



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PROCESS AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING

VÝZKUM ZAŘÍZENÍ PRO ÚPRAVU MOŘSKÉ VODY A DALŠÍ APLIKACE

RESEARCH OF EQUIPMENT FOR SEA WATER TREATMENT AND OTHER APPLICATIONS

DIZERTAČNÍ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. ZDENĚK HÁJEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. ZDENĚK JEGLA, Ph.D.

BRNO 2014

ABSTRAKT

V souvislosti s poměrně rychlým úbytkem zdrojů pitné vody je stále větší zájem zaměřen na odsolování mořské a brakické vody. V budoucnu bude docházet k růstu požadavků na dostatečné množství sladké vody v důsledku zvyšujícího se počtu populace, růstu životní úrovně obyvatel i z důvodu rozšiřování průmyslových a zemědělských činností obyvatelstva.

Práce se zabývá aktuální problematikou úpravy mořské vody, a to převážně jejím odsolováním na principu destilace, za účelem vývoje zařízení pro úpravu mořské vody. Záměrem je vyvinutí kompaktního modulového zařízení pro odsolování mořské vody na základě provedení a vyhodnocení experimentálních zkoušek na experimentálním zařízení. Součástí řešení je přehled systémů pro úpravu mořské vody, diskuze konstrukčních a materiálových aspektů, návrh a výroba experimentální jednotky a také konfrontace vypočtených hodnot s výsledky experimentálních měření.

Klíčová slova: Odsolování, mořská voda, čistá voda, odsolená voda, pitná voda, destilace, MSF

ABSTRACT

As water resources are rapidly being exhausted, more and more interest is focused on the desalination of sea water and brackish water. Increasing amounts of fresh water will be required in the future due to the rise in population rates, increasing living standards and the expansion of industrial and agricultural activities.

The thesis is concentrated on current issues of treatment of sea water, mainly the desalination based on the distillation principle, in order to develop a unit for seawater treatment. The aim is to develop a compact modular unit for seawater desalinate on based on the implementation and evaluation of experimental tests on the experimental unit. The solution includes an overview of systems for treatment of seawater, a discussion of structural and material aspects of the units, design and manufacture of the experimental unit and confrontation the calculated values with the results of experimental measurements.

Keywords: Desalination, seawater, freshwater, seawater distillation, drinking water, MSF

HÁJEK, Z. *Výzkum zařízení pro úpravu mořské vody a další aplikace*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 148 s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Zdeněk Jegla, Ph.D.

Prohlašuji, že jsem tuto dizertační práci vypracovával sám, s pomocí vedoucího dizertační práce, literatury a ostatních materiálů, které jsou uvedeny v závěru práce.

V Brně dne 8. 4. 2014

.....

Podpis

Děkuji svému školiteli doc. Ing. Zdeňku Jeglovi, Ph.D. za vedení své dizertační práce, za cenné rady a připomínky, za ochotu, vstřícnost a hlavně za čas, jenž mi věnoval po celou dobu vzniku této dizertační práce.

Dále bych rád poděkoval Ing. Jaroslavu Kolářovi za obrovské úsilí, které věnoval vývoji nových technologií v oblasti odsolování a za jeho cenné rady, bez nichž by tato práce nevznikla.

OBSAH

1	ÚVOD	9
1.1	Cíle dizertační práce	9
1.2	Aktuální dostupnost sladké vody ve světě	10
1.3	Historie odsolování	10
1.3.1	Přírodní proces odsolování	10
1.3.2	Historie technologického odsolování	10
1.4	Potenciál odsolování	11
1.5	Vlastnosti vody	12
1.5.1	Mořská voda	13
1.5.2	Pitná voda	14
1.6	Základní údaje o trhu s odsolovacími technologiemi	15
2	METODY ODSOLOVÁNÍ	16
2.1	Tepelné metody	18
2.1.1	Vícetupňová mžiková destilace – MSF	19
2.1.2	Vícetupňové odpařování – ME	20
2.1.3	Kompresce páry – VC	21
2.1.4	Klíčové komponenty jednotek pracujících na tepelném principu	22
2.1.5	Solární destilace	23
2.2	Membránové metody	23
2.2.1	Reverzní osmóza	24
2.2.2	Elektrodialýza	25
2.3	Hybridní metody	26
2.4	Ostatní metody	27
2.4.1	Vymrazování	27
2.4.2	Iontová výměna	27
2.5	Porovnání metod odsolování	27
2.5.1	Hodnoticí parametry	27
2.5.2	Porovnání tepelných metod	30
2.5.3	Porovnání membránových metod	30
2.6	Úprava vody	31
2.6.1	Příprava	31
2.6.2	Konečná úprava	31
3	ZÁKLADNÍ NÁVRH MSF JEDNOTKY	33
3.1	Koncepce návrhu	33
3.1.1	Zapojení okruhu jednotky a recirkulace koncentrátu	34
3.2	Postup návrhu	38
3.2.1	Výpočetní bloky jednotky	38
3.3	Návrhový tepelný výpočet	39
3.3.1	Základní bilanční výpočet jednostupňové MSF jednotky	39
3.3.2	Základní bilanční výpočet víceetupňové MSF jednotky	40
3.3.3	Základní předpoklady návrhu	42
3.3.4	Výchozí tepelný návrhový výpočet	43
3.3.5	Vliv počtu stupňů jednotky	46

3.4	Konstrukční návrh.....	47
3.4.1	Důležité aspekty při návrhu.....	47
3.4.2	Materiály.....	47
3.4.3	Specifické rozměrové aspekty jednotky.....	48
3.4.4	Odpařovací nádoba.....	49
3.4.5	Dodatkový ohřívák.....	51
3.4.6	Kondenzátor.....	52
3.4.7	Rám jednotky.....	54
3.5	Další prvky.....	54
3.5.1	Čerpadla.....	55
3.5.2	Zařízení pro vytvoření sníženého tlaku.....	57
3.5.3	Odlučovač kapek.....	60
3.5.4	Kontinuální systém čištění kondenzátoru.....	62
3.5.5	Kompenzátory.....	63
3.5.6	Potrubní připojení, připojovací prvky.....	64
3.5.7	Rozvaděč MaR.....	65
3.5.8	Speciální ventily.....	66
3.6	Modelová řada MSF jednotek.....	67
3.7	Provozní proměnné a vazby.....	70
3.7.1	Zvyšování efektivity provozu jednotky.....	73
4	VÝROBA EXPERIMENTÁLNÍCH JEDNOTEK.....	75
4.1	Experimentální jednotka MSF.....	75
4.1.1	Konstrukce a návrh.....	75
4.1.2	Použité materiály a jejich vlastnosti.....	76
4.1.3	Strojní výroba.....	77
4.1.4	Sestavení kompletní jednotky.....	78
4.1.5	Uvedení do provozu.....	79
4.2	Demonstrační jednotka MSF.....	79
4.3	Experimentální jednotka ME.....	80
4.3.1	Konstrukce a použité materiály.....	80
4.3.2	Sestavení jednotky a její uvedení do provozu.....	81
5	EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ.....	83
5.1	Předpoklady pro experiment.....	83
5.1.1	Mořská voda.....	83
5.1.2	Zdroj tepla.....	84
5.1.3	Zdroj chladu.....	84
5.1.4	Měřicí trať a měřidla.....	84
5.2	Příprava a plánování experimentu.....	87
5.2.1	Teorie plánování experimentů.....	88
5.2.2	Plánování experimentů pro testy odsolovacích jednotek.....	91
5.2.3	Provedení experimentu a předběžných zkoušek.....	97
5.3	Analýza a vyhodnocení výsledků výchozích experimentů.....	99
5.3.1	Měření na experimentální jednotce MSF.....	99
5.3.2	Provoz demonstrační jednotky MSF.....	106
5.3.3	Experimenty na jednotce ME.....	109
5.4	Nejistoty měření.....	112

5.4.1	Teorie k nejistotám měření	112
5.4.2	Nejistoty měření proběhlých experimentů	115
6	POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ S VÝPOČTY	117
6.1	Porovnání výsledků měření s návrhovým výpočtem XLS	117
6.2	Modelování a simulace procesů	117
6.2.1	Model MSF jednotky	118
6.3	Simulace MSF jednotky v SW Aspen Plus	120
6.3.1	Popis modelu	120
6.3.1	Výstupy simulace	124
6.4	Simulace MSF jednotky v SW ChemCad	125
7	MOŽNOSTI VYUŽITÍ VYVÍJENÝCH ZAŘÍZENÍ.....	126
7.1	Možnosti využití	126
7.1.1	Odsolovací jednotky	126
7.1.2	Jednotky pro čištění vody	126
7.1.3	Zahušťovací jednotky	126
7.2	Ekonomické aspekty	128
7.2.1	Ekonomické porovnání tepelných membránových metod	128
7.2.2	Pořizovací ceny	131
8	ZÁVĚR	133
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	135
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	142
	SEZNAM OBRÁZKŮ	144
	SEZNAM TABULEK	146
	PUBLIKACE AUTORA	147
	PŘÍLOHY	148

1 ÚVOD

V době nezastavitelného rozvoje ekonomicky vyspělých i rozvojových zemí a zvyšování životních standardů jejich obyvatel se zároveň zvyšuje poptávka po čisté, resp. sladké vodě.

Pod pojem „sladká voda“ je myšlena voda zbavená solí k technologickým účelům. Tato voda může být dále upravena na pitnou.

V současné době tak řeší mnoho států na světě problém s nedostatkem sladké vody. Možností pro zajištění dostatku sladké vody je úprava mořské vody jejím odsolováním. Voda je pro lidstvo velmi důležitým přírodním zdrojem. Její spotřeba se neustále zvyšuje s rostoucím počtem lidské populace a neustálým růstem průmyslové a zemědělské výroby.

Povrch Země je pokryt vodou ze tří čtvrtin; 97 % vody je v oceánech, 2 % v ledovcích a zbývající část připadá na jezera, řeky a podzemní zdroje [1].

Přírodní zdroje nestačí pokrýt zvyšující se požadavky na bezpečné dodávky značného množství sladké vody. Lidstvo je proto nuceno k hledání jiných zdrojů této vody. Řešením pro zajištění dostatku sladké vody jsou odsolovací metody.

Odsolování je způsob úpravy vody, při kterém jsou separovány rozpuštěné minerály (převážně soli) ze slané mořské vody [2]. Důležitost odsolené vody ve světě bezpochyby stoupá, protože přírodní zdroje sladké vody jsou vyčerpány a je potřeba zajistit potřeby rostoucí poptávky po ní. Odsolování se stalo akceptovanou alternativou k tradičním přírodním zdrojům sladké vody [3].

Zaměření práce na tepelné destilační metody má několik důvodů. Prvním je potřeba nových druhů odsolovacích jednotek v segmentu menších a středních spotřebitelů v suchých státech. Druhým důvodem je působení autora ve strojírenské společnosti, která je zaměřena na výrobu energetických zařízení a tepelné techniky. Společnost směřuje do nového segmentu trhu, což je výroba odsolovacích zařízení pro uživatele v tzv. suchých státech.

1.1 Cíle dizertační práce

Dizertační práce je zaměřena na výzkum a vývoj kompaktního modulového zařízení na úpravu mořské vody na základě provedení a vyhodnocení experimentálních zkoušek na experimentálním zařízení.

Cílem dizertační práce je tedy provedení souboru činností souvisejících s výzkumem a vývojem modulového zařízení na úpravu mořské vody, především:

- přehled metod úpravy mořské vody
- výchozí návrh jednotek pro úpravu mořské vody
- popis experimentální jednotky
- návrh experimentální jednotky
- zhotovení experimentální jednotky a její uvedení do provozu
- návrh a posouzení experimentálních měření
- vyhodnocení experimentálních měření a konfrontace s vypočtenými hodnotami

- diskuze a řešení konstrukčních a materiálových aspektů
- řešení měření a regulace.

1.2 Aktuální dostupnost sladké vody ve světě

Přibližně 25 % světové populace nemá přístup ke sladké vodě v dostatečném množství a uspokojivé kvalitě a více než 80 zemí čelí problému s nedostatkem sladké vody [4]. S oteplováním Země a tím souvisejícím suchem a desertifikací se očekává ještě větší prohloubení problémů s nedostatkem sladké vody [5]. Země, které dnes nemají problém s nedostatkem vody, mohou mít tento problém v blízké budoucnosti. Ačkoliv jsou oceány potřebné pro rybolov a námořní dopravu, jejich voda je příliš slaná pro použití v lidském životě nebo pro zemědělství.

1.3 Historie odsolování

Odsolovací proces je z historického pohledu běžným přírodním dějem. Lidstvo pro zajištění dostatku sladké vody vyvinulo v průběhu času různé technické metody odsolování, tj. různé postupy pro odstranění rozpuštěných solí z vodného roztoku.

1.3.1 Přírodní proces odsolování

Odsolování je přírodní kontinuální proces, který je základem koloběhu vody v přírodě [6]. Dešťové srážky padají na povrch Země a poté odtékají vodními toky do oceánů a moří. Na této cestě, při které využívají lidé vodu k mnoha odlišným účelům, je voda obohacena o různé minerály a soli. Při tomto transitu řekami a také při setrvání vody v oceánech a jezerech se vlivem slunečního záření část vody odpaří do atmosféry. Při odpaření zůstávají minerály ve vodě, páry jsou bez jejich obsahu a tato odpařená voda se poté akumuluje v oblacích, které následně způsobí dešťové srážky a tímto se celý koloběh vody v přírodě uzavře [6].

1.3.2 Historie technologického odsolování

Počátky odsolování míří do konce 19. století, kdy lidé měnili svůj životní styl a nacházeli nová místa pro život. Mnohá města a průmyslové oblasti byly vybudovány v místech, kde není dostatek přírodní sladké vody, avšak je zde dostatek mořské nebo brakické vody. Tato dostupná slaná voda byla obyvateli upravována na sladkou. Tyto změny byly nejvíce patrné na Středním východě, v severní Africe a v některých oblastech Karibiku, kde byl dříve hospodářský rozvoj brzděn nedostatkem sladké vody [6].

Brakická voda má mnohem menší obsah rozpuštěných látek než voda mořská a nachází se např. v ústí řek do moří nebo ve studnách blízko pobřeží, kam prosakuje slaná voda z moře.

Hlavní pokrok v oblasti odsolování přišel ve čtyřicátých letech 20. století během druhé světové války, kde bylo potřeba zajistit dostatek vody pro vojska v suchých oblastech [7].

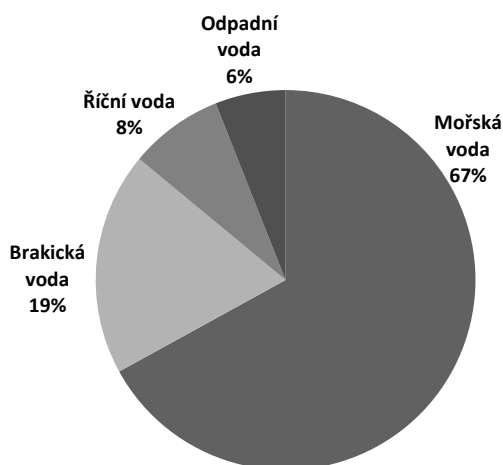
Použití odsolovacích technologií pro výrobu sladké vody z vody mořské nebo brakické ve světě v posledních dekádách významně narůstá. Tyto technologie jsou také používány pro zlepšení kvality stávajících dodávek sladké vody pro pitné a průmyslové účely i pro úpravu průmyslových a komunálních odpadních vod před jejich vypuštěním nebo opětovným použitím. Kolem roku 1950 bylo na světě 225 odsolovacích stanic s kapacitou 0,1 mil. m³/den. V roce 1990 jich bylo 3500 s kapacitou 11 mil. m³/den [7]. V roce 2012 byla světová odsolovací kapacita 78 mil. m³/den [8]. Použití odsolovacích technologií se zvyšuje s rostoucí poptávkou po sladké vodě a se zhoršující se kvalitou stávajících dodávek.

Trhu s odsolovacími zařízeními dříve dominovaly tzv. destilační metody, avšak pro jejich poměrně vysokou energetickou náročnost se poslední dobou rozmáhají membránové metody (převážně reverzní osmóza) [9].

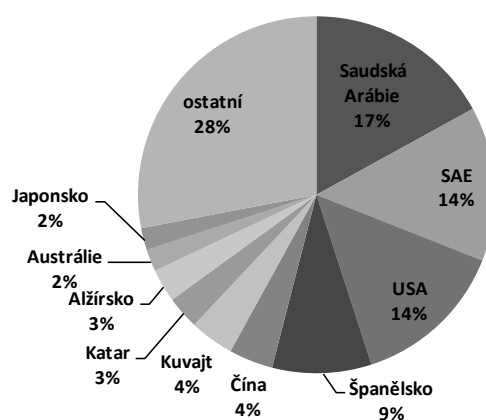
1.4 Potenciál odsolování

Odsolování je zcela nezávislé na hydrologickém cyklu. Odsolováním se vytváří kvalitnější sladká voda z brakické nebo mořské vody. Odsolovací proces může být použit v průmyslu k výrobě vysoce čisté vody nebo procesní vody s velmi dobrou čistotou. Využitím metod odsolování se zvyšuje produktivita v různých odvětvích průmyslu, jako např. papírenském, energetickém, petrochemickém, důlním, farmaceutickém, potravinářském aj.

