.

BRNO 2021

## Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav procesního inženýrství  
Studentka: **Petra Štylárková**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Michal Touš, Ph.D.**  
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Systémy pro bezodpadové vodní hospodářství**

#### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

ZLD (Zero Liquid Discharge) je zkratka pro proces navržený tak, aby nedocházelo k vypouštění kapalného odpadu z průmyslového podniku. ZLD systémy jsou novým trendem v nakládání s odpadními vodami. Tato problematika nabývá stále více na významu z důvodu narůstajícího globálního nedostatku vody. Cílem je minimalizovat (ideálně eliminovat) množství vypouštěné odpadní vody a zároveň odpadní vodu recyklovat. Recyklovat lze jak vodu samotnou, tak cenné látky, které obsahuje. Příkladem může být hutnictví, kde lze zpětně využít kromě vody také soli a kyseliny z oplachových vod. Téma bakalářské práce je rešeršního charakteru a poskytne ucelený přehled o současném přístupu a možnostech ZLD systémů.

#### **Cíle bakalářské práce:**

Literární rešerše systémů pro bezodpadové vodní hospodářství

Popis základního principu, jednotlivých aparátů a systémů

Příklady využití jednotlivých aparátů, systémů a přístupů

#### **Seznam doporučené literatury:**

RANADE, Vivek V. a Vinay M. BHANDARI. Industrial wastewater treatment, recycling, and reuse. Amsterdam: Elsevier, 2014. ISBN 978-0-08-099968-5.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce obsahuje popis systému pro bezodpadové vodní hospodářství. Věnuje se popisu procesu, který má tři hlavní části, tedy předúpravu, předkoncentraci a odpařování. V každé části je základní popis principu metod, jejich využití atd.

## **ABSTRACT**

The bachelor thesis contains a description of zero liquid discharge systems. It describes the process, which has three main parts, it is pretreatment, preconcentration and evaporation. In each parts there is a basic description of the principle of the metod, their use etc.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

membránové procesy, odpařování, krystalizace, bezodpadový systém čištění vod

## **KEYWORDS**

membrane processes, evaporation, crystallization, zero liquid discharge



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

ŠTYLÁRKOVÁ, Petra. *Systémy pro bezodpadové vodní hospodářství*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132656>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství. Vedoucí práce Michal Touš.

## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že, že tato práce je mým původním dílem, vypracoval jsem ji samostatně pod vedením vedoucího práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury.

Jako autor uvedené práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následku porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona c. 121/2000 Sb., včetně možných trestně právních důsledků.

.....  
V Brně dne

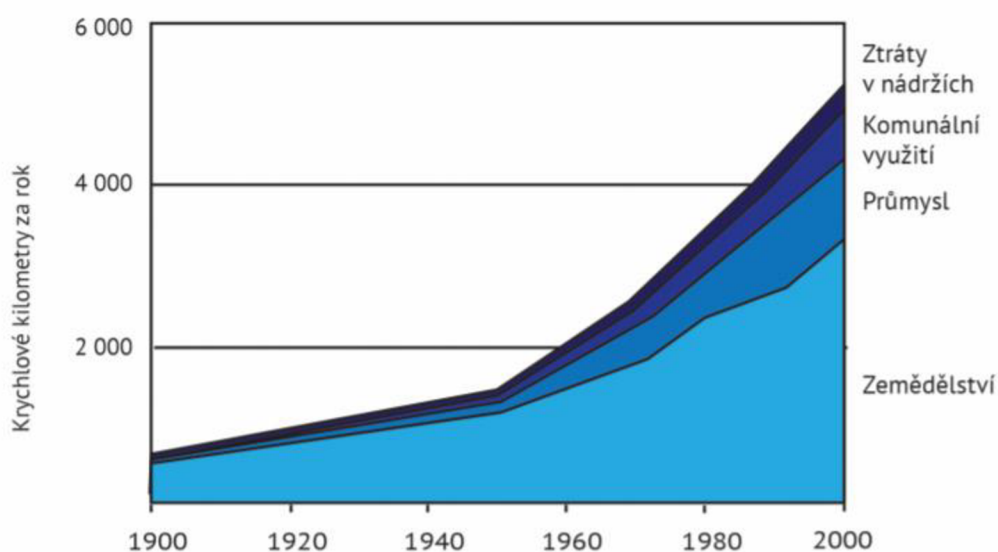
.....  
Petra Štylárková

**OBSAH**

1	ÚVOD .....	8
2	ODPADNÍ VODA .....	10
2.1	Druhy odpadních vod podle původu .....	11
2.2	Druhy znečištění .....	13
3	ZERO LIQUID DISCHARGE .....	16
4	PŘEDÚPRAVA .....	18
5	PŘEDKONCENTRACE .....	21
5.1	Tlakové membránové procesy .....	21
5.1.1	Mikrofiltrace .....	23
5.1.2	Ultrafiltrace .....	24
5.1.3	Nanofiltrace .....	24
5.1.4	Reverzní osmóza .....	25
5.1.5	Dopředná osmóza .....	26
5.1.6	Membránová destilace .....	27
5.2	Elektromembránové procesy .....	28
5.2.1	Elektrodialýza .....	29
5.2.2	Elektrodeionizace .....	30
5.3	Hlavní výhody a nevýhody membránových procesů .....	31
6	ODPAŘOVÁNÍ .....	32
6.1	Jednostupňové vakuové odparky .....	33
6.2	Vícestupňové vakuové odparky .....	34
6.3	Hlavní výhody a nevýhody metod odpařování .....	36
7	KRYSTALIZACE .....	37
7.1	Ochlazovací krystalizace .....	38
7.2	Odpařovací krystalizace .....	38
8	VYUŽITÍ SYSTÉMŮ ZLD .....	40
8.1	ZLD systém ve světě .....	40
8.2	Případová studie .....	43
8.3	Výhody a nevýhody systému ZLD .....	44
9	ZÁVĚR .....	45
10	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A CITOVÁNÍ .....	46
11	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ .....	49
12	SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ A TABULEK .....	50

# 1 ÚVOD

Voda je základní podmínkou pro život. V průmyslu je voda nejpoužívanější surovinou. S rostoucí produkcí v oblastech průmyslu značně stoupá její spotřeba. Na obrázku 1.1 je znázorněn graf ohledně světové spotřeby vody. V Evropě převládá spotřeba vody v odvětví průmyslu (70 %) a ve světě největší část spotřeby vody tvoří zemědělství (80 až 90 %) [1]. Během posledního století rapidně vzrostla spotřeba vody. Za růstem spotřeby je řada faktorů, jedná se především o rostoucí poptávku po potravinách, spotřebním zboží, energiích atd. Nedostatek vody je globálním problémem lidstva. Od roku 1950 stoupla spotřeba vody asi trojnásobně. V dnešní době je nutné dbát na snížení spotřeby vody nebo na její recyklaci.



Obrázek 1.1 – Spotřeba vody ve světě podle odvětví [1]

Recyklace vody je spolehlivé řešení ke zvýšení její dostupnosti v mnoha oblastech světa. V současné době jsou čistírny odpadních vod modernizovány novými a spolehlivějšími procesy [2]. Pomocí procesů lze vodě vrátit kvalitu pitné vody. V souladu s cirkulární ekonomikou je systém bezodpadového vodního hospodářství klíčem k udržitelnosti pitné vody.

Tam, kde se odpadní voda vypouští do vodních útvarů bez adekvátního ošetření, může způsobit značné problémy, především silnou kontaminaci, která ovlivňuje vodní ekosystémy a může být nebezpečná pro lidské zdraví. Od průmyslových odvětví se vyžaduje, aby přijmuli udržitelnou strategii vodního hospodářství pro rekultivaci odpadní vody ke snížení spotřeby a minimalizaci kontaminace vodních ploch. Jedná se především o oblasti s nedostatkem vody.

Obnova vodních zdrojů pomocí Zero liquid discharge (ZLD), přitahuje zájem jako cenné vodohospodářské řešení pro průmyslové odpadní vody, k maximalizaci recyklace a minimalizace objemu odpadních vod. Systém ZLD můžeme definovat jako proces maximálního opětovného získání procesní vody z odpadní vody, znečištění z odpadní vody je zakoncentrováno do co nejmenšího množství odpadu a získaná čistá voda je opět využita ve výrobním procesu [3]. Cílem práce je sestavit přehled technologií užívaných v ZLD a popsat jejich základní principy a vlastnosti.

Z důvodu intenzivního využití energie je ZLD systém obecně charakterizován jako drahá technologie, která dosud nebyla široce implementována. Do budoucna se však jeví tato technologie jako nezbytná.

## 2 ODPADNÍ VODA

Základní informace ohledně odpadních vod lze nalézt v [4], [5]. Odpadní voda je voda, jejíž kvalita byla zhoršena lidskou činností. Tato voda lze rozdělit podle původu znečištění. Odpadní vodu charakterizují 2 podmínky, za prvé je to změna jakosti vody a za druhé je to možnost ohrožení kvality podzemních a povrchových vod.

Tabulka 2.1 – Přehled znečišťujících látek v odpadních vodách [4]

rozpuštěné	organické	biologicky rozložitelné		cukry, mastné kyseliny
		biologicky nerozložitelné		barviva
	anorganické			těžké kovy, sulfidy
nerozpuštěné	organické	biologicky rozložitelné		škrob, bakterie
		biologicky nerozložitelné		plasty, papír
		usaditelné		celulosa vlákna
		neusaditelné	koloidní	bakterie
	plovoucí		papír	
	anorganické	usaditelné		písek, hlína
neusaditelné		brusný prach		

Pro základní klasifikaci odpadní vody, dle [6], se jako častým ukazatelem udává:

- BSK – biochemická spotřeba kyslíku je definovaná jako hmotnostní koncentrace rozpuštěného kyslíku v roztoku, která byla spotřebována během biochemické oxidace organických látek za stanovených podmínek
- BSK<sub>5</sub> – je biochemická spotřeba kyslíku zředovací metodou v průběhu pěti dnů, za aerobních podmínek a při teplotě 20 °C, postihuje pouze znečištění biologicky rozložitelnými látkami
- CHSK – chemická spotřeba kyslíku je jedním z nejdůležitějších kritérií znečištění vody, které podává informace především o koncentraci veškerých látek. Jako oxidační činidlo se používají roztoky manganistanu draselného nebo dichromanu draselného a stanovení se provádí za přesně určených podmínek. Chemická spotřeba kyslíku je definována jako množství kyslíku ekvivalentní spotřebě použitého oxidačního činidla. CHSK je hodnotou nespecifického skupinového stanovení, které slouží k odhadu organického znečištění (limit pro pitnou vodu jsou 3 mg/l).
- pH – vyjadřuje kyselost nebo zásaditost vodných roztoků v rozsahu 1–14 [7].

## 2.1 Druhy odpadních vod podle původu

### Komunální odpadní voda

Charakteristiku komunální vody uvádí například [8] a [9]. Komunální odpadní voda se dělí na splaškovou a srážkovou. Někdy je zmínka i o oplachové vodě, která vzniká při čištění ulic. Splašková voda vzniká v obytných budovách a také v budovách, v nichž jsou poskytovány služby. Obsahují především produkty lidského metabolismu, vysoké množství organických látek a látek bohatých na dusík a fosfor. Dále se v komunálních odpadních vodách setkáváme s dezinfekčními prostředky, látkami pocházející z léčiv, tenzidy ze šampónů a jiných hygienických prostředků. Jejich složení by mohlo způsobit velké škody v přírodě, proto je nutné vodu upravit.

### Průmyslová odpadní voda

Voda je důležitým faktorem v průmyslu. U této vody je požadováno, aby odpovídala různým procesním potřebám. Škála průmyslových vod zahrnuje chladicí a napájecí vodu kotlů v elektrárnách, procesní vodu pro různé průmyslové použití a také ultra čistou vodu pro elektronický a farmaceutický průmysl [10]. Míra a charakter znečištění vody záleží na druhu průmyslu, ale taky na technologii výroby [11].

### Zemědělská odpadní voda

Charakteristika a typy zemědělské odpadní vody lze nalézt v [4], [12], [13]. V zemědělské výrobě může dojít k znečištění nesprávným nebo neúměrným používáním závadných látek. Nejčastějším zdrojem je znečištění z živočišné výroby a rostlinné výroby. Existují různé druhy znečištění v zemědělství:

- Silážní šťávy – Při fermentaci píce uniká určité množství šťáv. Aby nedocházelo k úniku je zapotřebí zajistit odvodňovací příkopy nebo nepropustné žlaby.
- Kejda – je suspenze tuhých výkalů a moči zemědělských zvířat a technologické vody. Využívá se k přímému hnojení půdy a kompostování.
- Pesticidy – je biologicky aktivní látka, která se používá pro ochranu rostlin před škodlivými činiteli. Pesticidy se mohou rozdělit podle druhu působení – kontaktní, požerové a dýchací.
- Splachy – jsou velkým problémem, se kterým se setkáváme skutečně všude, i v lokalitách ochranných pásem vodárenských zdrojů pitné vody. Kvůli erozi zemědělsky využívaných pozemků se ornice dostává do koryt i při běžných deštích. Jako řešení se nabízí snížení trofie nebo likvidace vzrostlých rostlin.

**Srážková odpadní voda**

Pojem srážková voda je popsán v [9]. Srážková voda je získávána z dešťových srážek, ale i sněhových. Kvalita samotné vody se označuje za jednu z nejcistějších. Problém ovšem je, že srážková voda není zcela chemicky čistá. Voda obsahuje různé látky, které do sebe vstřebává, jako jsou například oxidy uhlíku nebo dusíku, popřípadě pyl, bakterie a viry. Její znečištění je ovšem zanedbatelné z pohledu odpadních vod. Problém nastává, když se srážková voda smísí s vodou v kanalizaci. Nejproblematictější srážková voda je ta, která spadá v oblasti měst, silnic atd. Takle voda může obsahovat stopy ropných i jiných chemických látek. Srážková voda zbytečně ředí vodu v kanalizacích, kterou je nutné čistit, zvyšuje se tak objem pro čištění. Aby se snížilo množství srážkové vody v kanalizaci a čistírnách odpadních vod, tak se využívá suchých poldrů.