Odsolovací stanice bývají umístěny přímo v oblastech s nedostatkem přírodní sladké vody. Odsolování je zde chápáno jako doplňkový způsob získávání sladké vody k tradičním přírodním zdrojům [10]. Odsolovací jednotky jsou na trhu v mnoha variantách; jejich nabídka je úzce spojena s poptávkou a kapitálovými možnostmi investorů. Na obr. 1 je znázorněno zastoupení zdrojových vod pro odsolování a na obr. 2 je znázorněno zastoupení států, které využívají metody odsolování tak, jak je uvádí literatura [5].



Obr. 1 Zdrojové vody pro odsolování [5]



Obr. 2 Státy s největší odsolovací kapacitou [5]

1.5 Vlastnosti vody

Důležitým aspektem při výběru vhodné metody odsolování i při konstrukci zařízení pro odsolování jsou vlastnosti napájecí mořské i požadavky na výslednou sladkou vodu. V tab. 1 je uvedeno zastoupení rozpuštěných látek v mořské vodě a v tab. 2 jsou uvedeny požadavky Světové zdravotnické organizace (WHO) na parametry vody vhodné pro pitné účely.

Tab. 1 Složení mořské vody [11], [12], [13]

Látka / forma	Koncentrace [mg/kg]	Poměr koncentrací [%]	Hmotnost [mmol/kg]
Chlor Cl ⁻	19 45	55,03	546
Sodík Na ⁺	10 752	30,59	468
Síran SO ₄ ²⁻	2 701	7,68	28,1
Hořčík Mg ²⁺	1 295	3,68	53,3
Vápník Ca ²⁺	416	1,18	10,4
Draslík K ⁺	390	1,11	9,97
Hydrogenuhlíčan HCO ₃ ⁻	14	0,41	2,34
Bromid Br ⁻	66	0,19	0,83
Borát BO ₃ ³⁻	27	0,08	0,46
Stroncium Sr ²⁺	13	0,0	0,091
Fluorid F ⁻	1	0,00	0,068
Celkem	35 151	100,0	1 119,6

Tab. 2 Parametry pitné vody [13], [14]

WHO standard	Obsah [mg/l]	
	akceptovatelné minimum	dovolené maximum
Obsah rozpuštěných látek (TDS)	500	1500
Cl ⁻	200	600
SO ₄ ²⁻	200	400
Ca ²⁺	75	100
Mg ²⁺	3	150
F ⁻	0,7	0,
NO ₃ ⁻	< 5	100
Cu ²⁺	0,05	1,5
Fe ³⁺	0,1	1,0
NaCl	250	-
pH	7,0 ÷ 8,5	6,9 ÷ 9,

Ve sladké i slané vodě jsou kromě výše uvedených prvků rozpuštěné i plyny. Některé z těchto plynů přinášejí při technologických procesech nakládání s vodou značně neblahé důsledky, jako je např. koroze, a je potřeba je z napájecí mořské vody před jejím použitím v odsolovacích procesech odstranit.

V přírodních vodách se vyskytují dva typy rozpuštěných plynů [15]:

- elementární plyny – nereagují s vodou (O₂, N₂, ...)
- plynné anorganické sloučeniny – reagují s vodou za vzniku kyselin nebo hydroxidů (CO₂, H₂S, NH₃, ...).

Obsah plynů obsažených v mořské vodě je uveden v tab. 3. Zdrojem kyslíku v přírodních vodách je atmosférický vzduch, fotosyntetická činnost vodních fototrofů nebo sopečná činnost [13]. Rozpustnost vzduchu v mořské vodě je dána Henryho konstantou [15].

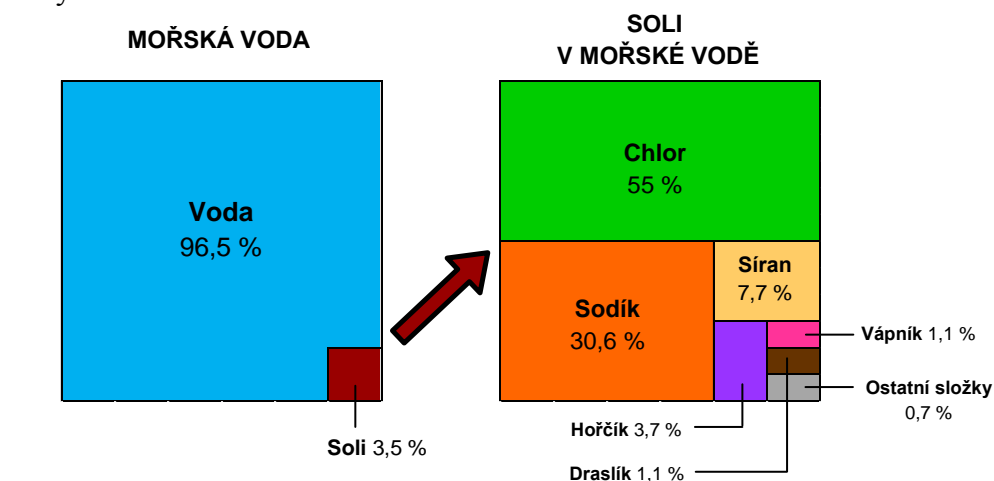
Tab. 3 Plyny rozpuštěné v atmosféře a mořské vodě [17]

Plyn	N ₂	O ₂	Ar	CO ₂	Ne	He	Kr	Xe
Obsah v atmosféře [ml/l]	781	210	9,32	0,3	1,82 * 10 ⁻²	5,30 * 10 ⁻³	1,0 * 10 ⁻³	8,0 * 10 ⁻⁵
Obsah v mořské vodě [ml/l]	13	2 ÷ 8	0,32	50	1,8 * 10 ⁻⁴	5,0 * 10 ⁻⁵	6,0 * 10 ⁻⁵	7,0 * 10 ⁻⁵

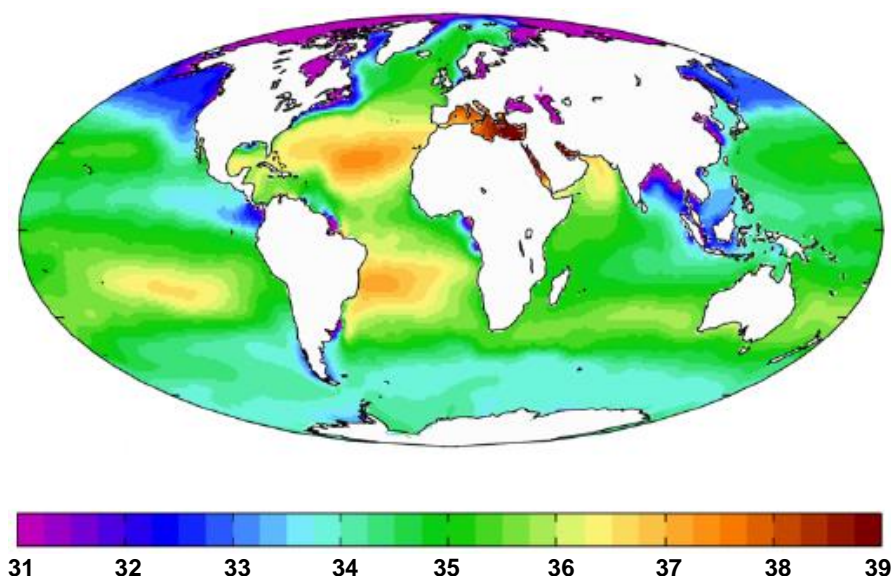
1.5.1 Mořská voda

Koncentrace rozpuštěných látek v mořské vodě je vyjádřena její slaností (tj. salinitou). Ta se základně vyjadřuje v gramech rozpuštěných látek na kilogram mořské vody, popř. v gramech na litr nebo ppm. Průměrná slanost mořské vody je 35,16 g/kg, avšak mění se dle oceánů a lokalit v oceánech v rozmezí od 31 do 38 g/kg. Vyšší hodnoty slanosti jsou ve Středozemním moři, Rudém moři (Arabský záliv) a v Perském zálivu. Nižší hodnoty se nacházejí v blízkosti ústí řek. V této práci (i obecně v praxi) se vychází ze salinity $S = 35$ g/kg. Při salinitě 35 g/kg a teplotě 20 °C je hustota mořské vody 1024 kg/m³ [18].

Při referenční teplotě 20 °C je hustota mořské vody o 3 % vyšší než u sladké vody, dynamická viskozita o 8 % vyšší a povrchové napětí o 1 % vyšší [15]. Mořská voda má zásaditý charakter (pH cca 7,8 až 8,3), jenž je závislý na obsahu volného kyslíku a množství oxidu uhličitého (CO₂) [18]. Grafické znázornění poměrů rozpuštěných složek v mořské vodě je znázorněno na obr. 3, na obr. 4 je znázorněna salinita různých oceánů.



Obr. 3 Rozpuštěné soli v mořské vodě [12]



Obr. 4 Znázornění salinity v různých oceánech v g/kg [12]

V průmyslové oblasti odsolování se dělí zdrojová voda pro následné odsolení do dvou hlavních skupin: mořská voda a brakická voda. Parametry různých druhů vody v oblasti průmyslového odsolování jsou uvedeny v tab. 4, tab. 5 a tab. 6.

Tab. 4 Kategorie vody podle obsahu rozpuštěných solí [19]

Označení vody	Obsah rozpuštěných solí [mg/kg]
Sladká	< 500
Brakická	500 ÷ 30 000
Mořská	30 000 ÷ 50 000
Koncentrát	> 50 000

Tab. 5 Označení vody podle obsahu rozpuštěných solí [20]

Moře	Prům. slanost [mg/kg]
Baltské	8 000
Černé	18 000
Průměrná mořská voda	35 000
Středozevní	38 000
Rudé	40 000

Velké množství termofyzikálních vlastností mořské vody v závislosti na její teplotě a salinitě je podrobně uvedeno v příloze č. 5 [21].

1.5.2 Pitná voda

Odsolená voda, jako produkt různých procesů odsolování, není vhodná k pitným účelům obyvatelstva, jelikož je zbavena většiny minerálů. Pro pitné účely je nutné dodat sladké (odsolené) vodě potřebné minerály – tzv. ji „remineralizovat“. O procesech remineralizace pojednává kap. 2.6.2. Odsolenou vodu pro pitné, ale i jiné účely, je potřeba upravit i pro potřeby skladování a transportu. Tato následná úprava destilátu bývá označována jako „pouprava“ a je taktéž detailně popsána v kap. 2.6.2.

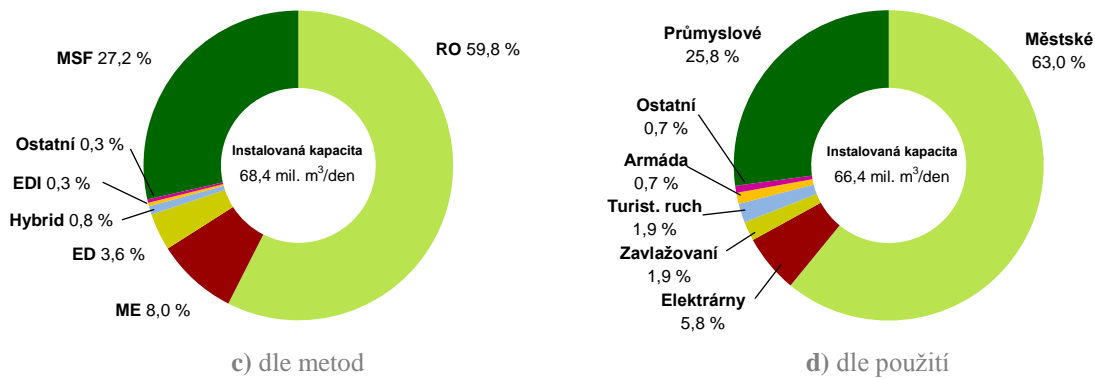
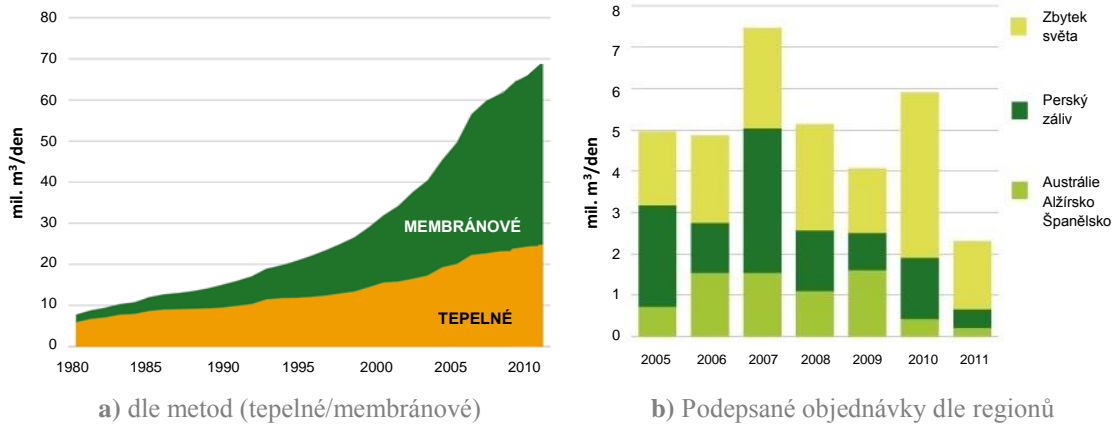
Tab. 6 Hodnocení vody pro účely obyvatelstva [22]

Použití	Hodnocení	Prům. slanost [mg/kg]
pitné účely	excelentní	< 100
pitné účely	uspokojivé	100 ÷ 1 000
pitné účely	špatné	1 000 ÷ 1 200
pitné účely	nevyhovující	> 1 200
zavlažování	max. pro zdravý růst	3500

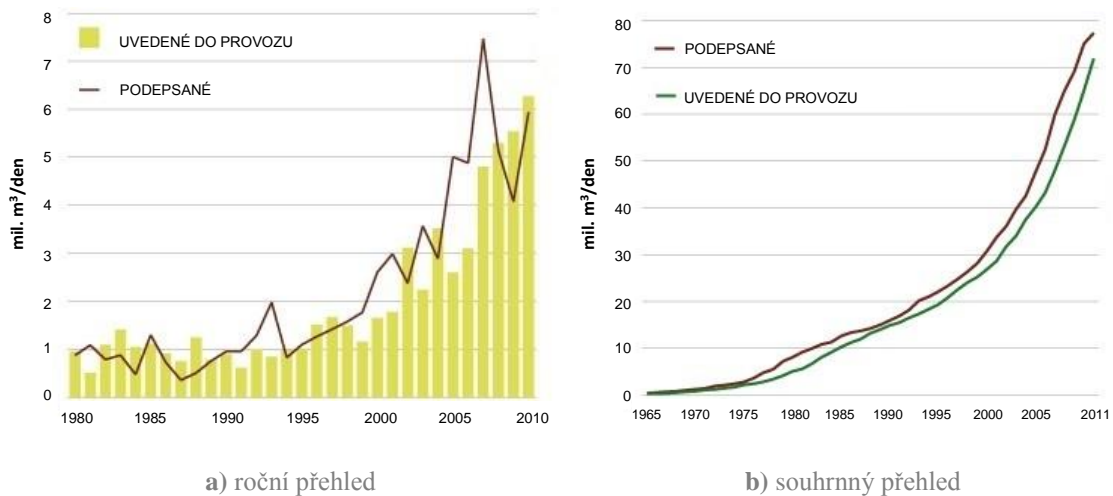
Následující kapitola 1.6 dizertační práce přibližuje velikost trhu s odsolovacími technologiemi a zastoupení různých metod odsolování v celosvětovém měřítku. Jednotlivé metody odsolování a jejich principy jsou pak následně popsány v kapitole 2.

1.6 Základní údaje o trhu s odsolovacími technologiemi

Pro představu o velikosti trhu s odsolovacími technologiemi slouží následující grafy na obr. 5 a obr. 6.



Obr. 5 Zastoupení odsolovacích kapacit ve světě [23]



Obr. 6 Světový trend vývoje podepsaných objednávek odsolovacích jednotek a jejich uvedení do provozu [23]

2 METODY ODSOLOVÁNÍ

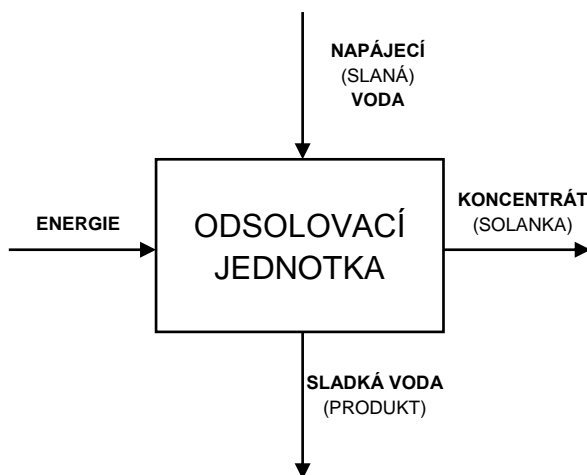
Tato kapitola popisuje princip odsolování a používané metody v odsolování se zaměřením na destilační a membránové procesy.