## 2.2 Druhy znečištění

### Odpadní vody z povrchové úpravy kovů

Charakteristiku odpadních vod z povrchových úprav lze nalézt v [14], [15]. Odpadní vody jsou vedlejším produktem v procesech povrchových úprav kovů, které obsahují velký podíl kontaminantů a dalších nežádoucích složek. Tyto látky ohrožují životní prostředí i zdraví člověka. Jedná se především o vysoké koncentrace těžkých kovů, kyanidů, organického znečištění a nerozpuštěných látek. Těžké kovy jsou známé svou vysokou toxicitou a karcinogenitou. V průmyslových odpadních vodách jsou dle typu povrchové úpravy zastoupeny tyto prvky: kadmium, chrom, měď, nikl, stříbro, zinek a olovo.

### Odpadní vody z tepelného zpracování uhlí

Při zpracování hnědého uhlí (zplynování) a černého uhlí (koks) vzniká fenolčpavkový kondenzát. Množství kondenzátu závisí na vstupní vlhkosti uhlí [15]. Běžné hodnoty koncentrace znečišťujících látek jsou uvedeny v Tabulce 2.2.

Tabulka 2.2 – Přehled látek z odpadní vody z tepelného zpracování uhlí [15]

Ukazatel	Koncentrace mg/l	
	Výroba koksu	Zplynování
Fenoly	200–250	500–6000
H <sub>2</sub> S – sulfan neboli sirovodík	60	100–1500
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> - amonný kation	200–1200	100–4000
BSK <sub>5</sub>	1000–5300	3700–8400
Rozpuštěné látky	2400–8000	–
pH	8400–9300	7000–8500

### Odpadní vody z papírenského průmyslu

Z papírenského průmyslu vznikají také odpadní vody, nejsou však tak zatížené jako v ostatních chemických odvětvích. Odpadní vody mají vysoký obsah nerozpuštěných látek, které vznikají přímo u papírenského stroje a jsou to zbytky buničiny a mokrého papíru. Tyto vody lze ve velkém množství recyklovat a znovu použít třeba na zmáčení papíru [14].

**Odpadní vody z potravinářského průmyslu**

Následující pasáž ohledně odpadní vody z potravinářského průmyslu čerpá z [14], [15], [16]. Odpadní vody z potravinářského průmyslu obsahují vysoký podíl organických látek, vyjádřené parametry CHSK A BSK<sub>5</sub>, tuků a taky nerozpuštěných látek. Potravinářský průmysl vypouští cca 15% veškeré produkce průmyslových odpadních vod, v nichž je obsaženo až 50 % organických látek produkovaných průmyslem. Charakter potravinářských odpadních vod závisí na technologii výroby a zpracovávané surovině. Koncentrace znečištění v těchto odvětví průmyslu, jejichž hodnoty jsou uvedeny v Tabulce 2.3, značně překračují povolení limity kanalizačního řádu.

Tabulka 2.3 – Přehled látek z odpadní vody z potravinářského průmyslu [15]

Ukazatel	Koncentrace mg/l			
	pivovar	droždárna	jatka	mlékárna
Nerozpuštěné látky	300	100	1600	250
Rozpuštěné látky	1200	5300	1000	1850
CHSK	2400	3460	950	2700
BSK <sub>5</sub>	1850	2200	600	1950
N (dusík)	35	170	–	120
pH	6,0	6,6	7,3	6,2

**Odpadní vody ze zpracování ropy**

Při zpracování ropy vzniká jako vedlejší produkt odpadní voda, která obsahuje ropné látky, převážně volné, ale také v emulgované a rozpuštěné formě. Zaolejované vody pocházejí z chladících okruhů, oplachů a úkapů, výrobních zařízení, prostorů skladovacích nádrží a zásobníků ropy, a také z konečných produktů. Chemicky znečištěné vody, které jsou obsaženy ve stabilní ropné emulzi, jsou znečištěny z důsledku odvodňování a odsolování ropy a z některých syntetických pochodů [15].

**Odpadní vody z chemického průmyslu**

Charakteristika a rozdělení odpadní vody z chemického průmyslu lze nalézt v [14], [15]. Odpadní vody z chemického průmyslu jsou nejnáročnější na čištění a jsou nejvíce proměnlivými. Odpadní vodu lze rozdělit na dva hlavní typy:

- Odpadní vody z anorganických výrob obsahují převážně nerozpuštěné anorganické látky, kyseliny, rozpuštěné soli, které jsou ve vysokých koncentracích, také zde můžeme nalézt těžké kovy (měď, zinek, olovo, rtuť a baryum) a další toxické chemikálie (chlor, hydrazin a sulfidy).
- Odpadní vody z organických výrob obsahují anorganické látky (kyseliny, soli, těžké kovy) a organické látky.

Tyto odpadní vody mají často nerovnoměrnou hodnotu pH a teplotu. Zdrojem znečištění jsou například: řezné emulze, barvy, alkalické/kyselé vody.

**Odpadní vody z prádelen**

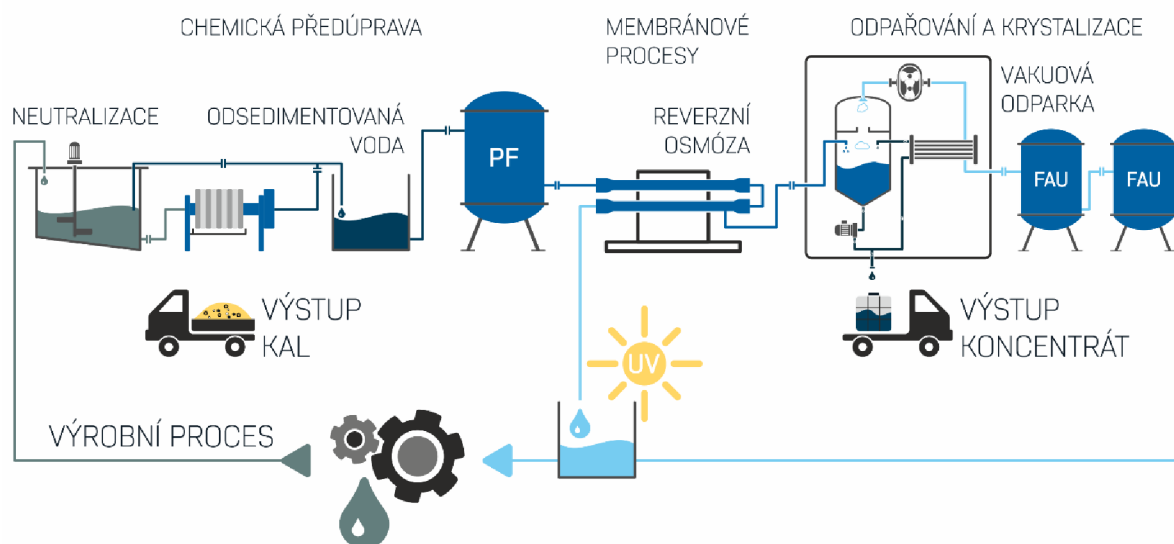
Informace ohledně odpadní vody z prádelen lze nalézt v [14], [17]. Technologie čištění odpadních vod z prádelen umožňuje separaci od znečištěných průmyslových odpadních vod a zbytkového znečištění mechanickými nečistotami, bělicími přípravky a tenzidy. Avšak hlavním problémem je zpravidla vysoké pH. Odpadním vodám z prádelen se věnuje mnohem více pozornosti, a to ze dvou důvodů. Jako prvním důvodem je ekonomika – voda se při praní ohřívá, a tak by recyklace znamenala nejen úsporu vody ale i energie. Druhým důvodem je ekologie. Množství a kvalita vypouštěných vod se samozřejmě liší díky různým úrovním prádelenské techniky a zdroje prádla. Uvádí se, že na 1 kg prádla se spotřebuje cca 20 až 30 litrů vody v moderní prádelně. Tabulka 2.4 uvádí průměrné parametry znečištění odpadních vod z prádelen v ČR.

Tabulka 2.4 – Přehled látek odpadní vody z prádelen [17]

Název	Průměrné nečištění
BSK <sub>5</sub>	250–400 mg/l
CHSK <sub>5</sub> (Cr)	600–800 mg/l
Tenzidy	15–30 mg/l
Fosforečnany	3–4 mg/l
pH	9,5–10,5
Teplota	45–55 °C

### 3 ZERO LIQUID DISCHARGE

Charakteristika systému lze nalézt v [3], [18]. ZLD je proces úpravy vody navržený k odstranění veškerého kapalného odpadu ze systému. Cílem procesu je ekonomicky snížit množství vody a produkovat čistou vodu k opětovnému použití. Systémy ZLD využívají pokročilé technologie pro čištění odpadních vod, odsolování a recyklaci. Systém ZLD lze rozdělit do tří hlavních fází procesu. První fází je předúprava, kde se odpadní voda ošetří dle znečištění. Další fází je předkoncentrace, kde se pomocí membránových procesů separuje voda od odpadního proudu. Třetí fází je odpařování a krystalizace. V procesu odpařování se dále separuje voda a zahušťuje odpadní proud. Při vhodných podmínkách a vysoké koncentraci pak může docházet ke krystalizaci látek, které lze dále využívat. Vodu, která je během celého procesu separována, lze taktéž dále účelně využít.



Obrázek 3.1 – Schéma ZLD [3]

Systém dává ekonomický, a hlavně ekologický smysl. Především na místech, kde se odvádějí velké objemy procesní vody dobré kvality, kde je nedostatek zdrojové vody, kde je problém s vypouštěním odpadní vody nebo kde se zakoncentrovaný odpad stává surovinou a lze jeho obsah recyklovat. Systém ZLD lze využít například:

- pro vodu z chladících věží těžkého průmyslu a elektráren
- při zpracování potravin a nápojů
- pro odsíření spalin
- pro opětovné použití vody ze zemědělských, průmyslových a komunálních toků
- pro odpadní vody z textilního, chemického, potravinářského průmyslu atd.

Například ve výrobním procesu se procesní voda používá k různým účelům a působí na ní celá řada vlivů znečištění. Při určitém stupni znečištění se voda stává nepoužitelnou. V té chvíli se z procesní vody stává odpadní. Pokud se použije proces čištění pomocí systému ZLD, lze vodu vrátit zpět do výrobního procesu a tím vytvořit uzavřený okruh. V uzavřeném okruhu dochází k malé ztrátě vody, kterou může způsobovat odpařování z otevřených nádrží, zbytkovou vlhkostí atd. Je tedy nutné vodu systému doplňovat, avšak objem doplňované vody je v uzavřeném systému nesrovnatelně nižší než v otevřeném systému bez recyklace.

Při návrhu ZLD je nutné přesně nadefinovat:

- požadovaný výkon ČOV
- požadovanou kvalitu výstupní vody
- typ a stupeň znečištění všech proudů vstupní vody
- dostupné energie a jejich cena
- prostor pro instalaci

Cílem návrhu systému ZLD je:

- spolehlivý a bezpečný provoz
- eliminace vypouštění vody
- minimalizace hmotnosti odpadu
- minimalizace pořizovacích a provozních nákladů
- minimalizace spotřeby energie

Při návrhu systému ZLD je třeba počítat se změnami během provozu. V průběhu procesu se může měnit kvalita vody a její znečištění. S těmito výkyvy je nutné počítat a bez problému si s nimi poradit.

## 4 PŘEDÚPRAVA

Předúpravu lze popsat s využitím [3] a [6]. Odpadní vodu, ve většině případů musíme před procesem předkoncentrace správně upravit. Předúpravu představují fyzikálně – chemické procesy pro odstranění nežádoucích látek, které by mohly tvořit zásadní problém, při následujících technologických krocích. Z odpadní vody se především odstraňují těžké kovy, sráží se křemičitany a snižuje se tvrdost vody.

Cílem předúpravy je udržení stabilního výkonu zařízení ZLD, odstraňování zanášení systému ZLD usazeninami nerozpustných solí, biologického znečištění a ochrana před korozi. Dále předúprava snižuje nebezpečnost koncentrovaného odpadu. Předúprava odpadní vody má různé kroky procesu, jako je například aerobní nebo anaerobní proces, dále se může využívat adsorpce, koagulace atd.

Úprava vody se odvíjí od typu znečištění, proto je nutná podrobná analýza. Na základě hodnot těchto ukazatelů se navrhuje technologie předúpravy. Ve většině případů se využívá neutralizace, ovšem existuje několik dalších způsobů předúpravy. Zde jsou uvedeme některé často používané metody.

### Neutralizace odpadních vod

Popis neutralizace se nachází v [19]. Proces neutralizace odpadní vody používáme za účelem úpravy hodnoty pH. Je nutné splnit požadavky ZLD systému. Příkladem využití neutralizace je úprava kyselých vod s obsahem kovů. Přidáním zásaditého činidla dochází ke zvýšení hodnoty pH kyselého odpadu. Vytváří se sraženina, která shlukuje nežádoucí kovy. Výsledkem je vstupní roztok, jehož hodnota pH byla upravena na optimální rozsah.