Proces odsolování je charakterizován odstraněním solí a dalších rozpuštěných látek obsažených v napájecí (slané) vodě. Ostatní látky, jako jsou např. rozpuštěné kovy a organické látky, mohou být také odstraněny některou z odsolovacích metod [7].

Obecně znázorněná odsolovací jednotka (viz obr. 7) pak v podstatě rozděluje napájecí slanou vodu (anglicky *feed water*) na dva proudy:

- proud s nižší koncentrací rozpuštěných solí, tj. sladká (čistá) voda (anglicky *fresh water*)
- proud se zbylou vyšší koncentrací rozpuštěných solí, tj. koncentrát (solanka) (anglicky *brine*).

Každé odsolovací zařízení vyžaduje ke svému provozu tepelnou nebo elektrickou energii. Tepelné metody odsolování vyžadují oba druhy energie a membránové metody pouze elektrickou.



Obr. 7 Princip odsolovací jednotky [6]

Pro separaci rozpuštěných minerálů z vody se používá řada odlišných technologií. Pět nejpoužívanějších základních metod vedoucích k odstranění soli a ostatních rozpuštěných látek z vody dle [7] tvoří:

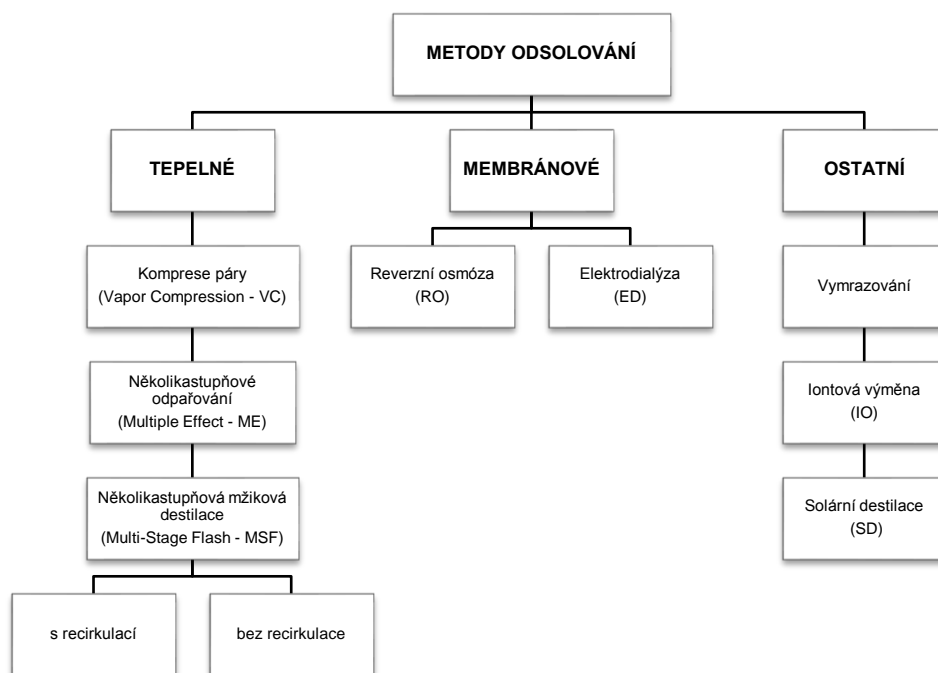
- tepelné metody (destilace)
- reverzní osmóza
- elektrodialýza
- iontová výměna
- vymrazování.

Kromě výše uvedených metod existují také hybridní metody. Ty kombinují tepelné i membránové metody i další méně používané metody [24].

Z velkého množství metod odsolování se jich však komerčně ujalo jen několik. Komerčně se využívají hlavně některé metody destilace a reverzní osmóza [25]. Ostatní technologie mají menší využití, a to hlavně z důvodu jejich malé kapacity. Jsou to např. solární destilace (SD) [26], komprese páry (VC) nebo ostatní metody s velmi nízkou slaností sladké vody (produktu), jako např. elektrodialýza (ED). Navíc je zde mnoho technologií, které jsou stále ve vývoji [27], [28]. Jmenovitě jsou to tyto metody:

- dopředná osmóza (FO)
- membránová destilace (MD)
- elektodeionizace (EDI)
- kapacitní deionizace (CDI)
- rychlé odpaření rozprašováním (RSE)
- vymrazování
- zvlhčování-vysušování.

Další málo používané technologie jsou mikrofiltrace, ultrafiltrace, nanofiltrace, iontová filtrace). Základní rozdělení metod odsolování je názorně provedeno na obr. 8.



Obr. 8 Rozdělení metod odsolování [29]

Každá odsolovací metoda má své výhody i nevýhody, jak vyplývá např. z [30], nelze jednoznačně říci, že určitá metoda odsolování je nejvhodnější pro všechny aplikace. Volba odsolovací metody závisí hlavně na:

- obsahu rozpuštěných solí v napájecí vodě
- ceně napájecí vody
- požadované kvalitě sladké vody.

Velikosti vyráběných odsolovacích jednotek se nachází v široké škále od malých jednotek pro použití v domácnostech nebo na lodích (s kapacitou jednotek m^3/den), přes střední velikosti jednotek, které mohou být použity např. v hotelových resortech (s kapacitou desítek až stovek m^3/den), až k velkým odsolovacím jednotkám s kapacitami v desítkách tisíc m^3/den .

2.1 Tepelné metody

Tepelné metody odsolování jsou založeny na principu destilace. Destilace je historicky nejpoužívanějším způsobem odsolování a dochází při ní k fázové přeměně. Podobá se přírodnímu procesu odsolování a spočívá v ohřívání napájecí vody, jejímu odpařování, kondenzování vodních par na teplosměnných plochách, a tím vzniká výsledný destilát (produkt) [31]. Destilát neobsahuje rozpuštěné soli a minerály, které jsou obsaženy v napájecí vodě. Tepelné metody využívají nižšího bodu varu kapalin při nižším tlaku, než je atmosférický tlak. Pro zvýšení energetické účinnosti bývají navrhovány jako vícestupňové, tj. k odpařování vody dochází ve více odpařovacích komorách (stupních), kde se postupně snižuje tlak i teplota. Např. při tlaku, který odpovídá čtvrtině atmosférického tlaku, dochází k varu vody při $65\text{ }^\circ\text{C}$ a při desetíně je to $45\text{ }^\circ\text{C}$ [32]. V tab. 7 je pro představu uveden pokles bodu varu sladké vody v závislosti na okolním tlaku. Mořská voda má vyšší bod varu než sladká voda [21]. Trendem pro další zvýšení energetické účinnosti je kombinování tepelných metod odsolování o další doplňkové odsolovací procesy [30].

Tab. 7 Bod varu vody při různých tlacích [12], [32]

Tlak	bar(a)	1	0,47	0,32 (vrchol Mt. Everest)	0,25	0,1
Bod varu	$^\circ\text{C}$	100	80	70	65	45

V porovnání s ostatními metodami odsolování, má destilace nejlepší parametry odsolené vody. Tepelné metody jsou použity u téměř poloviny všech odsolovacích kapacit ve světě [30]. Tepelné metody odsolování se používají převážně v těchto aplikacích:

- pro úpravu vody s vysokým podílem rozpuštěných solí (např. mořská voda)
- v místech s potřebou velkého množství sladké vody
- v místech, kde jsou levné náklady na tepelnou energii nebo je zde dostupnost odpadního tepla.

Jelikož se při odsolování mořské vody zpracovávají obrovské objemy, hraje velmi důležitou roli ekonomika celého procesu [33]. Obecně platí u všech tepelných metod úpravy vody, že se vzrůstajícím počtem stupňů se zvyšuje účinnost zařízení a snižují se provozní, resp. celkové náklady [34].

Tepelné metody odsolování (destilace) lze dle [7] rozdělit do čtyř skupin:

- vícestupňová mžiková (okamžitá) destilace (MSF)
- vícestupňové odpařování (ME)

- komprese páry (VC)
- solární destilace (SD).

Dle terminologie zavedené v oblasti procesního inženýrství lze tepelné metody odsolování založené na principu destilace nazvat odparkami. Obecně jsou odparky tepelné výměníky, kde odpařované médium prochází změnou fází. Hnací silou v jednotlivých stupních odparek je rozdíl teplot mezi topným médiem a teplotou varu zahušřovaného roztoku za daného tlaku. Celkový teplotní spád na odparce, tj. rozdíl mezi teplotou topného média na vstupu do odparky a teplotou brýdové páry na výstupu z ní, nelze plně využít. Je snížen zejména o hodnoty zvýšení bodu varu a ztráty tepla mezi stupni odparky. Výsledný použitelný teplotní rozdíl se nazývá efektivní teplotní spád ΔT [35].

2.1.1 Vícestupňová mžiková destilace – MSF

Při destilaci metodou MSF (angl. *Multi-Stage Flash*), která je v češtině dle [33] nazývána několikastupňová mžiková destilace, jde o proces okamžitého rovnovážného odpaření, tj. o okamžitou rovnovážnou destilaci, avšak nadále budeme pro metodu MSF, v souladu s obecně používaným názvoslovím, používat termín „vícestupňová mžiková destilace“.

Při vícestupňové mžikové destilaci se uplatňuje efekt mžikového (tj. okamžitého) rovnovážného odpařování části průtočného objemu ve více stupních [36]. Jednotka pro úpravu mořské vody založená na principu MSF má vždy dva nebo více stupňů pro dosažení co největší účinnosti. Čím má jednotka více stupňů, tím je účinnější, má levnější provozní náklady a větší kapacitu (tj. produkci destilátu). Každý stupeň jednotky je vybaven odpařovací komorou, odlučovačem kapek a kondenzátorem.

Jak již bylo zmíněno, jednotka MSF je založena na efektu mžikového odpaření (tzv. *flash* efektu) za podtlaku, tj. za tlaku nižšího než je tlak okolí. Rychlého rovnovážného odpaření se dosáhne přivedením přehřáté kapaliny do nádoby s nižším tlakem, než odpovídá jeho bodu varu a tím dojde k mžikovému odpaření části kapaliny.

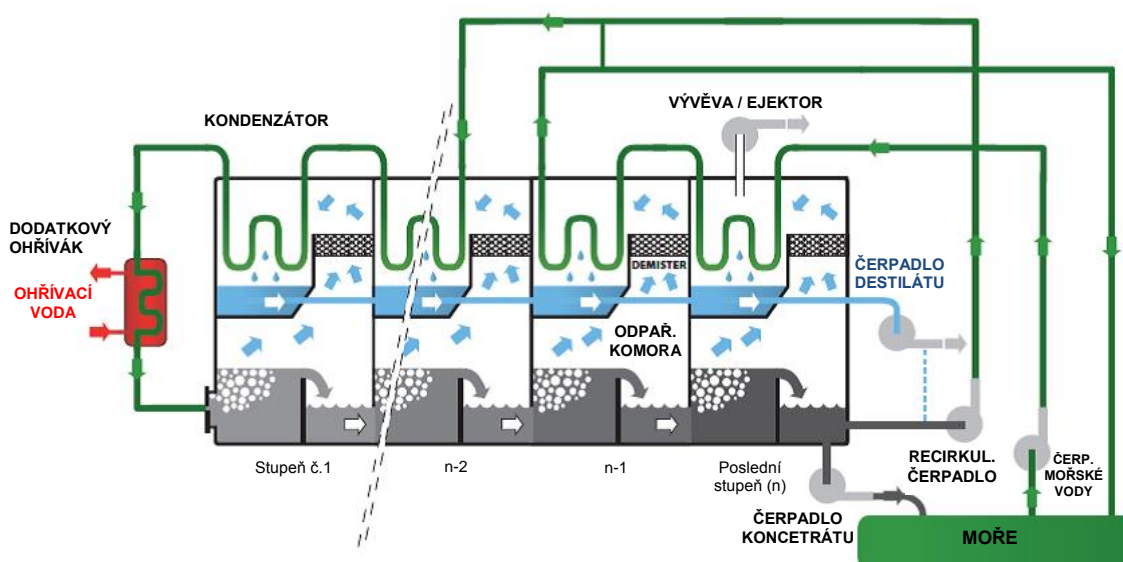
Princip jednotky je následující (viz obr. 9). Voda k odsolení prochází trubkami (trubkovým prostorem) kondenzátorů, v jejichž mezitrubkovém prostoru jsou ochlazovány a kondenzovány vzniklé páry. Zkondenzované páry předají své kondenzační teplo napájecí vodě, která prochází trubkami kondenzátorů a tím dochází k jejímu přehřevu. Po průchodu kondenzátory všech stupňů jednotky ještě není napájecí voda ohřáta na požadovanou teplotu a je nutné ji dohřát v dodatkovém ohříváku, který je v anglické terminologii nazýván jako „*brine heater*“. Po dohřátí v dodatkovém ohříváku proudí voda do první odpařovací komory jednotky, ve které je nižší tlak než odpovídá tlaku varu při její aktuální teplotě. Tím se část vody okamžitě odpaří, dokud teplota napájecí vody neodpovídá tlaku v komoře. Hnací silou rovnovážného odpaření je rozdíl tlaků. Zbývající mírně zahušřená voda proudí dále do druhého stupně, kde je opět nižší tlak než v předchozím stupni, a část vody se okamžitě odpaří. Princip se opakuje až do konečného počtu stupňů n . O rovnovážném tlaku a teplotě odpaření vždy platí $p_n < p_{n-1}$ a $T_n < T_{n-1}$. Vzniklé páry proudí přes odlučovač kapek do kondenzátorů, kde na teplosměnném povrchu trubek kondenzují. Vzniklá sladká voda je postupně přes jednotlivé kondenzátory od

prvního po poslední stupeň odváděna do čerpadla destilátu (tj. sladké vody). Neodpařená mořská voda z posledního stupně má vyšší koncentraci solí, než měla na začátku. Jde tedy o zahuštěný roztok nazývaný koncentrát (popř. solanka, anglicky „brine“). Koncentrát je odváděn čerpadlem zpět do moře nebo k recirkulaci.

Destilační proces v jednotkách MSF pracuje od mírně sníženého tlaku (tzv. nízkého podtlaku) v prvním stupni po velmi snížený tlak (tzv. hluboký podtlak) v posledním stupni n a rozdíl teplot mezi jednotlivými stupni je příčinou opakovaného odpařování procházející kapaliny.

Pro zvýšení účinnosti jednotky bývá jednotka vybavena recirkulací, tj. část vystupujícího koncentrátu je přidávána do napájecí vody před jejím vstupem do jednotky. Tím se ušetří část nákladů na ohřev vody a chemikálie, které jsou do surové vody dávkovány (jde např. o protipěnicí a protiusazovací přípravky).

Jednotlivé stupně zařízení (komory) musí být od sebe tlakově odděleny, např. vodním zámekem.



Obr. 9 Schéma jednotky MSF s recirkulací koncentrátu

2.1.2 Vícestupňové odpařování – ME

Vícestupňové odpařování bývá označováno ME – z angl. *Multiple Effect*, nebo MEE – z angl. *Multiple Effect Evaporation*. Zařízení ME je založeno na principu varu vody v trubkách výměníků, resp. odparek (tzv. odparky se šplhajícím filmem) za sníženého tlaku (tj. podtlaku). Tyto tepelné výměníky v každém stupni tak jsou ve vertikálním provedení.

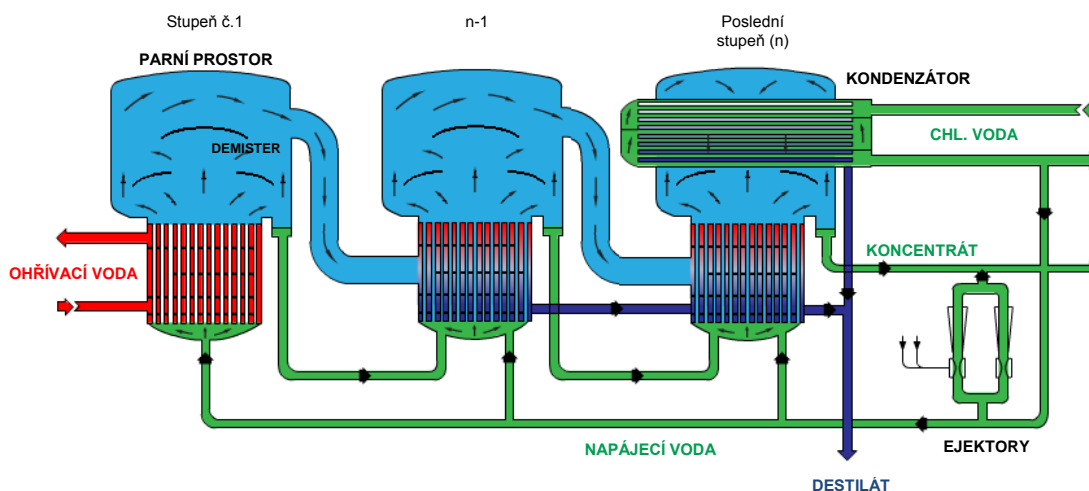
Jednotka na principu ME má jeden či více stupňů. Čím má jednotka více stupňů, tím je účinnější, má nižší provozní náklady a větší kapacitu. Každý stupeň je vybaven výměníkem tepla, ve kterém probíhá var (tzv. vařákem) a odlučovačem kapek. Kondenzátor je vždy umístěn až na posledním stupni n .