### Redukce

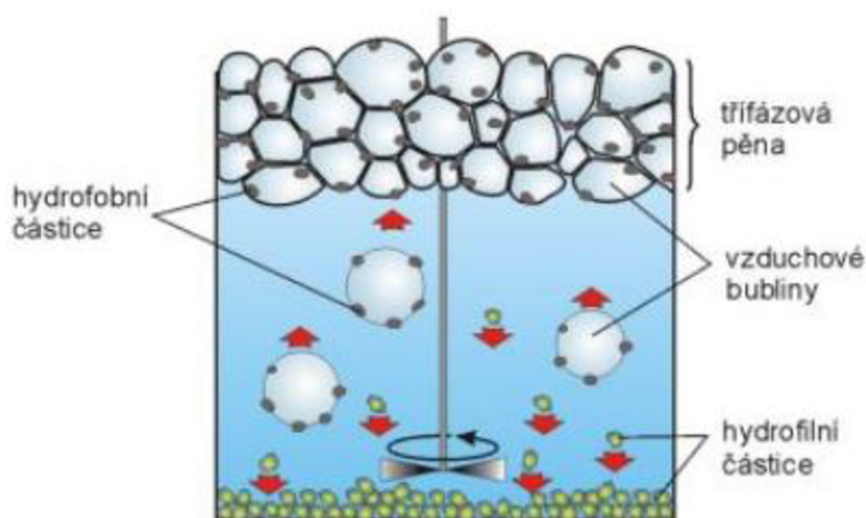
Redukční proces slouží k odbourávání polutantu pomocí redukčních činidel, která nejčastěji představují disířičitan, sířičitan eventuálně hydrogensířičitan sodný. Typická aplikace slouží k odstranění  $\text{Cr}^{6+}$  jeho redukcí sířičitanovými solemi na málo rozpustný  $\text{Cr}^{3+}$  [6].

## Mokrý oxidace odpadních vod

Princip MO lze nalézt v [20]. MO je proces oxidace, který probíhá ve vodě rozpuštěných nebo suspendovaných látek. Reakce probíhá v kapalně fázi při teplotách cca 150–300 °C a tlacích cca 10–200 bar. K urychlení oxidačního procesu, je možné do odpadní vody dávkovat homogenní katalyzátor na bázi železa. Volba vhodných reakčních podmínek (teplota, tlak, doba v reaktoru) je stanovena na základě laboratorních testů. Ovšem závisí na typu znečištění a na požadované hloubce jeho oxidace. Za těchto podmínek jsou organické látky oxidovány, přičemž dochází k jejich štěpení a přechodu na jednodušší oxidované uhlovodíky (nejčastěji karboxylové kyseliny) a dále až na oxid uhličitý. Tyto látky, jako je například kyselina octová, jsou již velice snadno biologicky odbouratelné. Během MO dojde k cca 65–95 % redukci CHSK (chemická spotřeba kyslíku) a ke ztrátě případné toxicity. Zároveň výrazně vzroste poměr BSK (biochemická spotřeba kyslíku) ku CHSK.

## Flotace

Obecný princip flotace můžeme nalézt v [21]. Flotace využívá rozdílnou smáčivost materiálů k jejich oddělování (ve vodě nebo ve vzduchu). Při praktické aplikaci se nejčastěji využívá pěnová flotace. Částice s hydrofobním (nesmáčivým s vodou) povrchem ulpívají na vzduchových bublinách, které je unášejí na povrch vody. Zde se shromažďují ve formě pěny, která se mechanicky odstraňuje a dopravuje k dalšímu zpracování. K částicím s hydrofilním povrchem (dobře smáčivým s vodou), vzduchové bubliny nepřilnou, tedy částice sedimentují a vytvářejí tak na dně flotační odpad. Hlavními výhodami jsou vysoká separační účinnost i u špatně usaditelných částic, vyšší kvalita upravené vody, efektivní a ekonomický provoz, rychlý náběh flotace, snížení zatížení následujícího separačního stupně [22].



Obrázek 4.1 – Schéma pěnové flotace [21]



V Tabulce 4.1 můžeme vidět naměřené hodnoty odpadní vody z jatek před flotací a po flotaci, od firmy, která se zabývá technologií pro čištění odpadních vod s modifikací pro potravinářský průmysl. Nadměrné koncentrace způsobují zbytky krve, tuky a další znečištění živočišného původu [16]. Na Obrázku 4.2 můžeme vidět 3 fáze procesu flotace. Odpadní mlékárenská voda (1450 BSK<sub>5</sub>) → nasycená voda (vzduch + chemikálie) → voda po přečištění (170 BSK<sub>5</sub>) [16].

Tabulka 4.1 – Naměřené hodnoty látek odpadní vody z jatek [16]

	Hodnoty odpadní vody před flotací	Hodnoty odpadní vody po flotaci	Procentuální vyjádření účinnosti flotace
CHSK	10000–12000mg/l	200–900 mg/l	92–98 %
BSK <sub>5</sub>	5000–6000 mg/l	150–500 mg/l	92–98 %
Tuky	2000–5400 mg/l	10–20 mg/l	96–99 %



Obrázek 4.2 – Proces flotace [16]



## 5 PŘEDKONCENTRACE

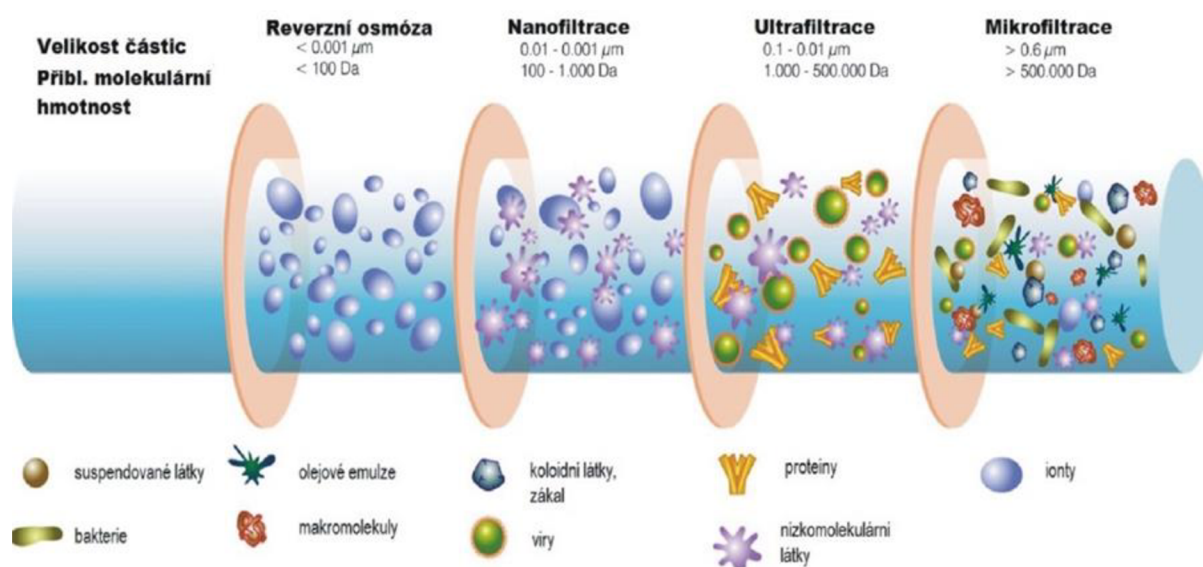
Předkoncentrace je dalším krokem v ZLD systému, který k separaci využívá membránové procesy. Používají se především pro velké objemy s nižší koncentrací znečištění. Podle typu znečištění se volí správný membránový systém. Díky předúpravě odpadní vody, lze minimalizovat četnost údržby systému, lze jím prodloužit životnost materiálu membrán a nepředstavuje takovou zátěž pro systém. Těmito membránovými metodami lze při správně zvolené technologii získat zpět až 80 % demineralizované vody [3].

### 5.1 Tlakové membránové procesy

Charakteristika tlakových membránových procesů je vyjádřena v [23]. Membránové separační procesy mají jednu společnou vlastnost, a to využití selektivní polopropustné (semipermeabilní) membrány jako základního separačního elementu a tlakového rozdílu jako hnací síly transportu membránou.

Zpracovávaná odpadní voda (nástřík) je přiváděna tak, aby byla v kontaktu s vrstvou membrány. Membrána zadržuje retentát a propouští permeát, obě tyto složky mohou být brány za produkty. Míra průniku membránou tzv. selektivita procesu, může být dána rozdílnou velikostí pórů membrány a separovaných částic, rozdílnými povrchovými vlastnostmi jako je například smáčivost, nebo rozdílnou difuzí.

Tlakové membránové procesy se využívají ke koncentrování nebo čištění roztoků. Velikost separovaných částic nebo molekul a chemické vlastnosti rozpouštědla jsou určujícími faktory pro výběr vhodného typu membrány. Prostupnost membrán je ilustrována na Obrázku 5.1 a přehled dalších vlastností je uveden v Tabulce 5.1.



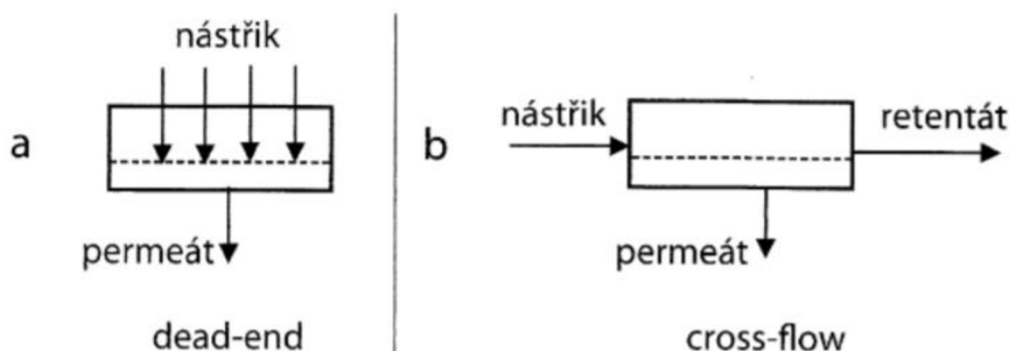
Obrázek 5.1 – Přehled prostupnosti membrán [14]

Tabulka 5.1 – Porovnání tlakových membránových procesů [23]

Parametry	Metoda		
	Mikrofiltrace	Ultrafiltrace	Nanofiltrace a RO
<b>Možnost použití</b>	separace částic, bakterií a kvasinek	separace koloidních částic a makromolekul	separace nízkomolekulárních látek (solí, glukosa, laktosa)
<b>Osmotický tlak</b>	zanedbatelný	zanedbatelný	velký ( $1-25 \cdot 10^5$ Pa)
<b>Rozdíl tlaků</b>	malý ( $<4 \cdot 10^5$ Pa)	malý ( $1-10 \cdot 10^5$ Pa)	velký ( $10-100 \cdot 10^5$ Pa)
<b>Struktura membrány</b>	symetrická i asymetrická	asymetrická	asymetrická
<b>Tloušťka separující vrstvy</b>	symetrické 10–150 $\mu\text{m}$ asymetrické přibližně 1 $\mu\text{m}$	0,1–1,0 $\mu\text{m}$	0,1–1,0 $\mu\text{m}$
<b>Princip separace</b>	rozdílná velikost částic	rozdílná velikost částic	rozdílná rozpustnost a difuzivita
<b>Materiál membrán</b>	polymery, keramika	polymery, keramika	acetáty, celulózy, polyamidy
<b>Velikost pórů</b>	0,05–10 $\mu\text{m}$	1–100 nm	<2 nm

### 5.1.1 Mikrofiltrace

Popis mikrofiltrace vychází z [23]. Mikrofiltrace je proces, který se nejvíce podobá klasické filtraci. Mikrofiltrace se běžně používá jako předúprava pro ostatní separační procesy. Membrány jsou speciálně navrženy tak, aby zabránily částicím jako jsou například sedimenty, řasy, prvoci nebo velké bakterie. Velikost pórů mikrofiltračních membrán se pohybuje v rozmezí od 0,05 do 10  $\mu\text{m}$ . Tento proces se uplatňuje především pro dělení suspenzí a disperzí. Mikrofiltrační membrány se vyrábí jak z organických látek (polymerů), tak i anorganických (keramika, kov, sklo). Nejčastěji se jedná o asymetrické a symetrické membrány, popřípadě kompozitní a porézní membrány. Z hlediska procesního uspořádání existují dva typy mikrofiltrace: uspořádání dead – end a cross – flow (viz Obrázek 5.2).



Obrázek 5.2 – Typy mikrofiltrace [23]

Při uspořádání dead – end natéká nástříkový proud kolmo na membránu a zachycené částice tvoří na jejím povrchu vrstvu. Při separaci cross – flow protéká nástřík podél povrchu membrány, na kterém se zachycuje jen část částic z roztoku.

Mikrofiltrace má obecně mnohá využití. V průmyslovém odvětví se nejvíce využívá jako předcházející proces reverzní osmózy při výrobě velmi čisté vody a procesní vody. Velké uplatnění má v procesech čištění odpadních vod, zvláště ve zpracování odpadních proudů ve speciálních chemických technologiích, kde je umožňována snadná a rychlá recyklace cenných látek jejich zkoncentrováním.

### 5.1.2 Ultrafiltrace

Ultrafiltrace je popsána v [24], [25], [26]. Ultrafiltrace se řadí mezi membránové procesy. Pomocí ultrafiltrace dochází k separaci roztoku membránou. Membrány jsou s porozitou v řádech desítek až stovek nanometrů.

Podle způsobu zachycování částic se volí vhodný způsob čištění membrán. Jako možný způsob odstranění zachycených částic je zpětný proplach membrány, který může být chemicky posílený. Použití chemikálií je nutné v případě, že na membránách dochází k srážení anorganických sloučenin, nebo když se na membránách usazují organické sloučeniny. Pro ideální průchod vody přes membránu se voda vystavuje předúpravě, která eliminuje nežádoucí látky. Předúprava se především zaměřuje na odstranění organických látek, které se hůře odstraňují v případě ulpění na membráně.

Velká většina dnešních membrán je vyráběna z polymerů (PVDF–Polyvinylidenfluorid, PES – Polyesterová vlákna [27]) a okrajově se používají materiály keramické. Nejčastějším způsobem uspořádání ultrafiltračních membrán je tzv. modul s dutými vlákny. Dalším používaným způsobem jsou trubicové moduly.

Ultrafiltrace je kompaktní alternativa k tradičním filtračním technologiím úpravy vody. Při velikosti pórů membrány (od 1 do 100 nm), a při pracovním tlaku (1 až 10 barů) je ultrafiltrace schopna pohltit až 99,9 % bakterií. Ultrafiltrace se může používat jako předčišťující krok reverzní osmózy (mikrobiologická ochrana) nebo nanofiltrace. Hlavními výhodami ultrafiltrace je maximální dezinfekce a odstranění suspence.

### 5.1.3 Nanofiltrace

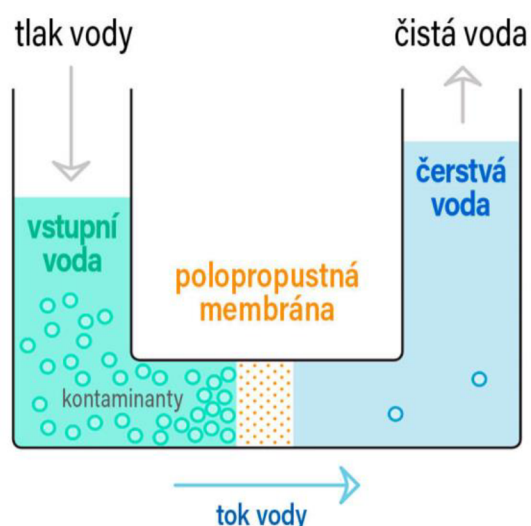
Informace ohledně nanofiltrace lze nalézt v [23]. Nanofiltrace je tlakový membránový proces, při kterém jsou primárně oddělovány organické látky s nízkou molekulovou hmotností (200 až 1000 Da), vícevalentní soli od jednovalentních a molekul rozpouštědla. Velikost aplikovaných tlaků se pohybuje v rozmezí  $10\text{--}40 \cdot 10^5$  Pa. Nanofiltrační a reverzně osmotické membrány představují jakýsi předěl mezi mikroporózními membránami a neporózními membránami pro pervaporace či separaci plynů. Póry nanofiltračních membrán obvykle bývají menší než 2 nm. Použité membrány se vyrábí převážně z tenkých polymerních filmů. Mechanismy transportu jsou ovlivňovány různými faktory, jako například: viskozitou rozpouštědla, tloušťkou membrány, velikostí pórů, pH roztoku atd.

Největší výhodou nanofiltrace je změkčování vody pomocí zadržení iontů vápníku a hořčíku, který vytvářejí vodní kámen. Kromě toho jsou nanofiltrační membrány schopny zachytit většinu nízkomolekulárních látek, jako jsou například herbicidy, pesticidy, barviva a cukry. Nanofiltrace se používá jako finální proces předkoncentrace, stejně jako reversní osmóza.

#### 5.1.4 Reverzní osmóza

Následující pasáž ohledně reverzní osmózy čerpá z [23], [28]. RO je membránový proces separace, který je schopný oddělit nízkomolekulární látky i jednovalentní ionty a vodní roztok. Používají se asymetrické membrány s vysokým hydrodynamickým odporem a s velikostí pórů do 2 nm. Aplikovaný tlak ( $10\text{--}100\cdot 10^5$  Pa) musí být vyšší než osmotický tlak systému. Pomocí této technologie lze odstranit téměř všechny nežádoucí látky.

Osmóza je děj, při kterém rozpouštědlo prochází polopropustnou membránou, která odděluje dva prostory. Na Obrázku 5.3 se v levém prostoru nachází voda s rozpuštěnou látkou, v pravém prostoru se pak nachází téměř čistá voda. V důsledku rozdílu koncentrací rozpuštěné látky na obou stranách membrány má rozpuštěná látka nutkání proniknout do čisté vody a voda do roztoku. Ovšem vzhledem k působení tlaku na straně roztoku a vzhledem k velikosti pórů membrány je dovozen pouze průstup vody z roztoku. Rozpuštěná látka je zadržována membránou a tím dochází k zakoncentrování roztoku.



Obrázek 5.3 – Schéma principu RO [29]

Materiály pro reverzně osmotické membrány se skládají z esterů, celulosy a především diacetátu a triacetátu celulosy. Tyto materiály jsou vhodné především pro vysokou propustnost pro vodu a nízkou permeabilitu pro sůl. Jejich chemická, tepelná a bakteriální odolnost je ale velmi nízká. Dalším vhodným materiálem jsou aromatické polymery, též vykazují vysokou selektivitu pro sůl, ovšem jejich permeabilita pro sůl je poněkud nižší. Moduly se používají výhradně spirálně vinuté, výjimečně dutá vlákna [27].

Reverzní osmóza je využívána v řadě aplikací. Především se jedná o čištění odpadních vod z různých odvětví průmyslu, dále odsolování mořské vody, čištění vody ze studní nebo zkoncentrování rozpuštěné složky. Velký význam má i produkce ultra čisté vody používané při výrobě polovodičů nebo ve farmaceutickém průmyslu.

Hlavními výhodami RO v případě využití v příznivých podmínkách jsou například:

- nepřerušovaný provoz zařízení RO  
(čištění membrán představuje okolo desítek hodin ročně)
- kvalita produkované vody je konstantní
- proces je ekologicky nezávadný
- jednoduchost procesu
- nároky na údržbu i obsluhu jsou minimální
- nízké provozní náklady

### 5.1.5 Dopředná osmóza

Informace ohledně dopředné osmózy lze najít v [30], [31]. Dopředná osmóza (forward osmosis – FO) je proces, při kterém dojde k oddělení vody od rozpuštěných látek pomocí polopropustné membrány. FO využívá přírodní energii ve formě osmotického tlaku k transportu vody přes membránu, zatímco zadržuje rozpuštěné látky na druhé straně. Hlavním rozdílem mezi RO a FO je v tom, jak je voda poháněna přes membránu. V RO je voda vytlačována přes membránu pomocí hydraulického tlaku.

Většina aplikací FO tedy spadá do tří širokých kategorií: koncentrace produktu, koncentrace odpadu nebo výroba čisté vody jako vedlejšího produktu procesu koncentrace. Nejúčinnější aplikace FO kombinují všechny tři. V nejlepším případě může FO koncentrovat odpad a přeměnit jej na produkt při výrobě čisté vody.

### 5.1.6 Membránová destilace

Charakteristiku membránové destilace lze nalézt v [26], [32], [33]. Membránová destilace (Membrane distillation – MD) je proces, který využíváme k oddělení nebo čištění kapalin. Technologie membránové destilace funguje na principu vzniku rozdílu teplot přes speciální membránu. Pára se nachází v komoře, kde stoupá tlak. Tlak tlačí molekuly páry přes membránu. Typ membrány, který se používá v tomto destilačním procesu, umožňuje průchod pouze parám, to má za důsledek, že nečistoty jsou zachycovány membránou. Poté co pára projde membránou, narazí na chladné médium nebo povrch, který způsobí kondenzaci. Výsledkem je čistá voda složená pouze z molekul páry. Tento typ destilace má uplatnění v průmyslových závodech, kde určité kapaliny musí být separovány ze směsi, a v odsolovacích závodech, kde musí být získávána sladká voda ze slané vody.

Existuje několik typů membránových destilačních procesů. Způsob, jakým je rozdíl tlaků par generován přes membránu je určen specifickou konfigurací modulu. Nejčastěji využívaná konfigurace je membránová destilace s přímým kontaktem (DCMD – Direct Contact Membrane Distillation). Tato metoda se ve většině případů používá při odsolování. Alternativou může být konfigurace AGMD (Air Gap Membrane Distillation), VMD (Vacuum Membrane Distillation), nebo SGMD (Sweeping Gas Membrane Distillation). V posledních dvou případech dochází ke kondenzaci molekul par mimo membránový modul. Tyto techniky jsou užitečné pro odstranění nežádoucích sloučenin z původní směsi.

Výsledkem membránové destilace je čistá voda, ale jako produkt můžeme brát i koncentrát. Membránová destilace se používá k odstranění solí a jiných minerálních nečistot z vody. Může být, ale také užitečná při odstraňování specifických chemikálií nebo při tvoření koncentrovaných směsí, tedy když pára destiluje přes membránu, je odstraněna z původní směsi, čímž se původní směs více koncentruje.

Hlavní výhodou membránové destilace ve srovnání s ostatními metodami je nízká pracovní teplota a tlak. Z toho plynou nižší náklady na energii. Dále je MD méně náchylná k omezení toku, který může být způsobený polarizační koncentrací, čímž se získává vyšší koncentrace hmoty.



## 5.2 Elektromembránové procesy

Přehled a popis elektromembránových procesů lze nalézt v [23], [26]. Elektromembránové procesy patří do skupiny membránových procesů, které se vyznačují tím, že hnací silou transportu je gradient elektrického potenciálu, který je aplikován na iontově výměnné nebo bipolární membrány. Podle jejich charakteru je lze rozdělit na separační procesy, syntézní procesy a systémy pro konverzi energie.

Elektromembránové separační procesy jsou schopny oddělovat záporné částice od kladně nabitých podle jejich migrace k příslušným elektrodám nebo obecně separovat elektrolyt od neelektrolytu. K přemístění lze použít iontově výměnné membrány, kterými je selektivně transportován elektrolyt, resp. jen určitý druh iontů. Mezi tyto procesy patří například elektrodialýza (ED) a elektrodeionizace (EDI). Existují i další procesy odvozené z těchto základních jako je například elektrodialýza s reverzační polaritou (EDR), elektrodialýza pro vysoké zkoncentrování tzv. elektrodialýzační koncentrátor (ED – C) atd.

Elektromembránové syntézní procesy využívají transport iontů v elektrickém poli řízený selektivitou iontově výměnných membrán v kombinaci s chemickou nebo elektrochemickou reakcí. Jedná se především o membránovou elektrolyzu (ME), vícekomorovou elektrodialýzu (EDS) nebo elektrodialýzu s bipolárními membránami (EDBM).

Hlavní součástí všech elektrochemických systémů představuje elektroda. Skládá se obvykle z kovu s elektronovou vodivostí. Úlohou elektrody je přivést k rozhraní elektroda/elektrolyt (či od něj) odpovídající elektrický náboj. Na jejím rozhraní dochází pak k reakci tzv. k přenosu náboje přes fázové rozhraní prostřednictvím změny oxidačního stavu elektroaktivní látky adsorbované na elektrodovém povrchu.

Elektrolyt je obecně iontový vodič, který je zároveň elektronovým izolantem. Jeho role v systému spočívá v elektronové izolaci obou elektrod a zároveň v uzavření elektrického okruhu prostřednictvím iontů volně pohyblivých v systému.

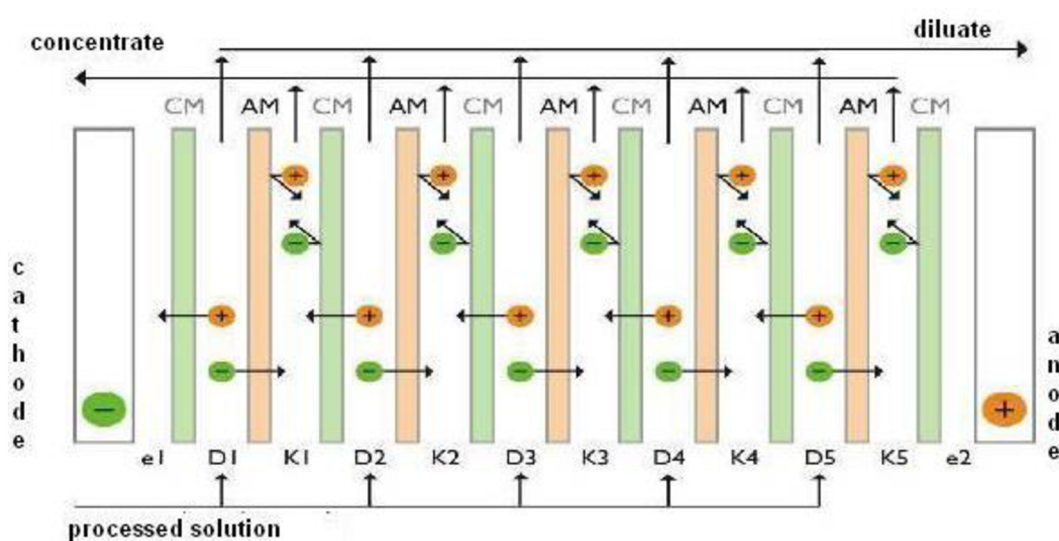
U elektromembránových procesů se využívají katexové a anexové membrány. Katexové membrány (CM) obsahují v polymerní matici vázané záporně nabitě, kyselé iontovýmenné skupiny, a tak umožňují volný průchod jen kladně nabitých částic, protože průchod záporně nabitých částic je značně omezen. Anexové membrány obsahují zásadité, kationtové fixované skupiny, a tak umožňují volný průchod jen záporně nabitých částic, protože průchod kladně nabitých částic je značně omezen (opačně než u katexové membrány).

Detailněji jsou představeny pouze elektrodialýza a elektrodeionizace.



### 5.2.1 Elektrodialýza

Informace ohledně elektrodialýzy lze nalézt v [23], [26]. Elektrodialýza (ED) je elektromembránový separační proces, při kterém působí stejnosměrné elektrické pole na pohyb disociovaných složek solí ve vodním roztoku. Tento princip funguje tak, že kationty pohybující se ke katodě jsou propuštěny kationtově výměnnými membránami a zadržovány aniontově výměnnými membránami, zatímco anionty přitahované k anodě jsou propuštěny aniontově výměnnými membránami a zadržovány na kationtově výměnných membránách. Vhodnou kombinací CM a AM dochází k rozdělování iontů ve zpracovávaném roztoku, což má za následek rozdělení proudu na odsolený, tzv. diluát (D) a proud koncentrovaný, tzv. koncentrát (K), jak lze vidět na Obrázku 5.4.