Princip jednostupňového zařízení ME

Napájecí voda prochází trubkami kondenzátoru, kde je mírně ohřata kondenzujícími parami, a poté je přivedena do spodní části vertikálního trubkového výměníku tepla (vařáku), ve kterém se část procházející vody odpaří (cca 1/3). Proudící voda trubkami výměníku je přítom, v případě odsolovacích jednotek, nejčastěji ohřívána topnou ohřívací vodou, která prochází mezitrubkovým prostorem vařáku. Vzniklá pára jde přes odlučovač kapek do kondenzátoru, kde zkondenzuje a vytvoří destilát. Destilát je následně odčerpán čerpadlem destilátu. Koncentrát (tzv. zahuštěný roztok) je odváděn čerpadlem koncentrátu zpět do moře [34].

Princip vícestupňového zařízení ME

Napájecí voda prochází trubkami kondenzátoru, který je umístěn na posledním stupni celého zařízení. Zde se mírně ohřeje a poté je voda přivedena do spodní části vertikálního trubkového výměníku tepla (vařáku), ve kterém se část procházející vody odpaří (cca 1/3). Vzniklá pára jde přes odlučovač kapek do parovodu, kterým je přivedena do mezitrubkového prostoru výměníku druhého stupně. Tato pára na vnějším povrchu trubek zkondenzuje, a vzniká tak destilát. Kondenzací na povrchu trubek předá pára své teplo slané vodě uvnitř trubek, jejíž část se díky získanému teplu při průchodu trubkami odpaří. Neodpařená voda z prvního stupně slouží jako napájecí voda druhého stupně. Stejný princip je i v dalších stupních. Teplota vody i tlak v jednotlivých stupních se postupně snižují. Vzniklá pára v posledním stupni jde přes odlučovač kapek do kondenzátoru, kde zkondenzuje a vytvoří destilát (sladká voda). Destilát je poté odčerpán čerpadlem destilátu. Zahuštěná slaná voda (solanka) je odváděna čerpadlem zpět do moře [34]. Princip vícestupňového zařízení je znázorněn na obr. 10.



Obr. 10 Schéma jednotky ME (3 stupně)

2.1.3 Kompres pary – VC

Oba výše uvedené způsoby odsolování pracující na principu destilace využívaly sníženého tlaku nad hladinou slané vody pro dosažení jejího odpaření.

U metody komprese páry (angl. *Vapor Compression* – VC) je dodávána systému tepelná energie kompresí páry.

U metody komprese páry se napájecí mořská voda předejde průchodem kondenzátorem a následně je přivedena do nádoby se sníženým tlakem, kde se její část odpaří teplem proudu komprimované páry. Snížený tlak v zařízení je dosažen sáním kompresoru, ten tak funguje jako vývěva. Kondenzační teplo komprimované páry je také využito k přehřátí vstupující napájecí vody. Princip metody komprese páry je znázorněn na obr. 11.

Komprese způsobí, že páry sladké vody začnou kondenzovat na stěně trubek. Teplo odevzdané při kondenzaci prochází stěnou na vnější stranu trubek, kde se nachází napájecí voda a ta se díky přijatému kondenzačnímu teplu částečně odpaří. Napájecí voda je do odpařovací komory nastříkována a k jejímu odpaření dochází na vnější stěně trubek výměníku. Stlačená pára kondenzuje a vytváří destilát. V tomto procesu je majoritní část energie dodávána kompresorem, který stlačuje páru i vytváří podtlak v odpařovací komoře [7].

Komprese páry je možné dosáhnout dvěma způsoby [37]:

- mechanicky – mechanická komprese (*Mechanical Vapor Compression* – MVC)
- párou – tepelná komprese (*Thermo-Vapor Compression* – TVC).

U mechanické komprese je kompresor poháněn elektrickým nebo dieselovým motorem. U parní komprese dochází ke stlačení páry díky ejektoru, kterému dodává energii vysokotlaká pára. Většinou se u metod VC využívá mechanické komprese. Na trhu jsou jednotky převážně s jedním stupněm (maximálně dvěma) a horizontálním nebo vertikálním uspořádáním trubek.

2.1.4 Klíčové komponenty jednotek pracujících na tepelném principu

Většina jednotek založených na tepelných metodách odsolování vyžaduje ke své konstrukci a provozu tyto uvedené základní zařízení:

- **Nádoba parního prostoru** – skrz tuto nádobu je odváděna uvolněná vodní pára sladké vody společně s malým množstvím stržených kapek slané vody přes odlučovač kapek na teplosměnné plochy kondenzátorů. Materiál nádoby musí být korozivzdorný, protože zde dochází k neustálému kontaktu s agresivní slanou vodou.
- **Dodatkový ohřívák** – dochází v něm k ohřevu mořské vody určené k následnému zpracování. Jeho trubkový prostor je ve styku s mořskou vodou, a tudíž jeho materiálové provedení musí být vhodně zvoleno tak, aby byla zaručena dlouhá životnost zařízení. Mezitrubkový prostor není ve styku se slanou vodou.
- **Kondenzátor** – dochází v něm ke kondenzaci vzniklých par sladké vody. Páry mohou obsahovat kapky slané vody, a tudíž jejich materiálové provedení musí být vhodně zvoleno tak, aby byla zaručena dlouhá životnost zařízení.
- **Odlučovač kapek** – bývá umístěn v proudu vodní páry a slouží k zachycení kapek vody, které mohou být v páře v malém množství

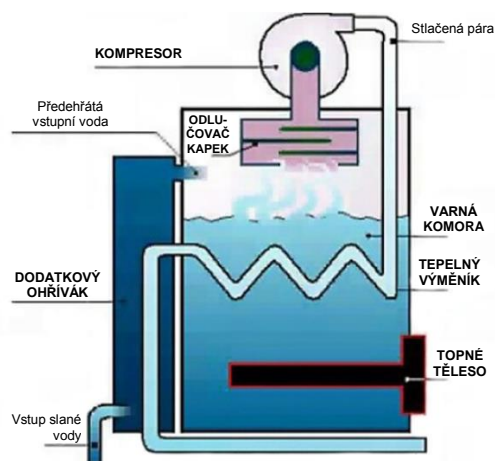
obsaženy. Tyto kapky jsou slané, a pokud by nebyly zachyceny, znehodnotily by výsledný destilát (tj. měl by vyšší slanost).

- **Ejektory, vývěvy** – slouží pro vytvoření podtlaku v zařízení a odsání uvolněných nekondenzovatelných plynů.
- **Čerpadla** – Přivádějí a odvádějí pracovní kapaliny do jednotky, resp. z ní. Materiálové provedení čerpadel je nutné volit s ohledem na vlastnosti čerpaných kapalin. Tepelné metody využívají sníženého tlaku v zařízení, je tudíž potřeba dbát na správný návrh a vhodný výběr těch čerpadel, která čerpají kapalinu z prostoru s vysokým podtlakem.

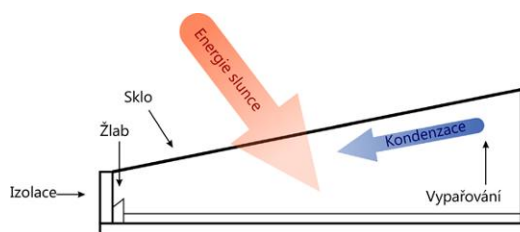
2.1.5 Solární destilace

Zdrojem tepla při solární destilaci je sluneční záření. Princip je následující. Energie slunečního záření odpařuje surovou vodu z bazénu a vzniklá vodní pára kondenzuje na průhledném skle, které tvoří střešu bazénu. Destilát následně stéká po vnitřní ploše střechy až do místa, kde je kondenzát sbírán. Do bazénu se musí přivádět napájecí voda a vzniklý koncentrát se musí kontinuálně odvádět. Princip metody solární destilace je znázorněn na obr. 12.

Solární destilace neumožňuje dostatečně velké zpracovatelské kapacity, a proto se nevyužívá průmyslově ve velkém měřítku. Používána je především ve velmi suchých a slunečných regionech, kde není k dispozici sladká voda. Její výkon i použití záleží na konstrukci i na místě instalace.



Obr. 11 Princip komprese páry [38]



Obr. 12 Princip solární destilace [38]

2.2 Membránové metody

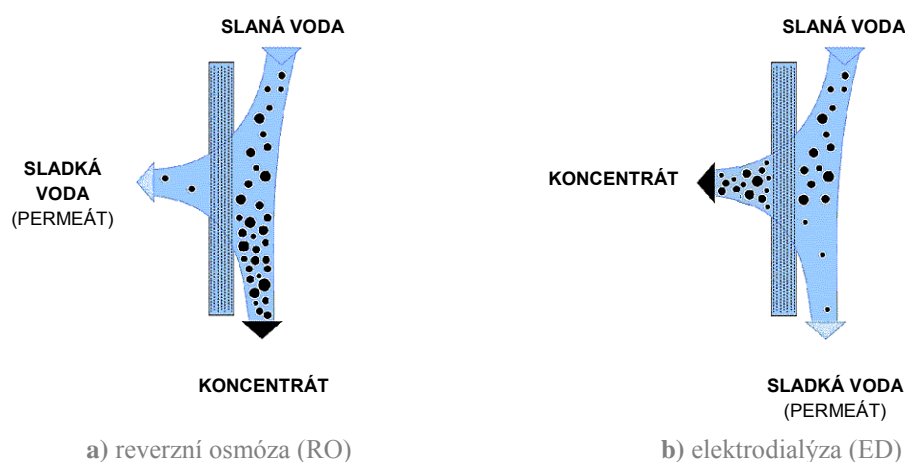
Membránová separace hraje v přírodě a v jejích procesech důležitou roli (proces dialýzy a osmózy se vyskytuje i v lidském těle) [6]. Membránová úprava vody je založena na použití fyzické bariéry – polopropustné membrány a hnací síly [39]. Hnací silou může být tlak a jeho gradient nebo rozdíl elektrického potenciálu.

Rozdílu elektrického potenciálu využívá elektrodialýza a tlakového gradientu reverzní osmóza [40].

Před použitím membránových metod je často potřeba napájecí vodu chemicky i mechanicky ošetřit tak, aby nedocházelo k zanášení povrchu membrán a jejich pórů. Chemické čištění slouží k prevenci biologického bujení a zanášení a mechanické čištění k separaci nerozpuštěných látek [40].

Komerčně nejpoužívanější membránové metody pro úpravu vody jsou elektrodialýza a reverzní osmóza [6]. Jejich princip je znázorněn na obr. 13. Obě metody používají membránu a jsou schopné oddělit rozpuštěné minerály a soli z napájecí vody.

U membránových procesů neprobíhá fázová přeměna ani není do systémů dodávána tepelná energie. Dodávanou energií je pouze elektrická energie.



Obr. 13 Znázornění principu membránové separace

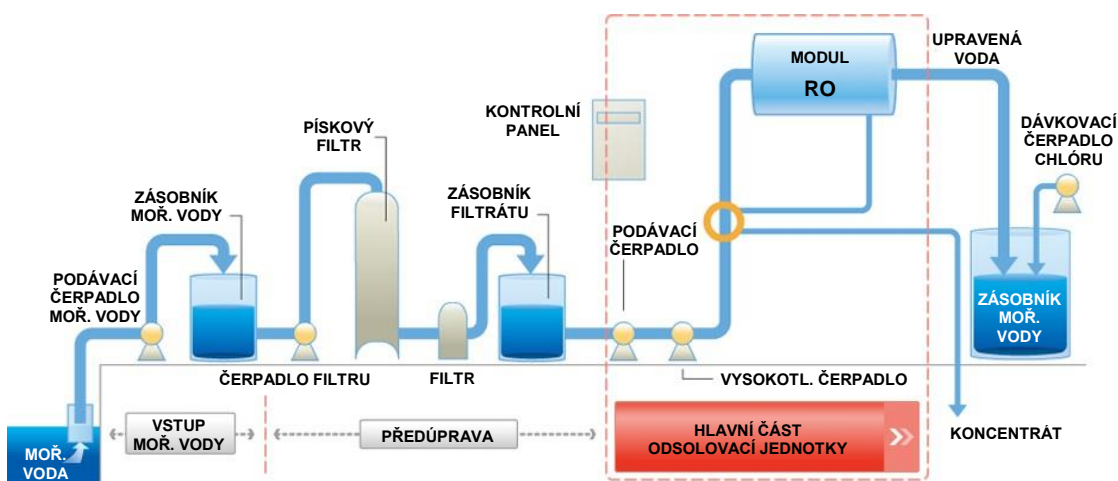
2.2.1 Reverzní osmóza

Reverzní osmóza (RO) je nejrozšířenějším membránovým procesem. Uplatnění nachází v 88 % všech aplikací membránových procesů [19]. Hnací silou procesu je hydraulický tlak a k separaci rozpuštěných látek dojde na částečně propustné membráně. Princip je tento: napájecí voda je přivedena vysokotlakým čerpadlem na polopropustnou membránu, která je uzavřena v tělese zařízení. Sladká voda (permeát) projde při procesu membránou, rozpuštěné látky membránou neprojdou a zbylý koncentrát je odveden ze zařízení. Hlavními prvky v sestavě RO je předúprava vody, čerpadla, membrány, výstupní úprava vody (viz obr. 14). Velikost tlaku dávaného čerpadly bývá v rozmezí 10 až 83 bar [40]. Kvalita sladké vody z metody úpravy reverzní osmózou je řádově nižší než u tepelných metod.

Membrány pro RO se většinou skládají z celulózových acetátů, polyamidů, polyetheramidů a polyethersulfanů. V současné době je nejrozšířenějším membránovým materiálem tenká vrstva kompozitního polymeru, jehož maticí je mikroporózní polysulfan, na němž je nanesená tenká vrstva polyamidu [41].

Mnohé z nejmodernějších jednotek pro RO jsou vybaveny systémem pro regeneraci energie. Koncentrát, který je odváděn ze zařízení, má velmi vysokou tlakovou energii, zatímco produkt ji má nízkou. Tlaková energie koncentrátu je u těchto moderních zařízení převedena do napájecí vody pomocí tlakových výměníků.

Naproti tomu obyčejná osmóza je proces, při kterém prostupuje rozpouštědlo (voda) přes polopropustnou membránu z prostoru s méně koncentrovaným roztokem do prostoru s více koncentrovaným roztokem. Polopropustná membrána je v tomto daném případě propustná pro rozpouštědlo a méně propustná nebo nepropustná pro rozpuštěné látky. V případě, že je membrána polopropustná, může s sebou rozpouštědlo přes membránu strhávat i molekuly rozpuštěných látek. Velikost osmózy je dána rozdílem osmotických tlaků. Příkladem osmózy je difuze [41].



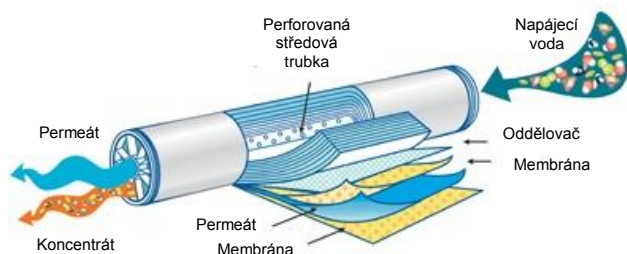
Obr. 14 Proces reverzní osmózy [42]

Podle [43] jsou v dnešní době nejpoužívanějšími materiály pro membrány RO acetát celulózy (CA) a polyamid (PA). Většina membrán je spirálově vinutá, avšak na trhu jsou dostupné i membrány s dutými vlákny. V případě spirálově vinutých trubíc jsou tenká membrána a distanční oddělovač navinuty okolo sběrné perforované trubice. Výsledný permeát je odváděn perforovanou trubicí a koncentrát je zachycen membránami. Spirálově vinuté membrány umožňují maximální proudění při minimálních rozměrech modulových trubíc. Nákres spirálové trubice je znázorněn na obr. 15.

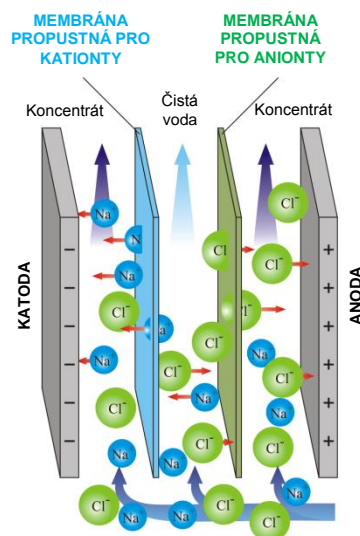
Trubice s dutými vlákny jsou tvořeny drobnými svazky kapilár, které jsou tenké jako např. lidský vlas. Ionty rozpuštěných solí se shromažďují na vnější straně kapilár, zatímco permeát proniká stěnami těchto vláken a shromažďuje se uprostřed těchto dutých vláken.

2.2.2 Elektrodialýza

Hnací silou elektrodialýzy a reverzní elektrodialýzy je rozdíl elektrických potenciálů stejnosměrného napětí, který přitahuje a pohybuje odlišné kationty (kladně nabitě ionty) nebo anionty (záporně nabitě ionty) přes propustnou membránu [44]. Na druhé straně membrány je již produktová voda. Kationty jsou přitahovány zápornou elektrodou a anionty kladnou elektrodou. Membrány mohou propustit kationty nebo anionty, avšak nikdy ne obojí. Ionty jsou atomy nebo molekuly, které mají kladný nebo záporný náboj. Nejběžnějšími molekulami slané vody jsou chloridy, uhličitany, sodík a vápník [44]. Princip separace rozpuštěných látek metodou elektrodialýzy je uveden na obr. 16.



Obr. 15 Řez vinuté trubice RO [45]



Obr. 16 Princip elektrodialýzy [46]

2.3 Hybridní metody

Hybridní metody integrují tepelné i membránové procesy za účelem zvýšení efektivnosti nebo snížení provozních nákladů [23]. Komerčně jsou využívány kombinace MSF-RO a ME-RO metod.

Ve světě se zřídka vyskytuje i spojení některé z tepelných nebo membránových metod s obnovitelnými zdroji energie. Obnovitelné zdroje energií (OZE) jsou v těchto případech zdrojem tepelné nebo elektrické energie. Metody využívající jako zdroj energie obnovitelné zdroje jsou však poměrně nákladné a mají význam pouze v těch lokalitách, kde není přístup ke konvenčním zdrojům energie (náklady na jednotku sladké vody jsou uvedeny v kap. 7.2.1).

Jedním z OZE je solární energie, kterou lze převést na nízkopotenciální tepelnou energii nebo elektrickou energii. Tyto energie následně mohou sloužit jako energie pro provoz některé z odsolovacích metod. Nejčastěji dochází k synergii s metodami ME nebo RO. Solární energii lze také převést na elektrickou pomocí fotovoltaických článků. Takto získaná energie může být následně použita pro napájení RO nebo ED jednotek.

V místech s dostatečným prouděním větru je možné využít větrných parků a jejich mechanickou energii transformovat na elektrickou, kterou lze napájet jednotky RO, ED nebo MVC.

Geotermální energie může být využita pro tepelné i membránové metody. Vysokotlaký geotermální zdroj může být zdrojem tlakové mechanické energie pro jednotky RO (popř. MVC) nebo lze tento vysokotlaký zdroj použít k výrobě elektrické energie, kterou lze posléze využít k napájení jednotek RO, ED a MVC. Nízkoteplotní zdroje geotermální energie lze použít jako zdroj tepla pro jednotky MSF, ME nebo TVC. Dle [47] bylo několik odsolovacích jednotek ME s geotermálním zdrojem energie vybudováno v USA, Řecku a Tunisu.

2.4 Ostatní metody

Kromě výše uvedených metod existuje mnoho dalších metod, které se však komerčně nerozšířily z důvodu nízkého stádia vývoje, vysoké ceny nebo malé kapacity. Níže je popsán princip několika ostatních metod.

2.4.1 Vymrazování

Základem vymrazování je krystalizace, která způsobuje čištění vody. Při snížení teploty solného roztoku se začnou z roztoku vylučovat krystaly sladké vody a sůl se koncentruje v nezamrzlé zbývající části roztoku. Zmrzlé krystaly vody jsou zachyceny, umyty, rozdrčeny a po jejich roztání je produktem sladká voda.

Výhodou metody vymražení je, že při tomto procesu je menší energetická náročnost než při odpařování. Nevýhodou je složité oddělování krystalů od koncentrátu. Metoda vymrazování se používá jen zřídka [38].

2.4.2 Iontová výměna

Proces iontové výměny odstraňuje z napájecí vody nevhodné ionty. K tomuto účelu se používají tzv. iontoměniče. Iontoměniče jsou polymerní materiály, které jsou na sebe schopné navázat kationty. K navázání kationtů se používá tzv. katex a k navázání aniontů anex. Metoda iontové výměny se v průmyslu používá hlavně ke změkčení a demineralizaci vody. Pro odsolení velkých množství vody se nepoužívá [41].

2.5 Porovnání metod odsolování

Z důvodu velkého množství metod pro úpravu mořské vody je potřeba metody zhodnotit. Komplexní porovnání však není snadné, protože velmi záleží na konkrétní aplikaci a dostupných druzích energií. Porovnání metod odsolování je provedeno např. v [22].

2.5.1 Hodnotící parametry

Hodnotící kritéria při posuzování a porovnávání metod odsolování lze rozdělit na ekonomická a technická. Jelikož se při odsolování mořské vody zpracovávají obrovské objemy, hraje velmi důležitou roli ekonomika celého procesu. Z pohledu ekonomiky jsou důležité pořizovací a provozní náklady. Mezi hlavní technická hodnotící kritéria při výběru odsolovacích zařízení pak patří [22]:

- kapacita zařízení (tj. produkce odsolené vody)
- spotřeba energií (tepelné a elektrické)
- požadovaná kvalita odsolené vody
- parametry surové vody
- dostupnost energií.

Další technická kritéria jsou:

- způsob nakládání s koncentrátem
- ekologická (např. dusíková stopa atd.)
- stavební omezení.

Z provozního pohledu se hodnotí především tyto parametry:

- výkonový poměr (produkce na jednotku spotřebované energie)
- stabilita a spolehlivost provozu
- provozní náklady.

Jak již bylo zmíněno, hodnocení procesů odsolování i jejich výběr závisí na mnoha faktorech, jako je slanost a kvalita napájecí vody, kapacita jednotky, místní podmínky, náklady na energii, provozní náklady a náklady na údržbu a dostupnost kvalifikovaných pracovních sil. Cena za energii tvoří největší část celkových výrobních nákladů na sladkou vodu. U tepelných destilačních metod je to cca 60 % a u metody reverzní osmózy cca 45 % [47]. Porovnání vybraných metod odsolování, z technického pohledu, je přehledně uvedeno v tab. 8 a ekonomické porovnání je podrobně diskutováno v kap. 7.2.

Tepelné destilační procesy mají několik výhod oproti membránovým procesům. Patří mezi ně lepší kvalita vyráběné sladké vody, menší citlivost na změny kvality napájecí vody a není u nich potřeba pravidelně měnit membrány.

Výhody membránových procesů spočívají v nižších investičních nákladech, lepšímu poměru kapacity jednotky na m² zastavěné plochy, procesní modularitě, menší náchylnosti ke korozi a zanášení díky provozu za nízkých teplot. Za normálních okolností jsou výrobní náklady sladké vody procesem RO nižší než u některých z destilačních procesů. To však neplatí při provozu na odpadní teplo nebo v kogeneračních aplikacích, kde je užitkována odpadní energie z různých procesů nebo nízkotlaká pára získaná z výstupu parních protitlakých turbín. Při potřebě odsolování brakických vod se slaností < 5000 ppm je vhodnější použití ED než RO, zatímco u slaností nad 5000 ppm je vhodnější volbou RO [47]. Jednotka RO je znázorněna na obr. 17.

Obnovitelné zdroje, jako je solární tepelná energie, solární fotovoltaická energie, vítr, a propojení jiných obnovitelných zdrojů s odsolovacími procesy vyžadují uvážení široké škály faktorů. Výrobní náklady těchto systémů jsou v současné době velmi vysoké [47]. Vzhledem k těmto vysokým investičním nákladům jsou odsolovací procesy využívající obnovitelné zdroje energie v současné době ekonomické jen v odlehlých oblastech, které nemají přístup ke konvenčním zdrojům energií.



Obr. 17 Jednotka RO menšího výkonu [48]

Tab. 8 Porovnání charakteristických vlastností jednotlivých procesů odsolování [19]

Proces	Salinita [mg/l]	Výhody	Nevýhody
MSF	< 10	<ul style="list-style-type: none"> • Umožňuje výstavbu velkých kapacit • Osvědčená, spolehlivá technologie s dlouhou provozní životností • Menší náchylnost k zanášení teplosměnných ploch díky mžikovému odpařování a nikoliv varu v trubkách • Minimální požadavek na předúpravu napájecí vody • Vysoká kvalita destilátu • Provozní režim jednotky i její investiční náklady nejsou závislé na salinitě napájecí vody • Tepelná energie může být získána kombinací s výrobou el. energie 	<ul style="list-style-type: none"> • Energeticky náročný proces • Vysoké investiční náklady • Prostorová náročnost • Problémy s korozí, pokud jsou použity méně kvalitní materiály • Relativně pomalé uvedení do provozu • Při údržbě je nutné odstavení jednotky • Vyžaduje vysokou úroveň odborných znalostí personálu
ME	< 10	<ul style="list-style-type: none"> • Ekonomicky výhodné u jednotek o velkých kapacitách • Minimální požadavek na předúpravu napájecí vody • Velmi spolehlivý proces s minimálními požadavky na obsluhu • Toleruje normální množství suspendovaných a biologických částic • Tepelná energie může být získána kombinací s výrobou el. energie • Velmi kvalitní destilát 	<ul style="list-style-type: none"> • Vysoká spotřeba energie • Vysoké investiční a provozní náklady • Požadavek na vysoce kvalitní materiály odolné proti korozi
VC	< 10	<ul style="list-style-type: none"> • Velmi nízká spotřeba chemikálií • Ekonomické pro napájecí vody s vysokým rozpuštěných látek (> 50 000 mg/l) • Ekonomicky výhodné u malých jednotek (s kapacitou < 10 000 m³/den) • Relativně nízké požadavky na energii • Menší požadavky na redukci teploty TBT z důvodu prevence zanášení a koroze • Nižší investiční a provozní náklady • Přenosné zařízení umožňující flexibilitu • Schopnost rychle se přizpůsobit změnám průtoku 	<ul style="list-style-type: none"> • Omezení pro malé velikosti jednotek • Při uvádění do provozu vyžaduje pomocný zdroj tepla pro produkci páry • Potřeba časté a kvalitní údržby kompresoru
RO	400 ÷ 500	<ul style="list-style-type: none"> • Nižší spotřeba energie • Relativně nízké investiční náklady • Jednoduchý provoz a rychlý start • Není potřeba chladicí voda • Vysoká kapacita na jednotku zastavěné plochy • Odstranění i jiných nečistot než pouze solí • Modularita • Při údržbě nevyžaduje odstavení z provozu • Spotřebovaná energie odpovídá množství odstraněných solí (nikoliv průtočným množstvím) • Pracuje se středními tlaky 	<ul style="list-style-type: none"> • Vyšší náklady na výměnu membrán a použití chemikálií • Náchylnost na změny parametrů napájecí vody • Nezbytnost vhodné předúpravy vody • Citlivost membrán na biologické znečištění • Možnost mechanických poruch z důvodu provozu za vysokých tlaků • Doporučuje se vhodné vyškolení provozního personálu • Životnost membrán kolem 5-7 let
ED	150 ÷ 500	<ul style="list-style-type: none"> • Spotřebovaná energie odpovídá množství odstraněných solí (nikoliv průtočným množstvím) • Pracuje se středními tlaky 	<ul style="list-style-type: none"> • Vhodné pouze do obsahu rozpuštěných látek < 12 000 mg/l • Požadavek pravidelného čištění membrán • Předúprava i pouprava procesu neodstraní bakteriální nečistoty

2.5.2 Porovnání tepelných metod

Tepelné metody odsolování byly do nedávna použity u téměř poloviny všech odsolovacích kapacit ve světě [30]. Aktuální zastoupení tepelných metod je zobrazeno již dříve na obr. 5. V porovnání s ostatními metodami odsolování mají metody založené na principu destilace nejlepší parametry odsolené vody.

Obecné výhody a nevýhody tepelných metod odsolování jsou shrnuty v tab. 8. Jejich ekonomické ukazatele jsou podrobně uvedeny v kap. 7.2. Tato práce je zaměřená primárně na metodu MSF a částečně také na ME pro jednotky malých a středních rozsahů. Při porovnání těchto dvou metod je výhodou metody MSF malá tvorba vodního kamene, jelikož v trubkách proudí neustále dané množství vody a k odpařování dochází v odpařovacích komorách. Nevýhodou jsou velké průtočné množství chladicí vody a tím způsobená poměrně značná tlaková ztráta při průchodu napájecí vody trubkami a obrátovými komorami kondenzátorů. U metody ME jsou tyto uvedené vlastnosti opačné.

2.5.3 Porovnání membránových metod

Na trhu je celá řada membránových metod pro úpravu mořské vody. Jejich přehledný výčet a souhrn vlastností každé z nich jsou uvedeny v tab. 9.

Tab. 9 Vlastnosti membránových procesů úpravy vody [49]

Membránový proces	Membránová hnací síla	Typický mechanismus separace	Provozní struktura (velikost pórů)	Typický provozní rozsah [μm]	Popis permeátu	Typické odstraněné složky
Mikrofiltrace	Rozdíl hydrostat. tlaku / podtlak v otevřených nádobách	Síto	Makropóry (> 50nm)	0,08 ÷ 2,0	Voda + rozpuštěné látky	TSS, zákal, vajíčka prvoků a cyst, některé bakterie a viry
Ultrafiltrace	Rozdíl hydrostat. tlaku	Síto	Mezopóry (2÷50 nm)	0,005 ÷ 0,2	Voda + malé molekuly	Makromolekuly, koloidy, většina bakterií, některé viry, proteiny
Nanofiltrace	Rozdíl hydrostat. tlaku	Síto + rozpouštění / difuze + vyloučení	Mikropóry (< 2 nm)	0,001 ÷ 0,01	Voda + velmi malé molekuly, iontové rozpuštěné látky	Malé molekuly, některá tvrdost, viry
Reverzní osmóza	Rozdíl hydrostat. tlaku	Rozpouštění / difuze + vyloučení	Jemné mikropóry (< 2 nm)	0,0001 ÷ 0,001	Voda + velmi malé molekuly, iontové rozpuštěné látky	Velmi malé molekuly, barva, tvrdost, sírany, dusičnany, sůl a jiné ionty
Dialýza	Rozdíl koncentrací	Difuze	Mezopóry (2÷50 nm)	-	Voda + malé molekuly	Makromolekuly, koloidy, většina bakterií, některé viry, proteiny
Elektrodialýza	Rozdíl el. potenciálu	Iontová výměna s určitou membránou	Mikropóry (< 2 nm)	-	Voda + iontové rozpuštěné látky	Ionizované soli iontů

2.6 Úprava vody

Napájecí slanou vodu i výslednou sladkou vodu je většinou potřeba upravit dle konkrétních parametrů zdrojové napájecí vody a požadavků na výslednou sladkou vodu (popř. pitnou vodu). V následujících odstavcích je uveden přehled způsobů pro úpravu sladké vody.

2.6.1 Příprava

Každá odsolovací technologie má odlišné požadavky na vlastnosti a kvalitu vstupující vody. Příprava surové vody zajistí, že složky, které jsou v ní přítomné, nebudou mít za následek ztrátu nebo snížení výkonu, popř. poškození dané jednotky.

U tepelných metod odsolování se předúpravou napájecí vody předchází těmto rizikovým faktorům:

- zanášení teplosměnných ploch výměníků tepla/kondenzátorů
- korozi částí zařízení
- erozi obsaženými látkami
- důsledkům dalších přítomných složek.

U membránových metod odsolování se vyskytují tyto rizikové faktory [37]:

- mechanické zanášení membrán
- mechanické ucpání membrán
- biologické zanášení nebo poškození membrán
- degradace membrány oxidací nebo jinými důvody.

2.6.2 Konečná úprava

Konečná úprava sladké vody (destilátu) slouží k její přípravě pro konkrétní koncový účel. Většinou se vyrábí z odsolené vody pitná voda nebo se připravuje pro konkrétní průmyslové použití. Vodu pro pitné účely je potřeba dezinfikovat, dodat potřebné chloridy, popř. ji obohatit o potřebné minerály.

Obsah rozpuštěných látek ve sladké vodě po odsolení bývá velmi malý. Po úpravě vody tepelnými procesy je zbytkový obsah rozpuštěných látek 0,5 až 50 ppm (resp. mg/l) a po úpravě membránovými procesy je to 25 až 500 ppm [37].

Výsledná sladká voda (destilát) se vyznačuje nízkým obsahem minerálů a nedostatkem stabilizačních prvků (např. vápník a bikarbonáty). Zároveň je také agresivní a nestabilní [50]. Pokud není stabilizována dodáním potřebných látek nebo antikoročních inhibitorů, má schopnost se sama stabilizovat, a to např. korodováním materiálů, se kterými je ve styku. Další příčiny způsobující korozi materiálů mohou být:

- vysoká teplota
- nízký obsah křemičitanů
- vysoký obsah kyslíku
- volný CO₂
- malý poměr alkality k obsahu chloridů a sulfanů.