Obrázek 5.4 – Schéma principu elektrodialýzy [27]

Separace je tedy dosahována vlivem elektrického pole a díky rozdílné propustnosti membrán pro jednotlivé složky v roztoku. U obou elektrod cirkuluje elektrodový roztok, který zajišťuje pravidelné omývání jejich povrchu a neúčastní se elektrodialyzační separace.

Nejčastějším využitím elektrodialýzy je odsolování podzemní nebo mořské vody pro potřeby výroby pitné vody, výroby solného koncentrátu, čištění odpadních a průmyslových vod a také k separaci organických a anorganických látek. Může se také využívat k demineralizaci mléčných syrovátek.

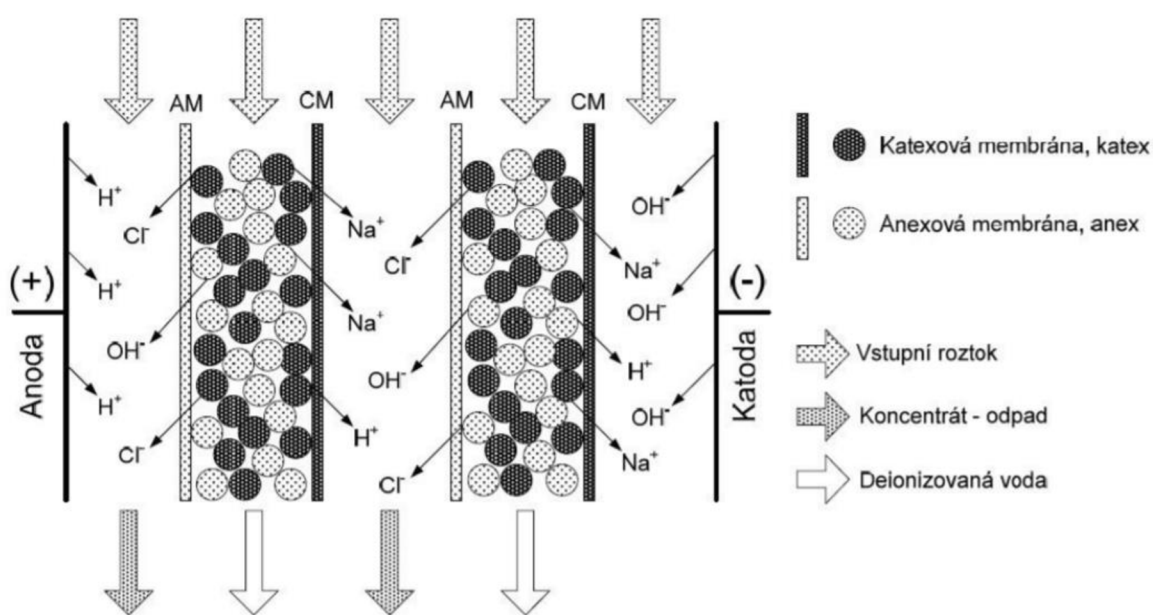
## 5.2.2 Elektrodeionizace

Následující pasáž ohledně elektrodeionizace čerpá z [23], [26]. Elektrodeionizace (EDI) je elektromembránový separační proces, používaný k hluboké demineralizaci málo vodivých roztoků. Kombinuje elektrodialýzu a iontově výměnné technologie. Výsledkem je hybridní proces, při kterém dochází k intenzifikaci demineralizace zředěných roztoků. Jde vlastně o vylepšení ED o diluátové komory se směsným nebo děleným ložem ionxů (anexů/katexů).

Princip je tedy následovný (viz Obrázek 5.5), elektrolyt je z roztoku odčerpáván na orientovaných bipolárních rozhraních. Ionty zachycené zrní měniče (anex/katex) se přemisťují ložem směrem k příslušné membráně a do přilehlé koncentrované komory. Ve vstupní části diluátové komory, zůstávají měniče a membrány v solných formách, které odpovídají složení roztoku. Průchodem diluátovou komorou se roztok postupně zředuje. Na orientovaných bipolárních rozhraních vznikají značné gradienty potenciálu elektrického pole. Za těchto podmínek dochází ke štěpení vody na ionty, které regenerují příslušné měniče iontů (ionexy) a membrány. Kontinuálně regenerované lože pak dočistí vodu od zbytku silných elektrolytů a odstraní zejména elektrolyty, například  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SiO}_3$ , huminové látky apod. Z toho vyplývá, že EDI využívá 2 mechanismy:

- mechanismus zvýšeného transportu hmoty, který souvisí s rozšířením účinné iontové výměnné plochy membrány o povrch zrní měničů iontů
- mechanismus elektroregenerace, který souvisí se štěpením vody na ionty  $\text{H}_3\text{O}^+$  a  $\text{OH}^-$  regenerující příslušné měniče iontů i membrány

Mezi hlavní aplikace elektrodeionizace je výroba destilované vody používané ve farmacii nebo při výrobě elektroniky.



Obrázek 5.5 – Schéma principu elektrodeionizace [34]

### 5.3 Hlavní výhody a nevýhody membránových procesů

Výhody a nevýhody lze nalézt v [3], [35], [36]. Membránové procesy mají mnoho výhod, ale tak i nevýhod. Největší výhodou je vysoká účinnost separace, která může být vyšší jak 90 %.

#### VÝHODY

- šetrný způsob zpracování suroviny bez výrazných teplotních změn
- vysoká účinnost separace
- možnost snadné instalace a uspořádání do modulů
- menší spotřeba energie v porovnání s tepelnými operacemi (vypařování, kondenzace)
- konstrukčně jednoduchá, nenáročná na obsluhu a umožňuje kontinuální provoz
- snížení spotřeby chemikálií

#### NEVÝHODY

- pořizovací cena membrán a omezená životnost
- výběr vhodného typu membrány a vhodné konfigurace
- návržení vhodných provozních parametrů, jako jsou velikost intenzity toku permeátu, cross – flow rychlosti, aplikovaného tlakového rozdílu apod.

## 6 ODPAŘOVÁNÍ

Úvodní pasáž čerpá z [37]. Odpařování je fyzikální proces, při kterém se uvolňuje pára z povrchu a taky z celého objemu kapaliny. K procesu odpařování je nutné zvolit správnou kombinaci teploty a tlaku odpařované látky. Princip odpařování je založen na zákonu zachování energie. Do systému se dodává energie v podobě tepla, která se mění na kinetickou energii. V roztoku se molekuly pohybují stále vyšší rychlostí a po překročení určité hranice, přejdou do plynné fáze.

Roztok k odpařování přivádíme do zařízení, které obecně nazýváme odparka. Podle typu odparky je řídký roztok různým způsobem zahušťován, dokud nedostaneme roztok s požadovanou koncentrací neboli koncentrát. Dalším produktem je destilát, který vzniká kondenzací par. Odparky se skládají z těla (prostor, kde probíhá odpařování), topné soustavy (systém, který přivádí teplo do těla odparky), separátoru kapek, kondenzační sekce, přívodního a odvodního potrubí.

Existují různé druhy odparek, které lze rozdělit dle několika kritérií:

Z hlediska provozu dělíme na:

- **odparky pracující kontinuálně** – pracují s trvale přiváděným řídkým roztokem a simultánně vypouští koncentrát, odparka pracuje nepřetržitě
- **odparky s vsádkovým provozem** – do těchto odparek se napouští určité množství roztoku a po odpaření se koncentrát s požadovanou koncentrací vypustí, odparka je poté znovu naplněna a proces se opakuje

Podle pohybu roztoku dělíme odparky:

- **s přirozenou cirkulací** – ke svému chodu nepotřebují spotřebovávat další energii na pohánění roztoku a také jsou konstrukčně jednoduché
- **s nucenou cirkulací** – využití pro roztok s vysokou koncentrací, k pohonu roztoku je využíváno čerpadlo nebo míchadlo
- **filmové s padajícím filmem** – roztok teče po ohřivaném povrchu v tenkém filmu, filmu se dosahuje speciálním přívodem roztoku na stěny topné soustavy
- **filmové se stoupajícím filmem** – princip stejný, jak s padajícím filmem ovšem film v průběhu stoupá
- **odparky s mechanickými prvky (rotorové)** – vytvoření filmu je v odparkách obstaráno rotorem s klapkami.

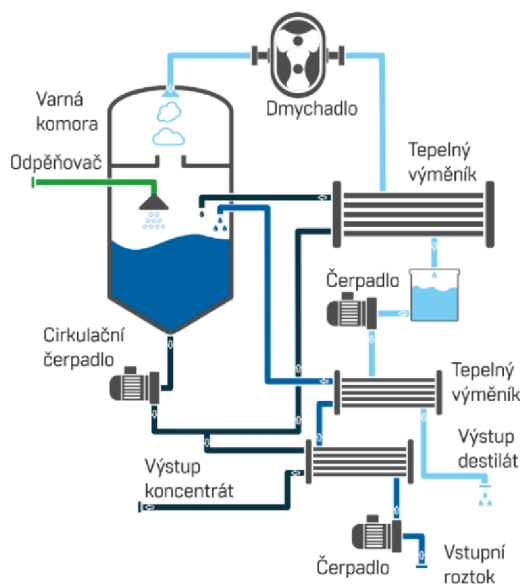
Dalším kritériem dělení, je z hlediska zdroje energie:

- **odparky s kompresí páry**
- **odparky s tepelným čerpadlem**
- **odparky s externím zdrojem tepla**

Odpařování je možné provádět za atmosférického tlaku nebo i v přetlaku, ovšem nejběžnější je z důvodu menší energetické náročnosti prováděno odpařování v podtlaku – tzv. vakuové odparky. Dále budou popsány principy jednostupňových vakuových odparek a energeticky efektivních vícestupňových vakuových odparek.

## 6.1 Jednostupňové vakuové odparky

Princip a charakteristiku odparek lze demonstrovat s využitím popisu konkrétního výrobku AQUADEST-D (viz Obrázek 6.1) firmy Kovofiniš [38]. Jedná se o vakuovou odparku s nucenou cirkulací a s mechanickou kompresí par pracující kontinuálně.

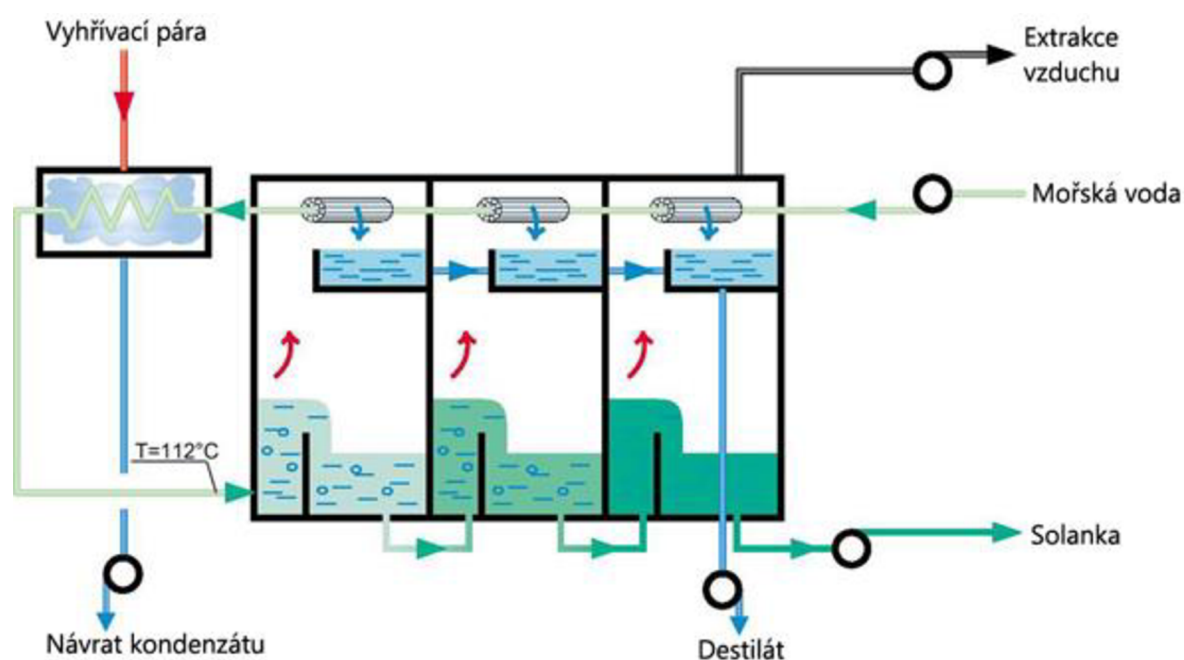


Obrázek 6.1 – Schéma vakuové odparky s mechanickou kompresí [38]

Na vstupu do odparky roztok vtéká do varné komory přes sérii tepelných výměníků. Jako první výměník je výměník na výstupu koncentráту, kde vstupní roztok získává zbytkové teplo z vypouštěného koncentráту. Druhý výměník je tepelný výměník výstupu destilátu, kde vstupní roztok získává zbytkové teplo z vypouštěného destilátu. Tento přehřátý vstupní roztok vstupuje do varné komory, kde se smíchá s roztokem ve varné komoře. Odtud je pomocí čerpadla hnán přes výměník, ve kterém se ohřeje, zpět do varné komory. Při vstupu do varné komory dochází k rychlému odpaření, část roztoku se díky vysoké teplotě a prudkému poklesu tlaku okamžitě vypaří. Část roztoku, která se neodpařila zůstává ve varné komoře a poté znovu cirkuluje v okruhu s koncentrátem. Vypařená část roztoku je odváděna z varné komory pomocí mechanického dmychadla, to ve varné komoře vytváří podtlak. Dmychadlo pak páry stlačí a tím zvýší jejich teplotu. Přehřáté páry kondenzují v tepelném výměníku cirkulačního okruhu a předávají teplo roztoku. Zkondenzované páry natékají do nádrže odkud jsou již jako destilát čerpány přes výměník ven.