Kvalitní sladká voda bez korozivních účinků by měla mít tyto vlastnosti:

- tvrdost >40 mg/l (CaCO_3)
- zásaditost >40 mg/l (CaCO_3)
- konečné pH 8,0 až 9,0.

Pro použití destilované vody k pitným účelům je potřeba ji remineralizovat (tj. dodat potřebné minerály, které v ní po odsolení nejsou obsaženy). O úpravě odsolené vody na pitnou pojednává další odstavec.

Remineralizace

Sladká voda (výsledný destilát) z odsolovacích stanic je charakteristická nízkým obsahem minerálů i nízkou tvrdostí, alkalitou a pH. Proto je nutné tuto vodu před distribucí a následným použitím upravit (tzv. remineralizovat). Typické cíle remineralizace jsou [50]:

- poskytnout ochranu distribuční síti před korozi
- dodat základní minerály, které jsou potřeba pro lidské tělo v případě využití odsolené vody pro pitné účely i pro ostatní účely použití odsolené vody.

Chemikálie obsahující vápník (např. vápno, vápenec, chlornan vápenatý) nebo vápník i hořčík (např. dolomit) jsou typickými představiteli aditiv, kterými je obohacena odsolená mořská voda. Obvykle dávkované množství se pohybuje v rozmezí 60 až 120 mg/l (ekvivalent CaCO_3) pro zajištění zdraví obyvatel i ochraně vodovodních řádů. Tyto chemikálie dodávají do odsolené vody uhličitán vápenatý nebo jeho kombinaci s uhličitánem hořečnatým [50]. Obohacená voda následně zapříčiní žádané přiměřené zanesení vnitřních ploch potrubí, které tvoří jeho fyzickou ochranu před korozi. Distribuce odsolené vody s uvedenými chemikáliemi, jež chrání potrubí vytvořením tenkého filmu na jeho povrchu, následně zvyšuje její tvrdost, a proto se často o tomto procesu hovoří jako o „přidávání tvrdosti“.

Typické remineralizace odsolené vody bývá dosaženo těmito způsoby [50]:

- přímým dávkováním chemikálií obsahujících vápník (např. hydroxid vápenatý, vápno) a hořčík (např. chlorid hořečnatý, síran)
- mísením odsolené vody s určitým množstvím neodsolené nebo sladké vody s vysokým obsahem vápníku a hořčíku
- procesem, při kterém je hořčík a/nebo vápník přidáván rozpuštěním přirozeně se vyskytujících minerálů jako je vápenec (uhličitán vápenatý, kalcit) nebo dolomit (vápník a uhličitán vápenatý).

Následující kapitola se zabývá základním návrhem MSF jednotek, jejich jednotlivých komponent a zařízení.

3 ZÁKLADNÍ NÁVRH MSF JEDNOTKY

Obsahem této kapitoly je základní návrh odsolovací jednotky MSF, popis možností jejího zapojení a výčet jednotlivých komponent, ze které se jednotka skládá.

Vícestupňová destilace metodou MSF skýtá velký prostor pro mnohá vylepšení a další vývoj. Tato práce je zaměřena na vývoj modulového zařízení pro úpravu mořské vody. Modularita spočívá v možnosti spojování několika jednotek za sebe, což přináší výrobcům i uživatelům řadu výhod. Výhody modularity pro výrobce jsou:

- menší počet variant výrobků – odpadá nutnost návrhu zařízení pro konkrétní aplikaci
- sériovost výroby komponent – s vyšším počtem vyrobených výrobků stejného druhu klesá výrobní cena tohoto výrobku.

Z výše uvedených důvodů je výrobek na trhu konkurenceschopnější. Pro zákazníka (koncového spotřebitele) modularita přináší tyto výhody:

- příznivá pořizovací cena
- možnost dodatečného vylepšení parametrů zařízení (dokoupení dalších modulů)
- dostupnost a příznivá cena náhradních dílů.

3.1 Koncepce návrhu

Na trhu dostupné MSF jednotky mají 2 až 30 stupňů. Navrhované jednotky, které jsou předmětem této práce, jsou navrženy od 4 stupňových po 24 stupňové. Každý stupeň obsahuje odpařovací komoru (vařák), odlučovač kapek a kondenzátor. Výchozí koncepce vývoje MSF jednotky vychází z toho, že každý modul vyvíjené jednotky obsahuje 4 stupně. Moduly je možno skládat za sebe. Z toho vyplývá, že každá výsledná jednotka obsahuje takový počet stupňů, který odpovídá násobku čtyř. Nejmenší jednotka skládající se z jednoho modulu tak obsahuje 4 stupně. Největší jednotka skládající se z šesti modulů pak obsahuje 24 stupňů. Volba ideálního počtu modulů, ze kterých se zařízení skládá, záleží na několika faktorech. Z nich nejpodstatnější jsou celkové náklady sestávající se z pořizovacích a provozních nákladů. Počet stupňů zařízení má vliv na jeho energetickou náročnost a celkovou produkci. Se vzrůstajícím počtem stupňů zařízení:

- razantně klesá energetická náročnost, tj. provozní náklady
- mírně roste produkce
- rostou investiční náklady.

Z toho je zřejmé, že lze pro konkrétní lokalitu (charakterizovanou danými cenovými relacemi energií) nalézt z bilance pořizovacích a provozních nákladů takový počet stupňů, pro nějž jsou celkové náklady minimální.

V trubkách kondenzátorů posledních 2 až 3 stupňů MSF zařízení proudí velmi často chladicí voda a nikoliv napájecí voda, která by byla přehřátá

odevzaným teplem par při kondenzaci. S koncentrátem vystupujícím ze zařízení lze nakládat dvěma způsoby:

- bez dalšího použití jej lze odvést ze zařízení
- určitou část použít k recirkulaci.

Z výše uvedených možností nakládání s koncentrátem je vhodnější jej recirkulovat z důvodu úspor použitých chemikálií i dosažení vyššího výkonového poměru celé jednotky. O možnostech zapojení MSF jednotek a jejich proudů pojednává podrobně následující kapitola.

Koncepce návrhu MSF jednotek se dělí z pohledu zapojení jednotlivých okruhů jednotky v místě instalace na tyto tři hlavní možnosti [51]:

- bez recirkulace (angl. *Once Through* – OT)
- s recirkulací a se sekci s využitím kondenzačního tepla v páře
- s recirkulací a bez sekce s využitím kondenzačního tepla v páře.

3.1.1 Zapojení okruhu jednotky a recirkulace koncentrátu

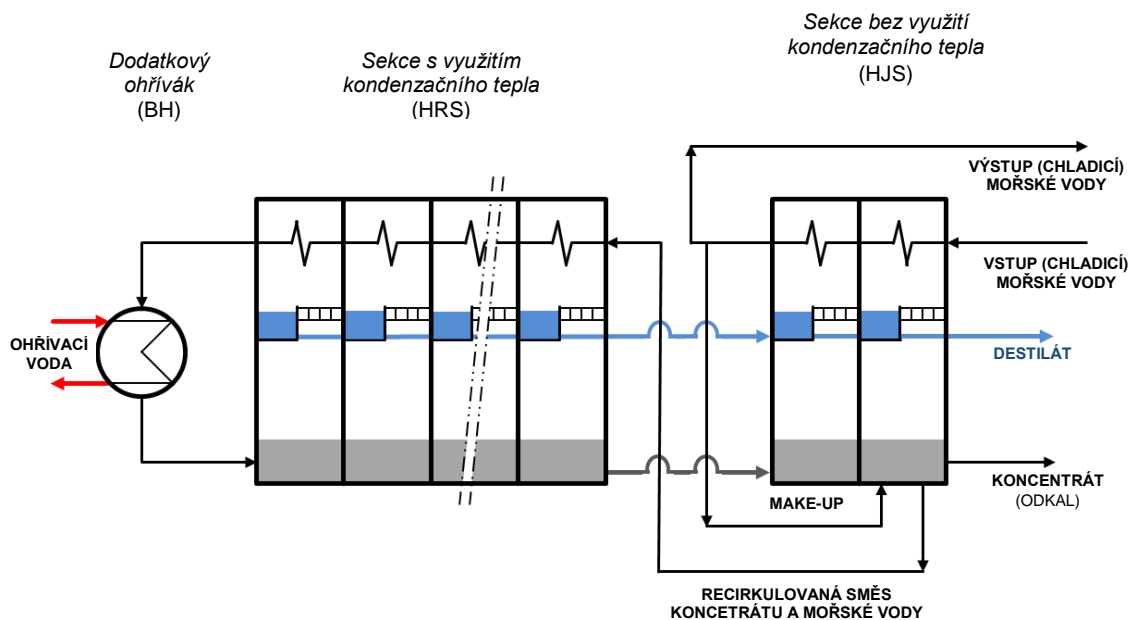
Jak již bylo zmíněno, lze zvolit zapojení s recirkulací nebo bez recirkulace výstupního koncentrátu.

Zapojení s recirkulací přináší vyšší efektivitu celého procesu. Další možností zapojení je přivedení separátní chladicí mořské vody do posledních stupňů, které zvýší rovněž efektivitu celého procesu. Stupně, jejichž kondenzátory protéká separátní chladicí voda, se nazývají sekci bez využití latentního tepla kondenzace. Pro účely této práce bylo zavedeno pojmenování: *sekce bez využití kondenzačního tepla* s ohledem na anglické pojmenování *Heat Rejection Section* (HJS). Zapojení MSF jednotky s recirkulací výstupního koncentrátu a HJS sekci je znázorněno na obr. 18. Tuto jednotku lze následně rozdělit na tyto tři hlavní části:

- dodatkový ohřívák (angl. *Brine Heater* – BH)
- odpařovací sekce s využitím kondenzačního tepla (angl. *Heat Recovery Section* – HRS)
 - první odpařovací stupeň
 - druhý až předposlední odpařovací stupeň
 - poslední odpařovací stupeň
- odpařovací sekce bez využití kondenzačního tepla (angl. *Heat Rejection Section* – HJS).

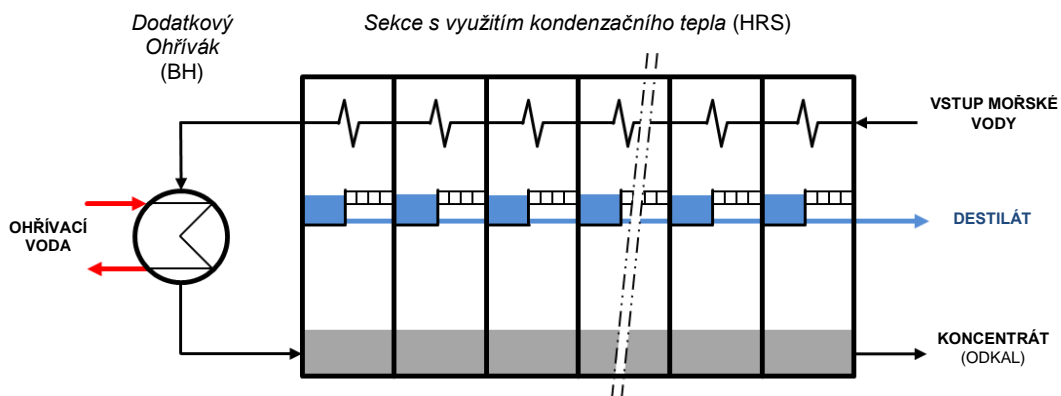
V uvedeném zapojení na obr. 18 prochází napájecí slaná voda nejprve částí bez využití kondenzačního tepla (HJS). Tím je myšleno, že latentní teplo kondenzace uvolněné při kondenzaci par destilátu není využito pro ohřev napájecí slané vody. Toto teplo přestupuje do chladicí vody, která je po průchodu touto částí (tj. posledními 2-3 kondenzátory) z majoritní části odváděna zpět do moře. Jen malá část tohoto proudu (tzv. doplňovací voda, angl. *make-up*) je použita k doplnění potřebného množství průtočného objemu jednotkou (tj. do HRS sekce). Napájecí voda, která je tvořena směsí větší části výstupního koncentrátu z posledního stupně a menší části doplňkové vody (*make-up*), je přivedena do části s využitím kondenzačního tepla (HRS). V této části je směs recirkulovaného koncentrátu a doplňovací vody ohřívána díky přijatému kondenzačnímu teplu z par každého HRS

stupně. Dále tato směs vstupuje do dodatkového ohříváku, kde je ohřáta na požadovanou teplotu (tj. teplotu nástřiku – angl. *Top Brine Temperature* – TBT) odpovídající teplotě sytosti při daném tlaku. Ohřátá směs z dodatkového ohříváku vstupuje do první odpařovací komory, kde dochází k odpařování, které je detailně popsáno v kap. 2.1.1.

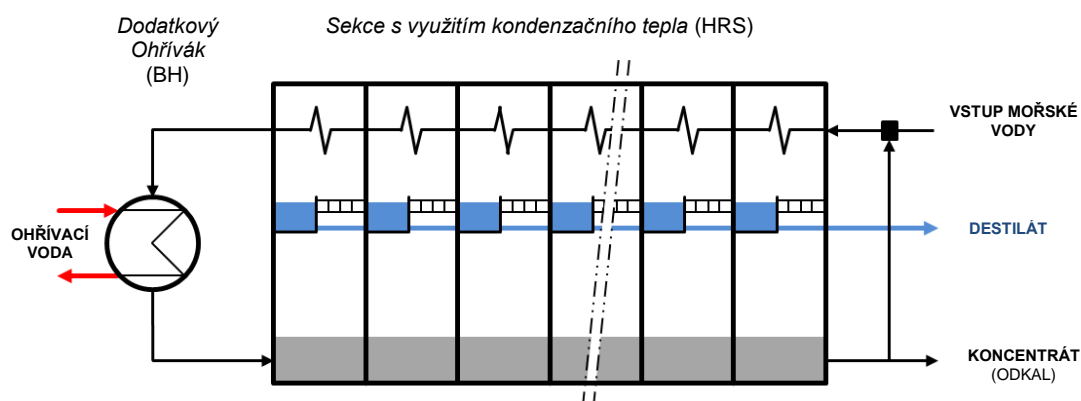


Obr. 18 Obecné schéma MSF jednotky s recirkulací a HJS

Schéma na obr. 19 ukazuje zapojení MSF jednotky bez recirkulace a bez sekce HJS (tzv. jednorůčkové nebo jednorůchodové zapojení, angl. *Once Through*). Celková výměna tepla je v tomto zapojení dosažena teplotními rozdíly mezi vstupující napájecí slanou vodou a vystupujícím koncentrátem a destilátem. U jednotek bez recirkulace není žádné množství výstupního koncentrátu přivedeno zpět do procesu a všechny koncentrát je odveden zpět do moře. Tento odváděný koncentrát je označován jako „odkal“. Schéma na obr. 20 zobrazuje zapojení s recirkulací a bez HJS. V tomto zapojení nejsou poslední 2 až 3 stupně vybaveny separátní chladicí vodou.



Obr. 19 Obecné schéma MSF jednotky bez recirkulace a HJS



Obr. 20 Obecné schéma MSF jednotky s recirkulací a bez HJS

Shrnutí koncepcí zapojení MSF jednotek:

V následujících odstavcích jsou shrnuty aspekty jednotlivých možných zapojení jednotek MSF [51]. Přehledné shrnutí a výčet kladů i záporů jednotlivých možností zapojení je provedeno na obr. 21.

Jednostupňová MSF jednotka (viz obr. 23) není prakticky využitelná pro odsolování mořské vody, protože se vyznačuje velmi vysokou energetickou náročností a její výkonový poměr je < 1 . Specifická spotřeba energie takového systému je tedy velmi vysoká. Také výkon čerpadel pro sání napájecí mořské vody je poměrně vysoký, vzhledem k jejímu velkému množství ve srovnání s generovaným množstvím destilátu. Tyto dva problémy se vyskytují i v zapojení bez využití kondenzačního tepla v páře v modifikacích bez recirkulace i vč. recirkulace.

Jednoprůtočné (OT) zapojení MSF jednotek (viz obr. 19) řeší problém s nízkým výkonovým poměrem, který se vyskytoval u jednostupňové jednotky. Neřeší však problém s potřebnými velkými průtočnými objemy jednotkou. Zdánlivým řešením tohoto problému je v recirkulaci části výstupního koncentráту a vytvoření směsi recirkulovaného koncentráту s napájecí slanou vodou.

Zapojení s jednoduchým směřováním výstupního koncentráту s napájecí vodou (viz obr. 20) zlepšuje výkonový poměr jednotky (je definovaný později v kap. 3.7). Nicméně, i v tomto zapojení se vyskytují některé provozní problémy (např. vysoký poměr recirkulovaného koncentráту a následná vysoká salinita vstupní napájecí vody do jednotky).

V zapojení se stupni bez využití kondenzačního tepla (HJS) musí být vstupující napájecí voda ohřata na stejnou teplotu, jakou má výstupní koncentrát v posledním stupni. To je nezbytné pro předcházení teplotního šoku při smíchání obou proudů v posledním stupni. Teplotní šok způsobuje rozklad hydrogenuhličitanových solí a tvorbu sraženin uhličitanu a oxidu uhličitého. Vzniklé plyny snižují účinnost přestupu tepla ve svazku trubek kondenzátoru a má neblahé účinky na použité ejektory.

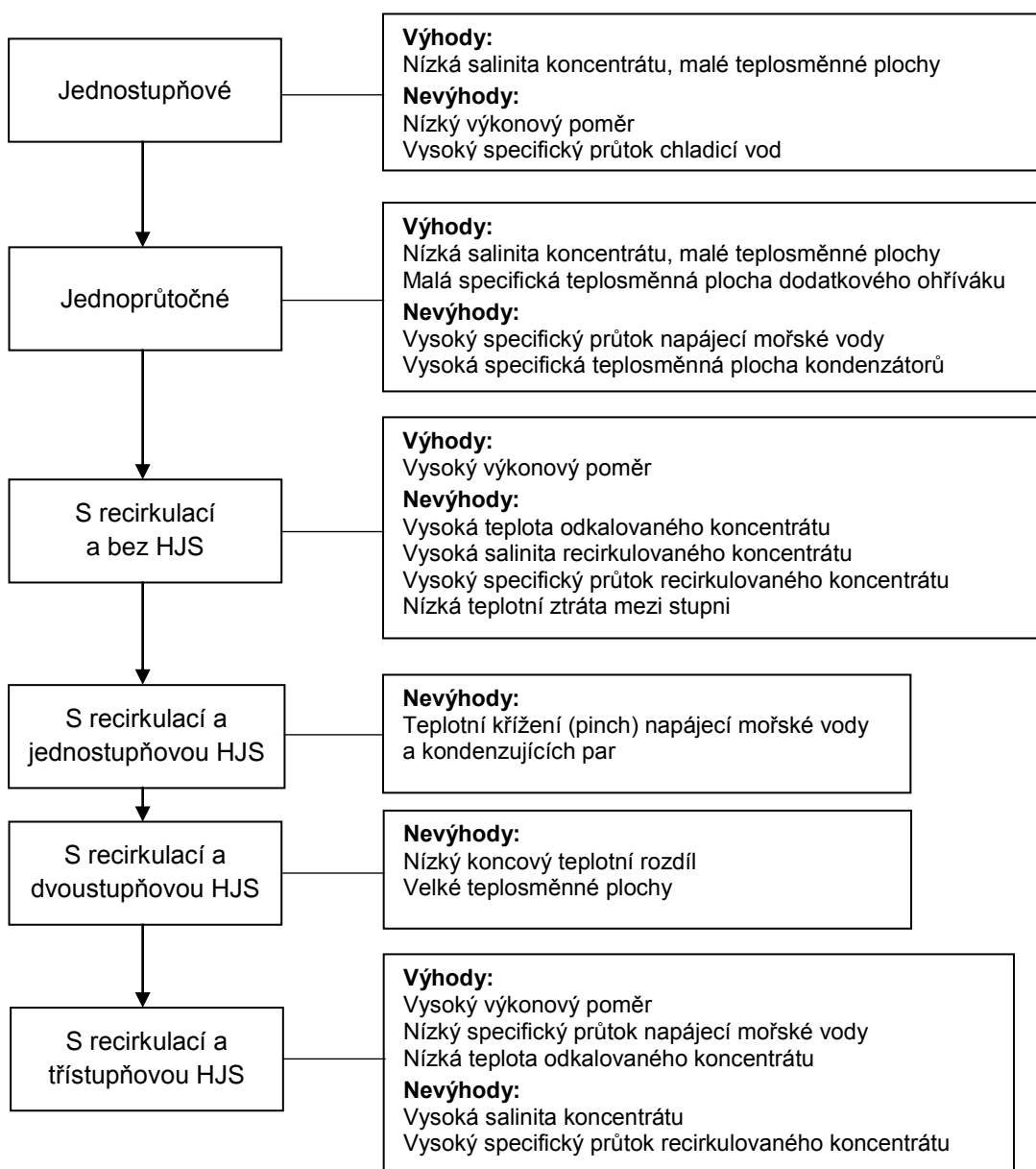
Použití jednostupňové HJS sekce není prakticky možné, protože dochází ke křížení teplotních profilů teplých a studených proudů v trubkách použitých kondenzátorů.

Použití dvoustupňové HJS sekce není praktické z důvodu nízkého koncového teplotního rozdílu nacházejícího se v první odpařovací komoře. Tato hodnota je

mnohem nižší než limitní hodnoty, které umožňují stabilní provoz. Pokud však obsahuje celá jednotka pouze 4 stupně, jsou jako HJS zapojeny právě poslední 2 stupně.

Použitím třístupňové HJS sekce umožňuje zajištění požadovaného vysokého výkonového poměru, salinitu recirkulovaného i odkalovaného koncentrátu a také vhodné hodnoty potřebného průtoku chladicí vody a specifické teplosměnné plochy.

Výkon všech zapojení MSF jednotek zvyšuje počet použitých stupňů a vyšší teplota TBT. Tyto vlastnosti se projeví zvýšením výkonového poměru, specifické teplosměnné plochy a snížením specifického průtoku chladicí vody. Vyšší výkonový poměr a nižší průtok chladicí vody přináší nižší provozní náklady. Nicméně vyšší počet stupňů jednotky je spojen s vyššími investičními náklady i většími teplosměnnými plochami, které zvyšují i náklady na údržbu.



Obr. 21 Grafické shrnutí různých zapojení jednotek MSF [51]

3.2 Postup návrhu

Hlavní návrhové kritérium pro výpočet MSF zařízení je potřebná kapacita celé odsolovací jednotky, tj. požadovaná produkce odsolené vody za určenou časovou jednotku. Výchozí návrh jednotky lze provést na základě tepelně-hydraulického výpočtu několika způsoby.

Prvním způsobem je sestavení a aplikace základního (globálního) projekčně analytického výpočtu respektujícího základní principy proudění kapalin a plynů i principy přenosu tepla.

Druhým způsobem je využití sofistikovaných výpočtových nástrojů, které využívají různé simulační programy. Simulační programy jsou však v drtivé většině určeny pro bilanční anebo kontrolní tepelný výpočet daného konkrétního geometrického provedení jednotky, a neumožňují navrhnout nekonvekční geometrii odsolovacího zařízení.

Protože výrobce vyvíjeného zařízení nemá k dispozici potřebné softwarové vybavení, byl po dohodě s ním základní návrh MSF jednotky řešen prvním způsobem, tj. bylo zapotřebí sestavit návrhový výpočet zařízení, kterému dostačuje poměrně málo vstupních údajů a který sestaven z nevelkého množství rovnic. Tímto výpočtem lze také dosáhnout výchozího návrhu geometrie stěžejních částí jednotky.

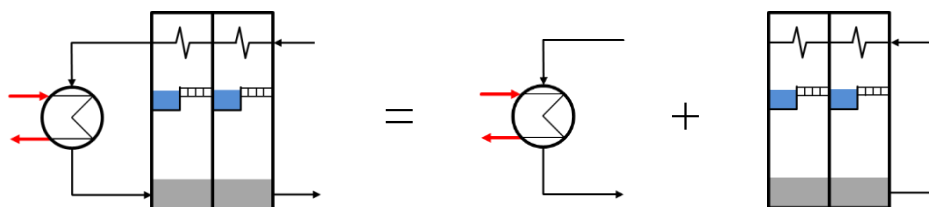
3.2.1 Výpočetní bloky jednotky

Obecně je k provedení tepelného výpočtu (resp. návrhu) nezbytné rozdělit MSF jednotku na několik výpočetních bloků (viz obr. 22). Jak již bylo uvedeno v kap. 3.1.1, jednotku MSF lze rozdělit do těchto tří základních bloků:

- dodatkový ohřívák (BH)
- odpařovací sekce s využitím kondenzačního tepla (HRS)
 - první odpařovací stupeň
 - druhý až předposlední odpařovací stupeň
 - poslední odpařovací stupeň
- odpařovací sekce bez využití kondenzačního tepla (HJS).

K provedení výchozího základního návrhu lze jednotku (v provedení dle obr. 22) pro výpočtové potřeby rozdělit na tyto části:

- dodatkový ohřívák
- odpařovací sekce s využitím kondenzačního tepla.



Obr. 22 Rozdělení jednotky pro potřeby základního tepelného návrhu

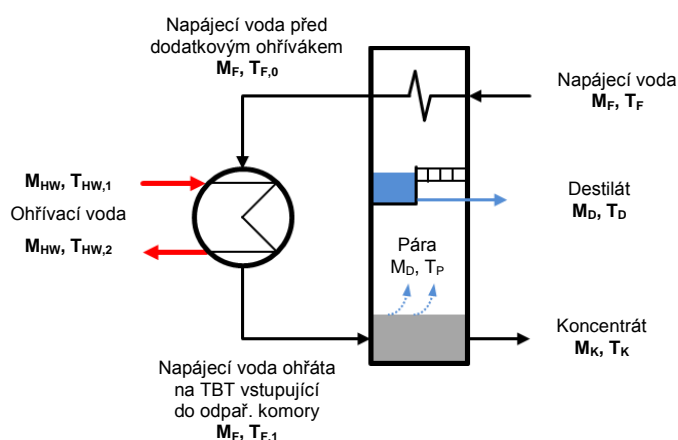
3.3 Návrhový tepelný výpočet

Výchozí i detailní návrhový výpočet jednotky pro úpravu mořské vody vyžaduje obsáhlé znalosti z oblasti systémů výměny tepla i značné know-how z konstrukce a provozu těchto zařízení.

3.3.1 Základní bilanční výpočet jednostupňové MSF jednotky

Průmyslové použití jednostupňové jednotky nemá v praxi význam, jelikož je její výkonový poměr velmi malý. Pro pochopení a matematické popsání procesu MSF je velmi vhodné tuto problematiku jednostupňové jednotky nastínit.

Modelování a analýza odparky může být založena na řešení soustavy rovnic, které využívají řadu korelací k určení součinitele prostupu tepla, termodynamických ztrát a fyzikálních vlastností vody a páry. Řešení pomocí detailního modelu vyžaduje iterační postupy z důvodu nelinearity použitých rovnic a příslušných korelací. Tento model lze zjednodušit za předpokladu konstantních fyzikálních vlastností, zanedbání tepelných ztrát do okolí, konstantních termo-dynamických ztrát a konstantní hodnoty součinitele prostupu tepla. Tyto předpoklady redukuje model MSF jednotky na soubor bilančních (hmotnostních a energetických) rovnic, které mohou být použity pro návrhy zařízení nebo jejich simulaci [52]. Na obr. 23 je znázorněna jednostupňová MSF jednotka vč. popisu jejich proudů a na obr. 24 vícestupňová jednotka.



Obr. 23 Bilanční znázornění jednostupňové MSF jednotky

Energetická bilance jednostupňové jednotky je:

$$M_{HW}c_P(T_{HW,1} - T_{HW,2}) = M_D l_V + M_F c_P(T_{F,0} - T_K) \quad (1)$$

Levá strana rovnice definuje tepelný tok dodaný v topném médiu, pravá strana udává latentní teplo vytvořené páry a přijaté teplo napájecí mořskou vodou. Tepelný tok dodaný v topné vodě se také používá k určení teplosměnných ploch dodatkového ohříváku. Tento vztah lze zapsat:

$$A_{DO} = \frac{M_{HW}c_P(T_{HW,1} - T_{HW,2})}{U_{DO}(T_{F,1} - T_{F,0})} \quad (2)$$

Podobnou soustavu rovnic lze definovat i pro kondenzátor. Ta obsahuje energetickou bilanci kondenzátoru a rovnici přenosu tepla:

$$M_D l_C = M_F c_P (T_{F,0} - T_F) \quad (3)$$

$$A_C = \frac{M_D l_C}{U_C \Delta T_{LMTDC}} \quad (4)$$

V rovnici (4) je pro střední logaritmický teplotní spád ($\Delta T_{LM,K}$) použit následující vztah:

$$\Delta T_{LMTDC} = \frac{T_{F,0} - T_F}{\ln \frac{T_D - T_{F,0}}{T_D - T_F}} \quad (5)$$

Z důvodu termodynamických ztrát je teplota destilátu T_D nepatrně nižší než teplota koncentrátu. Následující rovnice modelu definují celkovou hmotnostní bilanci a hmotnostní bilanci solí v celém systému:

$$M_F = M_D + M_K \quad (6)$$

$$S_F M_F = S_K M_K \quad (7)$$

Mezi další důležité konstrukční aspekty patří rychlost proudění vody v trubkách kondenzátoru, rychlost proudění ohřívací vody v dodatkovém ohříváku [53]. Rychlost proudění vody v kondenzátoru je dána vztahem:

$$v_C = \frac{M_F}{n_C \cdot \rho_F \cdot \frac{\pi d_C^2}{4}} \quad (8)$$

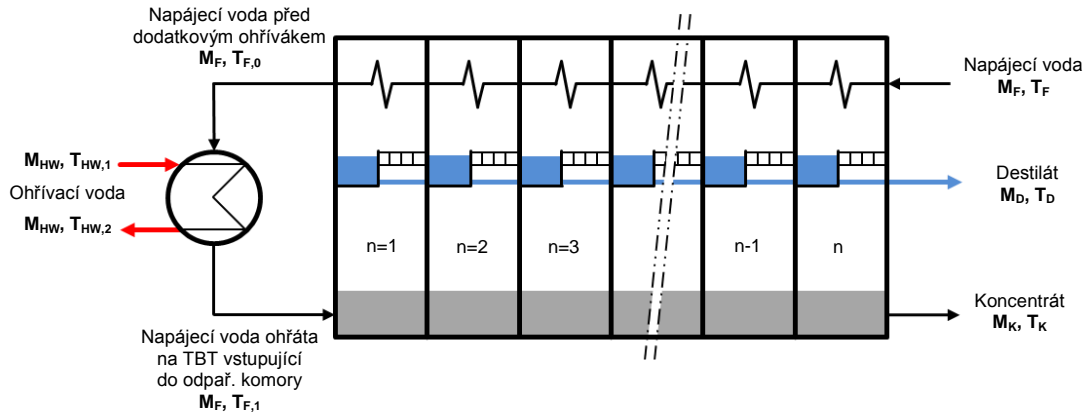
kde n_K je celkový počet trubek kondenzátoru a d_K jejich vnitřní průměr. Stejný vztah platí i pro výpočet rychlosti v trubkách dodatkového ohříváku. Doporučená rychlost proudění v trubkách se pohybuje v rozmezí 1,5 až 2,0 m/s.

3.3.2 Základní bilanční výpočet vícestupňové MSF jednotky

Výpočet vícestupňové MSF jednotky může být relativně jednoduchý nebo vysoce sofistikovaný v závislosti na použitých předpokladech při definování součinitele přestupu tepla, termodynamických ztrát nebo fyzikálních vlastností. Základní rovnice pro modelování tohoto procesu byly vyvinuty pro popis materiálové a energetické bilance v každém odpařovacím stupni MSF jednotky Tyto rovnice obsahují:

- celkové hmotnostní bilance
- hmotnostní bilance solí
- energetické bilance odpařující se vody

- energetické bilance trubek kondenzátorů
- rovnice přenosu tepla trubek kondenzátorů.



Obr. 24 Bilanční znázornění vícestupňové MSF jednotky

Celkovou hmotnostní bilanci lze vypočítat následovně:

$$M_{K_{n-1}} = M_{K_n} + M_{D_n} \quad (9)$$

Hmotnostní bilance solí se vypočítá z rovnice:

$$S_{K_{n-1}} \cdot M_{K_{n-1}} = S_{K_n} \cdot M_{K_n} \quad (10)$$

Energetickou bilanci odpařující se vody lze vypočítat z rovnice:

$$M_{D_n} \cdot l_{V_n} = M_{K_{n-1}} \cdot c_{p_{K_n}} \cdot (T_{K_{n-1}} - T_{K_n}) \quad (11)$$

Energetická bilance trubek kondenzátorů se vypočítá z rovnice:

$$\begin{aligned} M_{D_n} \cdot l_{K_n} + c_{p_{D_n}} \cdot (T_{F_{n-1}} - T_{F_n}) \cdot \sum_{n=1}^n M_{D_K} = \\ = M_{F,0} \cdot c_{p_{F,0_n}} \cdot (T_{F,0_n} - T_{F,0_{n+1}}) \end{aligned} \quad (12)$$

Rovnice přenosu tepla trubek kondenzátorů je dána rovnicí:

$$M_{F,0} \cdot c_{p_{F,0_n}} \cdot (T_{F,0_n} - T_{F,0_{n+1}}) = U_{C_n} \cdot A_C \cdot \Delta T_{LMTD_{C_n}} \quad (13)$$

Následují další rovnice pro dodatkový ohřívák, které se skládají z energetické bilance a rovnic pro přenos tepla:

$$M_{HW} \cdot c_p \cdot (T_{HW,1} - T_{HW,2}) = U_{DO} \cdot A_{DO} \cdot \Delta T_{LMTD_{DO}} \quad (14)$$

$$\Delta T_{LMTDDO} = \frac{(T_{HW,1} - T_{F,1}) - (T_{HW,1} - T_{F,0})}{\ln \frac{T_{HW,1} - T_{F,1}}{T_{HW,1} - T_{F,0}}} = \frac{(T_{F,0} - T_{F,1})}{\ln \frac{T_{HW,1} - T_{F,1}}{T_{HW,1} - T_{F,0}}} \quad (15)$$

$$M_{HW} \cdot c_p \cdot (T_{HW,1} - T_{HW,2}) = M_F \cdot c_p \cdot (T_{F,0} - T_{F,1}) \quad (16)$$

Výše uvedený rovnicový přístup je limitován změnami specifické teplosměnné plochy, která je funkcí celkové kapacity jednotky a její teploty nástřiku (TBT). Další návrhová kritéria a výkonové analýzy lze nalézt v odborné literatuře. Například v literatuře [51], [54], [55] lze nalézt další, i více komplexnější a sofistikovanější soustavy rovnic. Tyto studie obsahují proměnné např. ve výkonovém poměru, specifické teplosměnné ploše, specifické průtoky v trubkách kondenzátorů, recirkulační poměr a v neposlední řadě také rozměrové návrhy. Uvedené analýzy jsou založeny na funkční závislosti teploty TBT a počtu stupňů jednotky. Některá odborná literatura je také zaměřená na tepelně-ekonomické optimalizace, dynamiku systému i řízení celého systému [56], [57].