## 6.2 Vícestupňové vakuové odparky

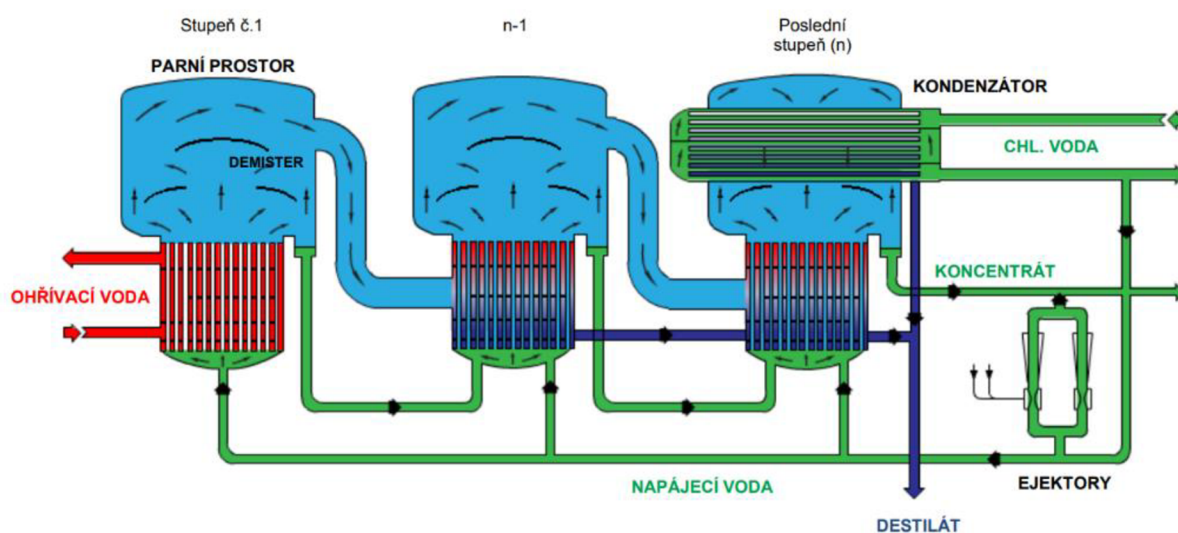
Odparky, které se skládají z více stupňů, existuje několik typů. Jedním z nich jsou mžikové (Multi Stage Flash-MSF) odparky, jejichž popis lze nalézt v [39]. Obrázek 6.2 znázorňuje odparku se třemi stupni. Nejprve se přivedená voda ohřeje za vysokého tlaku, následně je vedena do první komory, kde je již podtlak. Tato změna tlaku přiměje vodu k varu a k velmi rychlému (mžikovému) odpaření. Část roztoku dále postupuje do dalších komor, kde je postupně vždy nižší tlak než v předchozí komoře. Opět zde dochází k rychlému odpařování. Páry kondenzují na výměňkovém potrubí, které se nachází v každé komoře. Výměňkové potrubí je chlazeno vstupní vodou, které má chladnější teplotu a která se tímto zároveň přehřívá. Tím je dosaženo vysoké energetické účinnosti. Výsledkem tohoto procesu je destilát a zahuštěný roztok (koncentrát, popř. solanka). Pro vyšší účinnost systému, levnější provozní náklady a větší kapacitu se do systému vkládá více stupňů. Ovšem čím více stupňů, tím taky roste cena za zařízení. Ve většině případů se hledá kompromis mezi účinností a cenou.



Obrázek 6.2 – Princip vícestupňové mžikové destilace [39]

Dalším typem založeným na podobné myšlence jsou odparky s vícestupňovým odpařováním (Multiple Effect – ME nebo Multiple Effect Evaporation – MEE, také známé jako Multiple Effect Distillation – MED) čerpá z [40]. Princip je popsán s využitím Obrázku 6.3, kde je znázorněna třístupňová odparka.

Při vícestupňovém systému opět prochází roztok trubkami kondenzátoru, který je ovšem umístěn na posledním stupni systému. Zde se mírně ohřeje a následně vede do spodní části výměníku na 1. stupni. Vzniklá pára jde přes odlučovač do parovodu, kterým je přivedena do mezi trubkového prostoru výměníku v dalším stupni. Na vnějším povrchu trubek tato pára zkondenzuje a vznikne destilát. Kondenzací předá pára své teplo roztoku k odsolení, která se nachází uvnitř trubek. Neodpařený roztok z prvního stupně slouží jako napájecí v dalším stupni. Tento proces se využívá i v dalších navazujících stupních. V jednotlivých stupních se pak postupně snižuje tlak i teplota. V posledním stupni se pak odčerpává destilát a také zahuštěný roztok (koncentrát).



Obrázek 6.3 – Princip vícestupňového odpařování [41]



### 6.3 Hlavní výhody a nevýhody metod odpařování

Výhody a nevýhody shrnuje [41]. Hlavní výhodou odpařování je schopnost vytěžit maximum z odpadních vod, které by jinak zůstaly nevyužity, popřípadě by ničily životní prostředí. Způsobem odpařování lze snížit objem odpadních vod, ale také získat nové produkty jako je destilát (čistá voda) a látky ze zahuštěných roztoků. Ovšem využitelnost těchto produktů bude záležet na vstupních vlastnostech odpadní vody, která je předem upravována.

#### VÝHODY

- Výrazné snížení objemu odpadních vod
- Možnost využití odpadního tepla, a tím dosažení relativně nízké energetické náročnosti
- Jednoduché a spolehlivé technologické procesy
- Odpařená voda je dostupná přímo v systému, může být okamžitě využitelná
- Dostatečně zahuštěný koncentrát lze recyklovat, popřípadě využít k výrobě energií jako palivo
- Kontinuální a vsádkový provoz

#### NEVÝHODY

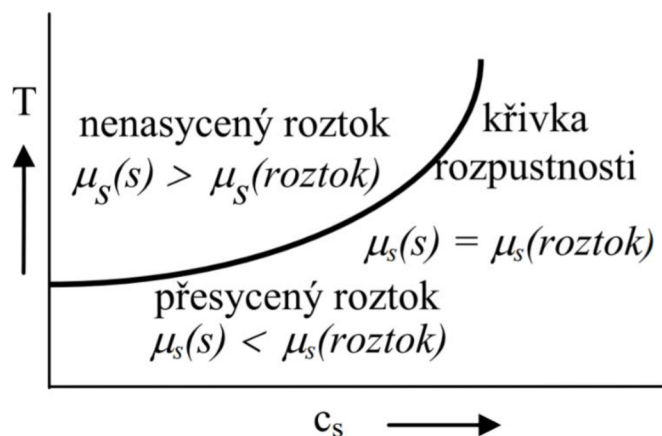
- Dodatečné investiční a provozní náklady pro provozovatele
- Dodatečné prostorové nároky
- V případě nevyhovující kvality produktů nutnost doplnění o další technologie
- Náklady na podpůrné chemické látky



## 7 KRYSTALIZACE

Charakteristiku krystalizace lze nalézt například v [42], odkud čerpá i následující část. Krystalizaci lze využít jako další stupeň odpařování. Je to proces, při kterém se z přesyceného roztoku získává rozpuštěná tuhá fáze ve formě krystalů soli.

Sytost roztoku lze vyjádřit fázovým diagramem tuhé fáze (viz Obrázek 7.1), který je rozdělen křivkou rozpustnosti na dvě oblasti. Roztok, který obsahuje více rozpuštěné látky, než odpovídá nasycenému roztoku při dané teplotě, je roztok přesycený. V nenasyceném roztoku se přidaná tuhá fáze rozpouští a zvyšuje tak jeho koncentraci. V nasyceném roztoku se přivedená tuhá fáze nerozpouští, rozpuštěná látka se také nevyučuje z roztoku. Přidáním tuhé fáze do přesyceného roztoku se začne vylučovat rozpuštěná látka, do té doby, dokud není dosaženo rozpustnosti při určité teplotě, tj. dokud se koncentrace roztoku nesníží na rovnovážnou hodnotu. K samovolnému vylučování rozpuštěné látky z roztoku ve formě krystalů je nutná minimální hodnota přesycení. Přesycení roztoku lze docílit ochlazením nebo odpařováním rozpouštědla nebo jejich kombinací. Krystalizace tedy může být ochlazovací nebo odpařovací.



Obrázek 7.1 – Fázový diagram [42]

## 7.1 Ochlazovací krystalizace

Princip ochlazovací krystalizace uvádí například [42]. Metoda ochlazovací krystalizace se výhradně využívá pro látky, jejichž rozpustnost se s teplotou výrazně zvyšuje. Nasycený roztok při dané teplotě se ochlazuje na nižší teplotu. Při tomto procesu se vyloučí určité množství rozpuštěné látky, která odpovídá rozdílu její rozpustnosti. Oproti odpařování je chlazení energeticky méně náročné.

Ochlazovací krystalizátory mohou být chlazené buď přímo (výměna tepla mezi chladícím médiem a roztokem bez teplosměnné plochy) nebo nepřímo (výměna tepla přes teplosměnnou plochu).

Přímé ochlazovací krystalizátory využívají krystalizační vany. Jedná se o otevřené nádrže, do kterých je napouštěn roztok, který tam samovolně chladne. Zařízení je levné, avšak zabírá velkou zastavěnou plochu a má velice nízký výkon (pomalé ochlazování). Vznikající krystaly jsou příliš velké, nepravidelné a málo čisté, protože zadržují matečný roztok ve formě inkluzí (matečný roztok uzavřený uvnitř krystalu).

Existují různé druhy ochlazovacích krystalizátorů, jako jsou například rotační, kolébkové, šaržovité krystalizátory nebo míchaný krystalizátor s vnější cirkulací suspenze.

## 7.2 Odpařovací krystalizace

Následující pasáž ohledně odpařovací krystalizace čerpá z [42]. Metoda odpařování je vhodná pro látky, jejichž rozpustnost se mění málo v závislosti na teplotě, nebo v případech, kdy chceme proces vést při určité stálé teplotě. Odpařování může probíhat při atmosférickém tlaku nebo sníženém tlaku (vakuová krystalizace). Potřebné teplo dodáváme do roztoku buď přímo (spalinami, vzduchem nebo plamenem), tzv. přímým ohřevem nebo nepřímo přes teplosměnnou plochu (pláštěm, vestavěným nebo externím výměníkem), tzv. nepřímým ohřevem.

Například krystalizátor s ponorným hořákem je zařízení, které má umístěn hořák pod hladinou kapaliny, ve kterém se spaluje topný plyn jako směs se vzduchem. Krystalizátor je vhodný pro korozivní systémy a pro systémy jejichž rozpustnost se stoupající teplotou klesá.

Dalším příkladem je rozprašovací krystalizátor. Princip je v podstatě založen na rozprašovací sušárně, ve které však dochází ke vzniku suspenze částečným odpařením rozpouštědla. V těle krystalizátoru je rozprašován horký roztok a proti němu je vháněn studený vzduch, přičemž dochází k ochlazení roztoku a částečnému odpaření rozpouštědla. Rozpuštěná látka se vyloučí ve formě malých krystalků. Z části suspenze se získávají krystaly, jako produkt. Zbytek suspenze se následně ohřeje ve výměníku, kde se smíchá s čerstvým roztokem a je znovu uveden do krystalizátoru. Zastavěná plocha je poměrně malá, zařízení jednoduché a investičně nenáročné.

Dále je často využívána vakuová krystalizace. Popis lze nalézt například v [38] a [42]. Při vakuové krystalizaci se ohřátý roztok přivádí do vakua, kde se částečně odpaří rozpouštědlo a tím pádem se ochladí roztok. Přesycení je tedy vytvořeno částečným zkoncentrováním roztoku a současným snížením jeho teploty. Vakuová krystalizace je vhodná pro systémy se strmou křivkou rozpustnosti, u kterých se výrazně nezvyšuje bod varu se stoupající koncentrací roztoku. Teplotu krystalizace lze snadno regulovat pomocí podtlaku. Proces může tedy probíhat za nízkých teplot. Vakuová krystalizace je vhodná zejména pro termolabilní látky. Typickým zařízením jsou vakuové krystalizační odparky. Jsou určeny pro zpracování roztoků, které jsou příliš koncentrované na to, aby byly zpracovány standardními odparkami. V dalším případě se takto dále zpracovávají koncentráty z odparek. Výstupem procesu je roztok či kaše, která obsahuje krystaly. Následně dochází k filtraci. Pevná složka (ve formě krystalů) se odváží k likvidaci nebo k dalšímu užití a tekutá složka se znovu čerpá na vstup odparky. Tam se mísí s čerstvým vstupním roztokem a znovu se zpracovává.

## 8 VYUŽITÍ SYSTÉMŮ ZLD

V této kapitole jsou nejprve uvedeny informace o úrovni využití systémů ZLD ve světě. Následuje ukázka systému ZLD pro uhelný chemický průmysl a na závěr jsou zhodnoceny výhody a nevýhody systému ZLD.

### 8.1 ZLD systém ve světě

#### USA

Informace ohledně systému ZLD v USA lze nalézt v [43]. V USA se nachází velká většina systémů ZLD. Začátky sahají do 70. let, kdy elektrárny kolem řeky Colorado využili systém ZLD, kvůli rostoucí slanosti říční vody. Dnes se ZLD používá především v odvětví výroby energie, k čištění a k recyklaci odpadních vod. S novými nařízeními ohledně vypouštění odpadních vod roste poptávka po systému především v elektrárnách.

Při vnitrozemském odsolovacím zařízení je největší výzvou solanka. Tradiční postupy zde mají nepříznivé dopady na povrchové a podzemní vody. Systém ZLD je schopný pracovat i v oblastech s nedostatkem vody. Aplikace ZLD ve vnitrozemských odsolovacích zařízeních byly zkoumány vládními agenturami, organizacemi atd. Zařízení má zde mnoho výhod, včetně maximálního využití vody, ochrany přírodních zdrojů a tvorby solí jako vedlejšího produktu. Ovšem náklady a spotřeba energie jsou hlavními překážkami pro aplikaci ZLD. Většina systémů může zpětně využít až 90 % odpadní vody, jsou tedy velmi účinné a mohou být dobrou volbou při řešení požadavků a celkových finančních cílů.

#### Indie

Informace ohledně systému ZLD v Indii lze nalézt v [43]. Důsledkem velké spotřeby vody a jejího znečištění v Indii je rychlá industrializace a urbanizace. Indická vláda stanovila tzv. projekt Clean Ganga, který zavádí přísné předpisy pro vypouštění odpadních vod a nutí vysoce znečišťující průmyslová odvětví využít systém ZLD. V roce 2015 zavedla vláda instalaci systému ZLD ve všech textilních závodech produkujících více jak 25 m<sup>3</sup> odpadní vody za den. Indie taky rozšířila ZLD do průmyslového odvětví včetně energetického, ocelářského, farmaceutického, chemického a potravinářského. Ve městě Tirupur v roce 2008 byl zaveden systém ZLD pro zpětné získávání vody a cenných solí z textilních odpadních vod, které jsou znovu použity v procesu barvení. Společnost Chemplast Sanmar Limited se zabývá řadou zdrojů odpadních vod, především pak pocházejících z hydroxidů sodných a monomerů z PVC. Tato kombinovaná odpadní voda je silně kontaminovaná různými látkami. Společnost Chemplast upravuje odpadní vodu pomocí techniky odpařování/krytalizace a upravenou vodu následně přivádí do chladicí věže a k dalšímu použití v závodu.

## Čína

Informace ohledně systému ZLD v Číně lze nalézt v [43], [44]. V důsledku velkého ekonomického rozvoje a urbanizace se v Číně rapidně zvyšuje spotřeba vody a její znečištění. Čína se tedy rozhodla vytvořit plán pro čištění vody a zlepšení kvality vodních zdrojů a ekosystémů. Tepelné elektrárny, které jsou velmi náročné na spotřebu vody, se v Číně ve většině nachází v oblastech s nedostatkem vody. ZLD je zde považováno za udržitelné řešení ve spojení s elektrárnami. V uhelné elektrárně Changxing byl jako první na světě instalován systém ZLD na bázi FO.

ZLD se stala povinnou součástí v továrnách na chemický průmysl a pro výrobu uhlí. V současné době je nainstalováno několik systému ZLD nebo jsou ve fázi návrhu. Společnost Desalitech poskytla systém ultra čisté úpravy vody v továrně na výrobu hliníku Novelis za účelem splnění požadavků na zpracování odpadních vod.

V Číně převládá výroba tepelné energie pomocí spalování uhlí. V procesu spalování uhlí se vytváří spaliny obsahující síru. Během odsiřování spalin se produkuje odpadní voda FGD (flue gas desulfurization – odsiřování spalin), která obsahuje ionty těžkých kovů, vysoký zákal, vysokou tvrdost atd. Systém ZLD pro tyto odpadní vody obvykle zahrnuje dvoustupňové změkčování, systém předúpravy pro reverzní osmózu, dopřednou osmózu a krystalizační procesy. Jako zdroj energie se zde využívá teplo ze spalin. Nedávná studie prokázala [44], že využití tepla ze spalin v systému ZLD pro čištění odpadních vod snižuje náklady včetně nákladů na počáteční investici, provoz i údržbu ve srovnání s jinými konvenčními metodami.

### Další země využívající ZLD systém

Informace ohledně systému ZLD v dalších zemích lze nalézt v [43]. Systémy ZLD se používají pro čištění odpadní vody nebo k recyklaci, především tam, kde je nedostatek vody. Společnost Egyptian Ethylene and Derivatives Company zadala kontrakt na poskytnutí zařízení na úpravu vody ve výrobním závodě na výrobu ropných derivátů v Alexandrii (2016), včetně prvního integrovaného systému ZLD. Tento projekt byl zařazen do užšího výběru pro celosvětové roční ocenění za vodu v kategorii projektů průmyslových vod, které oceňuje nejinspirativnější technické nebo environmentální úspěchy v oblasti průmyslu. V současné době se vyvíjí tzv. ekologický přírodní model, který využívá inovativní ekologický design při čištění a opětovném použití odpadních vod v Západní poušti.

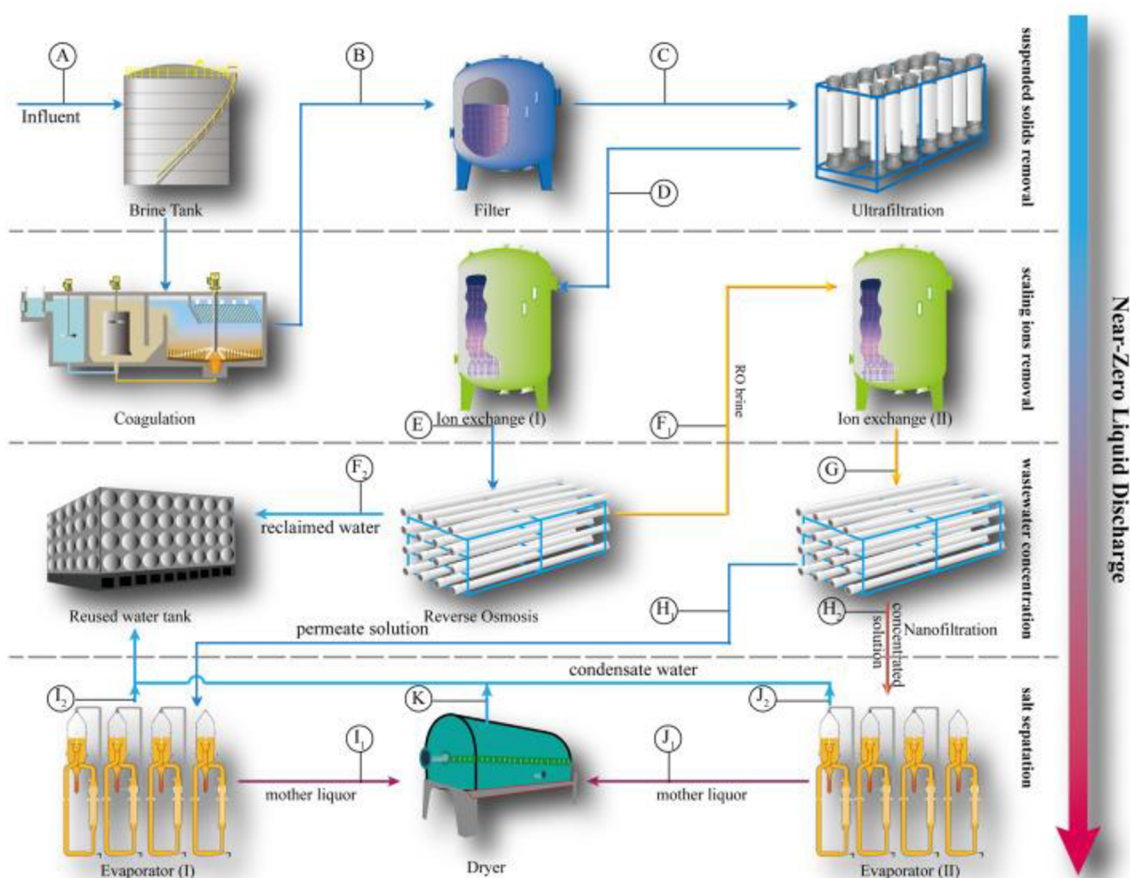
Společnost Saltworks Technologies nainstalovala v severní Kanadě dva systémy na úpravu slané vody v dole na drahé kovy. V těchto systémech bude důlní voda upravována, aby se získala sladká voda a pevné soli. Dalším projektem byla úprava odpadní vody při zpracování mědi v Evropě. Cílem bylo vyhodnotit technickou a ekonomickou proveditelnost nového procesu určeného k maximalizaci využití vody z vodních odpadů z tavního mědi.

Společnost GEA vyvinula hybridní systém ZLD pro zařízení na výrobu molybdenu s kapacitou 110 m<sup>3</sup>/h. Skládá se z předúpravy, po které následuje jednotka RO a následně koncentrace pomocí odpařovače se splývajícím filmem, vše poháněné mechanickou rekompresí par. Krystalizace a separace pevných látek završuje proces, který produkuje čistou vodu pro opětovné použití ve výrobě. V Pákistánu byl pak tento systém ZLD nainstalován v roce 2013 v Jamshoru společností Archroma Pakistan k čištění textilních a chemických odpadních vod s 80 % regenerací vody. Provoz prvního úspěšného průmyslového zařízení na čištění a recyklaci odpadních vod zadaného společností Toshiba v Ománu byla s kapacitou 7500 m<sup>3</sup> za den.

## 8.2 Případová studie

Celou studii lze nalézt zde [45]. Uhelný průmysl spotřebovává a vypouští obrovské objemy vody, odhaduje se okolo 470 milionů tun odpadní vody ročně. Odpadní vody přinesly velké problémy kvůli křehkosti ekosystémů, nedostatku vody a omezené kapacitě životního prostředí. Je tedy nutné vyvinout specifický čistící systém pro tyto odpadní vody, zlepšit jejich kvalitu a snížit enviromentální problémy spojené s výrobou uhlí. Čištění těchto odpadních vod představuje velkou výzvu.

Téměř nulové vypouštění kapaliny (Near – ZLD) je účinná technologie, která podporuje opětovné použití odpadních vod. Near – ZLD je integrovaný proces kombinující odstraňování vodního kamene, filtraci, koncentraci a odpařování. Proveditelnost tohoto systému byla ověřena v technické případové studii v Číně. Kombinace koagulace a iontové výměny může účinně odstranit  $Mg^{2+}$  a  $Ca^{2+}$  z odpadní vody a dosáhnout celkové míry odstranění až 99,96 %. Kombinovaný proces filtrace a ultrafiltrace může účinně snížit konečný zákal vyčištěné vody. Spojenými nanofiltračními a odpařovacími jednotkami lze účinně dosáhnout terminálního čištění odpadních vod, u kterého dochází k oddělování a odstraňování NaCl. Rekultivovanou vodu lze recyklovat integrovaným procesem, čímž se dosáhne téměř ZLD. Schéma celého procesu je uvedeno na Obrázku 8.1.



Obrázek 8.1 – Schéma Near – ZLD systému [45]

### 8.3 Výhody a nevýhody systému ZLD

Výhody a nevýhody systému lze nalézt v [3]. Systém je zatím velmi drahý, avšak v budoucnu bude nezbytný, protože spotřeba vody roste.

Důvody pro realizaci ZLD systému:

- **systém ZLD řeší problém s vypouštěním odpadních vod** – V dnešní době se více zpříšňují limity pro vypouštění odpadní vody. Realizace systému je vhodná pro závody, kde není možnost vypouštět odpadní vodu. Taky tím lze eliminovat placení poplatků za vypouštění vody nebo její likvidaci.
- **úspora spotřebované vody – recyklace procesní vody** – Nedostatek vody a sucho je poměrně aktuální téma. Pomocí ZLD se dá snižovat množství spotřebované vody ve výrobním procesu.
- **ekologická a společenská odpovědnost** – Je velmi důležité chránit přírodu před vypouštěním odpadních vod. Nikdo nechce být spojován se znečištěním. ZLD systém je tedy ekologickým řešením zpracování odpadní vody.
- **získání cenných produktů z koncentráту** – při zavedení ZLD je možné získat některé cenné látky a znovu je využít. Koncentrát je potenciálním zdrojem surovin. Tato možnost je vždy závislá na druhu výrobního procesu a typu recyklované sloučeniny. Většinou se jedná o sloučeniny zlata, niklu a anorganických solí.

Systém ZLD má samozřejmě také svoje nevýhody, zejména tyto:

- **vysoké nároky na dodavatele technologie** – Návrh systému ZLD je poměrně komplexní záležitost, která vyžaduje kvalitní výsledný zařízení a dobrou úroveň servisu.
- **investičně nákladnější** – V porovnání se standardní technologií čištění odpadních vod je systém ZLD v počáteční investici nákladnější. Avšak z dlouhodobého hlediska může být výhodnější, protože předchází problémům spojených se zvyšujícími se legislativními nároky na vypouštění odpadních vod.
- **vyšší spotřeba energie** – Je nutné využít hodně technologických zařízení na čištění odpadních vod, které jsou energeticky náročné.



## 9 ZÁVĚR

Využívání vody a nakládání s odpadní vodou je jedním z celosvětových témat z důvodu stále se zvyšující spotřeby vody. Pozornost se věnuje možnostem minimalizace objemu odpadních vod. Pro systémy, které toto řeší, je používán termín zero liquid discharge.

ZLD většinou obsahuje tři fáze zpracování: předúprava, předkoncentrace a odpařování. Pro každou fázi existuje více technologií. Výběr záleží vždy na vlastnostech odpadní vody, na požadavcích na výstupy systému ZLD, na energetické náročnosti atd.

Celý proces tedy začíná předúpravou, kde se odpadní voda upraví, aby nedocházelo k zanášení systému ZLD usazeninami nerozpustných solí, biologickému znečištění atd. Běžně se používá neutralizace, flotace atd.

Po předúpravě následuje předkoncentrace, která má za cíl získat co největší podíl vody. K tomu se využívá membránových technologií. Technologie se liší zejména v propustnosti membrány nebo ve hnačí síle pro prostup membránou. Tlakové procesy se používají v případě, separace částic, bakterií a nízkomolekulárních látek. Oproti tomu elektromembránové procesy se používají pro transport iontů. Ve většině případů se využívá více typů membrán, pro lepší účinnost a chod systému. Často je předkoncentrace zakončena RO, která umožňuje průchodnost pouze iontům. Hlavní výhodou membránových procesů je jejich vysoká účinnost separace s nízkou energetickou náročností.

Koncentrát vzniklý během předkoncentrace je následně zpracován odpařovací technologií. Cílem je další snížení objemu odpadní vody a zahuštění koncentráту. Tyto technologie jsou náročné na energii. Snížení náročnosti umožňuje použití vícestupňových odparek, které využívají zdroj tepla z předchozího stupně. Na koncentrát pak lze dále aplikovat krystalizaci. Díky tomu lze získat další podíl vody a krystalickou kaši.

ZLD má uplatnění ve velkých státech, jako je například USA, Čína, Indie atd. Využívají ho především k čištění vody z tepelných elektráren, z textilního průmyslu nebo jako odsolovací zařízení.

Nedostatek vody je velice aktuální téma. Je to hlavní důvod k realizaci ZLD systému, který má za úkol recyklovat procesní vodu. Dalším důvodem je, že systém řeší problém s vypouštěním odpadních vod. V dnešní době jsou stále přísnější limity pro vypouštění odpadních vod, kvůli ekologické odpovědnosti, což má chránit nejen přírodu, ale také zdraví lidí. Hlavní překážkou pro širší aplikaci systémů ZLD jsou vysoké investiční náklady a vysoká spotřeba energie, což jsou zásadní výzvy pro výzkum a vývoj v této oblasti. Lze se domnívat, že v budoucnu budou systémy ZLD vyžadované v čím dál větší míře.

## 10 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A CITOVÁNÍ

- [1] Ing. Lenka Skoupá, „Společenská odpovědnost firem, možnosti jednotlivců". [Online]. Dostupné z: <https://www.ekocentrumkoniklec.cz/wp-content/uploads/2018/11/Workshop-Společenská-odpovědnost-podnikáme-a-úradujeme-zeleně.pdf>
- [2] V. A. Tzanakakis, N. V. Paranychianakis, a A. N. Angelakis, „Water Supply and Water Scarcity", *Water*, roč. 12, č. 9, Art. č. 9, zář. 2020, doi: 10.3390/w12092347.
- [3] „Odborné publikace - Kovofinís - zařízení pro povrchové úpravy a čistírny odpadních vod". <https://www.kovofinis.cz/odborne-publikace> (viděno lis. 20, 2020).
- [4] ŠMEJKALOVÁ, PÍCHA, „ODPADNÍ VODY". [Online]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/6842809-Odpadni-vody-definice-znecistujici-latky-v-odpadnich-vodach-ukazatele-znecisteni-odpadnich-vod-splaskove-odpadni-vody-prumyslove-odpadni-vody.html>
- [5] „Odpadní voda - Pražské vodovody a kanalizace, a.s." <https://www.pvk.cz/vse-o-vode/odpadni-voda/> (viděno kvě. 20, 2021).
- [6] „ELO-pr10.pdf". Viděno: kvě. 20, 2021. [Online]. Dostupné z: <http://energetika.cvut.cz/wp-content/uploads/ELO-pr10.pdf>
- [7] P. s r o info@programia.cz e-mail:, „Co vyjadřuje hodnota pH", *Marimex.cz*. <https://www.marimex.cz/poradna-bazenova-chemie-co-vyjadruje-hodnota-ph/> (viděno kvě. 20, 2021).
- [8] „Komunální odpadní vody | labtech.eu". <https://www.labtech.eu/komunalni-odpadni-vody/> (viděno lis. 27, 2020).
- [9] J. Votápková, „Odpadní vody", Diplomová práce, Masarykova univerzita, Brno, 2008. [Online]. Dostupné z: <https://is.muni.cz/th/jn17k/>
- [10] „Průmyslová voda | Technologie". <https://www.wabag.cz/technologie/prumyslova-voda> (viděno lis. 27, 2020).
- [11] „Odpadní voda - I.SčV, a.s." <https://www.lscv.cz/vse-o-vode/odpadni-voda/> (viděno lis. 27, 2020).
- [12] „Výkladový slovník - Atlas". <https://www.agromanual.cz/cz/atlas/vykladovy-slovník/pesticid&asort=P> (viděno lis. 27, 2020).
- [13] „Splachy půdy jsou problémem všech vodních toků v ČR", *Naše voda*, čvc. 14, 2014. <https://www.nase-voda.cz/splachy-pudy-jsou-problemem-vsech-vodnich-toku-cr/> (viděno lis. 27, 2020).
- [14] A. r o spol s, „ASIO – čištění a úprava vod, dešťové a šedé vody", *ASIO, spol. s r.o.* <https://www.asio.cz/> (viděno úno. 04, 2021).
- [15] „voda.pdf". Viděno: kvě. 20, 2021. [Online]. Dostupné z: [https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/32013/mod\\_resource/content/1/voda.pdf](https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/32013/mod_resource/content/1/voda.pdf)
- [16] A. E. contact: +420 775 629932, „Potravinařství < Možnost aplikace : Delta Technologie s.r.o." <http://www.deltatechnologie.cz/moznost-aplikace/potravinarstvi.html> (viděno lis. 25, 2020).
- [17] „Odpadní vody z prádelen", *TZB-info*. <https://www.tzb-info.cz/3121-odpadni-vody-z-pradelen> (viděno úno. 20, 2021).
- [18] „Waste water treatment - Lenntech". <https://www.lenntech.com/processes/waste-water-mbr.htm> (viděno říj. 08, 2020).
- [19] AUTOMA, „Řízení neutralizace kyselých odpadních vod", lis. 2009, [Online]. Dostupné z: [https://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf\\_articles/39909.pdf](https://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/39909.pdf)
- [20] „Messer - napsali jsme - Messer Technogas s.r.o". <https://www.messer.cz/2018-odborne-clanky> (viděno úno. 05, 2021).
- [21] „flotace". [http://147.33.74.135/knihy/uid\\_es-001/hesla/flotace.html](http://147.33.74.135/knihy/uid_es-001/hesla/flotace.html) (viděno kvě. 20, 2021).

- [22] „Čištění vody, úprava vody a recyklace vody | ENVI-PUR". <https://www.envi-pur.cz/> (viděno kvě. 03, 2021).
- [23] Z. Palatý, *MEMBRÁNOVÉ PROCESY*, 2012. vyd. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2012.
- [24] „Ultrafiltrace při úpravě vody", *TZB-info*. <https://voda.tzb-info.cz/13403-ultrafiltrace-pri-uprave-vody> (viděno lis. 29, 2020).
- [25] „Ultrafiltrace Aquarex", *Aquarex WATERPROFIT s.r.o.* <https://www.aquarex.cz/produkty/ultrafiltrace> (viděno říj. 13, 2020).
- [26] „Czemp | Czemp". <http://www.czemp.cz/cs> (viděno úno. 04, 2021).
- [27] „MemBrain - Převádíme výsledky vědeckého výzkumu do komerční praxe - Úvodní stránka". <https://www.membrain.cz/> (viděno úno. 04, 2021).
- [28] „Reverzní osmóza | BKG - úprava vody a.s." [https://www.bkg.cz/reverzni-osmoza-80?gclid=Cj0KCQjw4v2EBhCtARIsACan3nxMcm1bFtwmaJc5C7s4FbhxfteWWhZVIQjGiX06uVI29gmq2-we9hMaAvG4EALw\\_wcB](https://www.bkg.cz/reverzni-osmoza-80?gclid=Cj0KCQjw4v2EBhCtARIsACan3nxMcm1bFtwmaJc5C7s4FbhxfteWWhZVIQjGiX06uVI29gmq2-we9hMaAvG4EALw_wcB) (viděno kvě. 15, 2021).
- [29] [sana-store.cz](https://www.sana-store.cz/), „Reverzní osmóza Marlus 650 P". <https://www.sana-store.cz/reverzni-osmoza-marlus-650-p> (viděno kvě. 18, 2021).
- [30] „Forward Osmosis - the most frequently asked questions", *Aquaporin*. <https://aquaporin.com/what-is-forward-osmosis/> (viděno lis. 10, 2020).
- [31] „What is Forward Osmosis?", *International Forward Osmosis Association*. <https://forwardosmosis.biz/education/what-is-forward-osmosis/> (viděno lis. 10, 2020).
- [32] „Co je membránová destilace?" <https://www.netinbag.com/cs/science/what-is-membrane-distillation.html> (viděno lis. 11, 2020).
- [33] „Membrane distillation | EMIS". <https://emis.vito.be/en/bat/tools-overview/sheets/membrane-distillation> (viděno kvě. 15, 2021).
- [34] J. Kosina, „Separace diluátu a koncentrátu v modulu šokové elektrodialýzy", Liberec, 2018. [Online]. Dostupné z: [https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/32196/Jakub\\_Kosina\\_\\_Bakalarska\\_prace.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/32196/Jakub_Kosina__Bakalarska_prace.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [35] A. Doležalová, „Progresivní metody pro zpracování odpadních vod", Bakalářská práce, VUT, Brno, 2017.
- [36] H. Jiráňková, „Úvod do membránových procesů", Pardubice.
- [37] T. Cacková, „Průmyslové odparky procesních vod", VUT, Brno, 2017. [Online]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/66806/final-thesis.pdf?sequence=10&isAllowed=y>
- [38] „Aquadest". <https://aquadest.cz/> (viděno kvě. 15, 2021).
- [39] L. Šimonová, „DISTRIBUČNÍ SOUSTAVA KYPRU - REALIZOVATELNOST OBNOVITELNÝCH ZDROJŮ A PŘENOS ENERGIE", Diplomová práce, VUT, Brno, 2011. [Online]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/17586/final-thesis.pdf?sequence=6&isAllowed=y>
- [40] Z. Hájek, „Výzkum zařízení pro úpravu mořské vody a další aplikace", Dizertační práce, VUT, Brno, 2014. [Online]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/30784/final-thesis.pdf?sequence=17&isAllowed=y>
- [41] M. Vondra, P. Bobák, a V. Máša, „Využití odpadního tepla k úpravě odpadních vod z průmyslových procesů", *Vodohospodářské Tech.-Ekon. Inf.*, roč. 57, č. 6, s. 35–43, pro. 2015.
- [42] M. Richter a O. Söhnel, *Průmyslové technologie III: stroje a zařízení chemického průmyslu : [procesy, stroje a zařízení]*. V Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně, Fakulta životního prostředí, 2012.

- [43] Muhammad Yaqub a W. Lee, „Zero-liquid discharge (ZLD) technology for resource recovery from wastewater: A review", *Sci. Total Environ.*, roč. 681, s. 551–563, zář. 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.05.062.
- [44] J. Fu, N. Hu, Z. Yang, a L. Wang, „Experimental study on zero liquid discharge (ZLD) of FGD wastewater from a coal-fired power plant by flue gas exhausted heat", *J. Water Process Eng.*, roč. 26, s. 100–107, pro. 2018, doi: 10.1016/j.jwpe.2018.10.005.
- [45] H. Ma *et al.*, „An integrated membrane- and thermal-based system for coal chemical wastewater treatment with near-zero liquid discharge", *J. Clean. Prod.*, roč. 291, s. 125842, dub. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.125842.

## 11 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

- ZLD – zero liquid discharge
- BSK – biochemická spotřeba kyslíku
- BSK<sub>5</sub> – je biochemická spotřeba kyslíku zředovací metodou v průběhu pěti dnů, za aerobních podmínek a při teplotě 20 °C
- CHSK – chemická spotřeba kyslíku
- MO – mokrá oxidace
- ČOV – čistírna odpadních vod
- PVDF – polyvinylidenfluorid
- PES – polyesterová vlákna
- RO – reverse osmosis (zpětná osmóza)
- FO – forward osmosis (dopředná osmóza)
- MD – membrane distillation (membránová destilace)
- DCMD – direct contact membrane distillation (membránová destilace s přímým kontaktem)
- AGMD – air gap membrane distillation (membránová destilace se vzduchovou mezerou)
- VMD – vacuum membrane distillation (vakuová membránová destilace)
- SGMD – sweeping gas membrane distillation (membránová destilace s unášivým plynem)
- CM – catex membrane (katexová membrána)
- AM – anex membrane (anexová membrána)
- ED – elektrodialýza
- EDI – elektrodeionizace
- D – diluát
- K – koncentrát
- MSF – multi stage flash (vícestupňové mžikové destilace)
- ME – multiple effect (vícestupňového odpařování)
- MEE – multiple effect evaporation (vícestupňového odpařování)
- MED – multiple effect distillation (víceúčelové destilace)
- FGD – flue gas desulfurization (odsiřování spalin)
- Near – ZLD – téměř nulové vypouštění kapaliny

## 12 SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ A TABULEK

Obrázek 1.1 – Spotřeba vody ve světě podle odvětví [1].....	8
Obrázek 3.1 – Schéma ZLD [3] .....	16
Obrázek 4.1 – Schéma pěnové flotace [21].....	19
Obrázek 4.2 – Proces flotace [16] .....	20
Obrázek 5.1 – Přehled prostupnosti membrán [14].....	21
Obrázek 5.2 – Typy mikrofiltrace [23] .....	23
Obrázek 5.3 – Schéma principu RO [29] .....	25
Obrázek 5.4 – Schéma principu elektrodialýzy [27] .....	29
Obrázek 5.5 – Schéma principu elektrodeionizace [34].....	30
Obrázek 6.1 – Schéma vakuové odparky s mechanickou kompresí [38].....	33
Obrázek 6.2 – Princip víceúrovňové mžikové destilace [39].....	34
Obrázek 6.3 – Princip víceúrovňového odpařování [41] .....	35
Obrázek 7.1 – Fázový diagram [42].....	37
Obrázek 8.1 – Schéma Near – ZLD systému [45].....	43
Tabulka 2.1 – Přehled znečišťujících látek v odpadních vodách [4].....	10
Tabulka 2.2 – Přehled látek z odpadní vody z tepelného zpracování uhlí [15].....	13
Tabulka 2.3 – Přehled látek z odpadní vody z potravinářského průmyslu [15] .....	14
Tabulka 2.4 – Přehled látek odpadní vody z prádelny [17] .....	15
Tabulka 4.1 – Naměřené hodnoty látek odpadní vody z jatek [16].....	20
Tabulka 5.1 – Porovnání tlakových membránových procesů [23].....	22