3.3.3 Základní předpoklady návrhu

Pro provedení výchozích návrhových výpočtů je nutné specifikovat základní provozní a konstrukční předpoklady pro návrh jednotky, které jsou uvedeny v tab. 10. Uvedené konstrukční předpoklady, s výjimkou počtu trubek kondenzátoru, jsou shodné pro celou modelovou řadu jednotek, která byla v rámci této práce navržena.

Tab. 10 Předpoklady pro návrh zařízení

teplota mořské vody	30	°C
slanost mořské vody	35	g/kg
teplota ohřívací vody	100	°C
počet trubek kondenzátoru	10	-
součtová délka trubky kondenzátoru	5,2	m
vnější průměr trubky	19	mm
vnitřní průměr trubky	17	mm
rychlost vody v trubce	1,7	m/s
tepelné ztráty	10	% (tep. výkonu)
násobek rychlosti ohřívací vody	1,3	-

Teplota mořské vody je odlišná dle různých moří a oceánů od 0,5 °C do 35 °C. Čím vyšší je teplota moře, tím je účinnost zařízení nižší. Pro výpočet se uvažuje méně příznivá teplota moře 30 °C. Průměrná slanost mořské vody je 35 mg NaCl/l (tj. 35 000 ppm). Teplota ohřívací vody záleží na dostupném zdroji tepla. Obvyklým zdrojem tepla u menších jednotek jsou spalovací motory, které mají teplotu chladicí vody 90 až 100 °C. U středních a velkých jednotek je obvyklým zdrojem tepla pára. Používané trubky výměníků mají nejčastěji vnější průměr 19 nebo 16 mm, tloušťka stěny trubky je 1,0 mm. Rychlost mořské vody v trubkách výměníků musí být v intervalu 1,0 až 2,0 m/s. Při nižších rychlostech by mohlo docházet k usazování látek obsažených ve vodě na stěnách trubek a při vyšších rychlostech by docházelo k erozi trubek [58]. Rychlost v trubkách výměníku je proto volena cca 1,7 m/s. Do

základních výpočtů je také potřeba zahrnout celkové tepelné ztráty procesu. Ty jsou odhadnuty do 10 % z tepelného výkonu. Pro ohřívací vodu v mezitrubkovém prostoru ohřívacích výměníků je volena 1,3 krát vyšší rychlost než u vody procházející trubkami výměníků, jak je doporučeno v [58].

3.3.4 Výchozí tepelný návrhový výpočet

Výchozí tepelný návrhový výpočet odsolovacího zařízení je založen na iteračním principu, jenž využívá výše uvedený (kap. 3.3.1) rovnicový přístup hmotnostních a energetických bilancí. Pro zvolené (resp. odhadnuté) hodnoty teploty a slanosti je potřeba nejprve dohledat či spočítat potřebné termo-fyzikální vlastnosti mořské vody. Vlastnosti mořské vody lze vyhledat v odborné literatuře. Při vývoji MSF jednotek, které jsou obsahem této práce, byl osloven zahraniční specialista, který má s konstrukcí odsolovacích jednotek na tepelném principu bohaté zkušenosti, a byly s ním konzultovány v praxi uvažované parametry mořské vody a hodnoty součinitelů přestupu tepla a přenosu. Tyto parametry jsou uvedeny v tab. 11.

Tab. 11 Vybrané parametry mořské vody a přenosu tepla

měrná tepelná kapacita	4003	J/(kg·K)
výparné teplo	2344	kJ/kg
součinitel přestupu tepla (pára-voda)	2578	W/(m ² ·K)
součinitel přestupu tepla (voda-voda)	2150	W/(m ² ·K)

Pro názornost bude popsán postup výchozího výpočtového návrhu vícestupňové MSF jednotky. Principiální postup tohoto tepelného výpočtu je potom, pro zvolenou kapacitu (která pro experimentální jednotku činí 20 m³/den), následující:

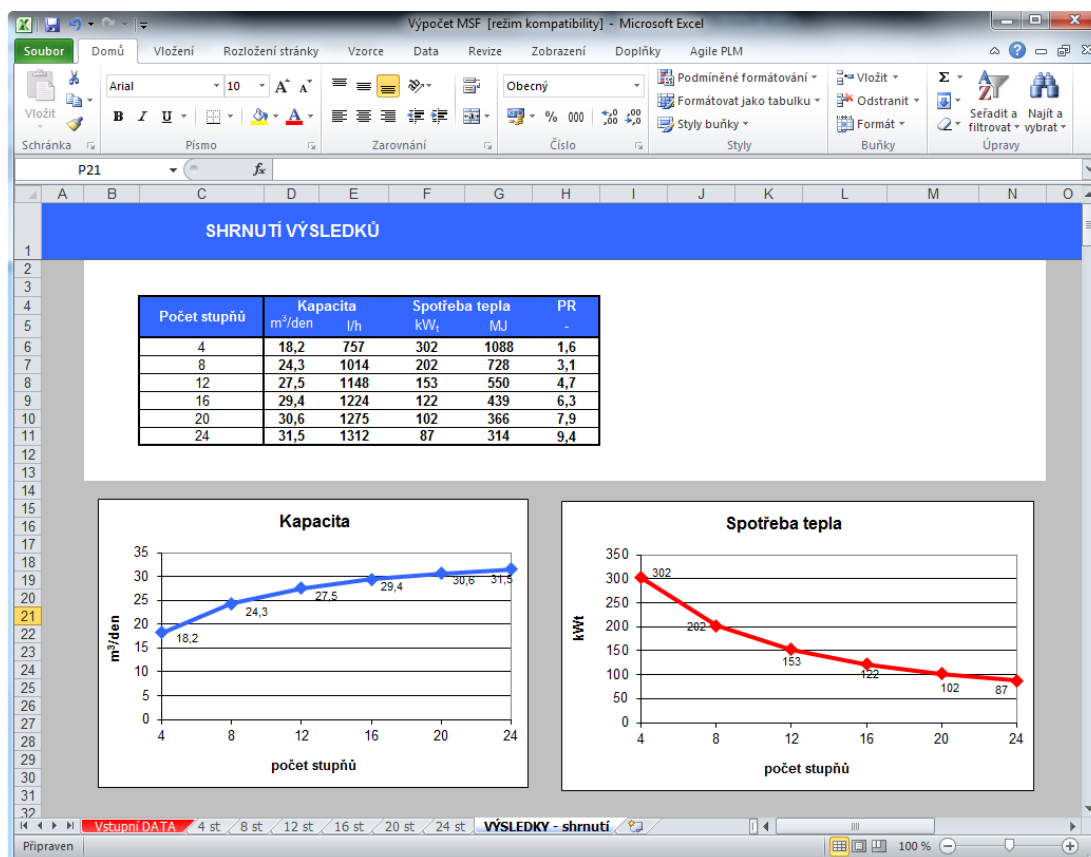
- a. návrh kondenzátorů – volba počtu, délky a průměru teplosměnných trubek
- b. bilanční výpočet jednotky
 - výpočet odpařovacích komor
 - výpočet dodatkového ohříváku
- c. přepočítání kapacity jednotky a spotřeby tepla
- d. započtení tepelných ztrát.

U dalších návrhů (tj. při potřebě výpočtu zařízení s jinou kapacitou) je už „pouze“ měněn počet svazků trubek kondenzátoru, dokud se nedocílí požadované kapacity zařízení.

Za účelem zrychlení a určité automatizace výpočtů MSF jednotek, byl při řešení této práce vytvořen návrhový výpočetní program v rozhraní MS Excel. Tento program využívá výše uvedenou soustavu bilančních a přenosových rovnic za účelem výpočtu počtu trubkových svazků a celkové tepelné spotřeby jednotky pro požadované celkové kapacity jednotek. Náhled uživatelského rozhraní uvedeného programu je uveden na obr. 25 a obr. 26.

Program pracuje s uvedenými předpoklady pro návrh zařízení a s definovanými vlastnostmi mořské vody. Při práci s vytvořeným programem je potřeba nejprve definovat hodnoty teploty mořské vody a dostupné ohřívací vody, již tvoří hlavní vstupní proměnné. Požadovaným parametrem jednotky je zadaná kapacita zařízení. Ostatní parametry výpočtu, jako jsou geometrické i tepelné

parametry použitých teplosměnných svazků trubek, součinitele přestupu tepla, aj, se ve výpočtu nemění. Důvodem pro použití stejných geometrických rozměrů teplosměnných trubek (tj. průměr a délka) je minimalizace počtu různých variant nakupovaných dílů i vyráběných zařízení. Touto optimalizovanou vysokou mírou standardizace výrobků se dosáhne při výrobě nižších produkčních nákladů každé jednotky, a tím se zvýší její konkurenceschopnost na trhu.



Obr. 25 Výpočtový program v MS Excel – list výstupních dat

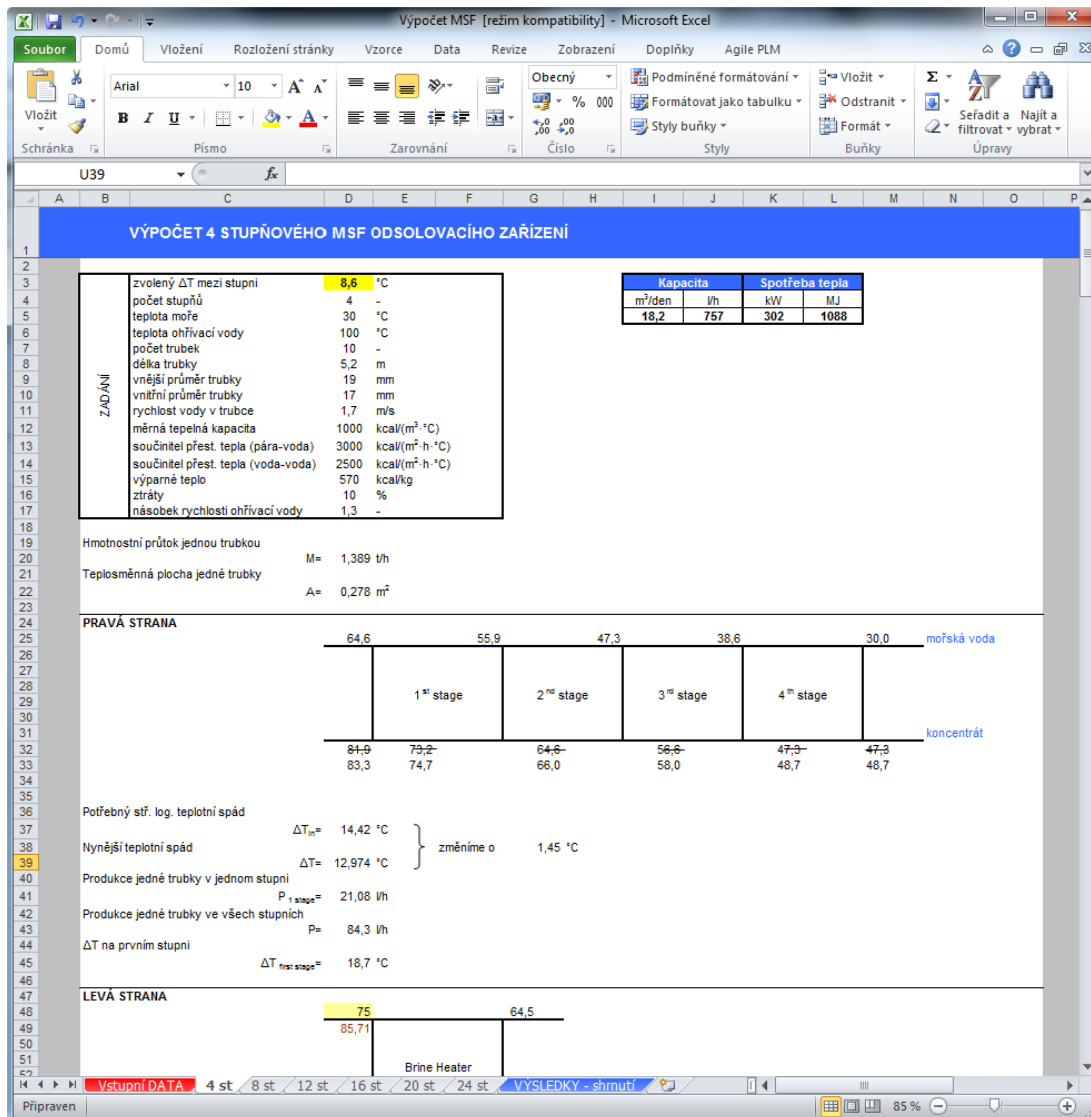
Postup při práci s programem je následující:

- zadání vstupních proměnných
- zadání požadované kapacity zařízení
- použití řešitele pro výpočet potřebného počtu teplosměnných trubek každého svazku trubek kondenzátorů
- použití řešitele pro stanovení teplotní difference mezi jednotlivými stupni.

Z uvedeného postupu návrhového výpočtu jsou patrné tyto výstupní proměnné: počet teplosměnných trubek a energetická náročnost zařízení.

Program provádí výpočty pro jednotky, které se skládají z jednotlivých modulů, z nichž každý modul obsahuje čtyři stupně. Počet programem uvažovaných modulů je od jednoho do šesti, což odpovídá jednotce se 4 až 24 stupni. Problematika týkající se počtu stupňů MSF jednotek je popsána v kap. 3.3.5. Po ukončení výpočtu jsou výsledky znázorněny numericky a vybrané z nich jsou pro lepší interpretaci znázorněny graficky ve funkčních závislostech. Graficky

znázorněna je závislost kapacity, popř. energetické náročnosti v závislosti na počtu použitých modulů. Na základě této závislosti lze následně provést potřebnou technicko-ekonomickou rozvalu při stanovení ideálního počtu modulů každé jednotky.

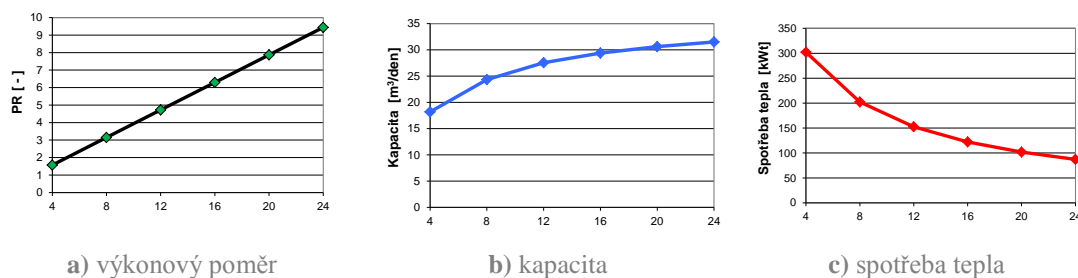


Obr. 26 Výpočtový program v MS Excel – list výpočtů

Funkce vytvořeného programu byla validována za pomoci porovnání jeho výsledků s výsledky výpočtů, které byly provedeny numericky a také pomocí dostupných dat o vstupních a výstupních proměnných jiných jednotek pracujících jinde ve světě, jež jsou uvedena v odborné literatuře [59], [60]. Autorem vytvořený výpočtový program slouží ve firmě PBS POWER EQUIPMENT, s.r.o. pro tepelné návrhy nabízených i vyráběných MSF jednotek a zároveň slouží i jako podklad pro geometrické návrhy jednotek, které následují jako další konstrukční krok po provedených tepelných návrzích (viz kap. 3.4).

3.3.5 Vliv počtu stupňů jednotky

Počet použitých stupňů jednotky má výrazný vliv na výkonový poměr celé jednotky (tj. na celkovou kapacitu jednotky a její spotřebu tepla) i průtok recirkulovaného koncentrátu (v případě zapojení s recirkulací) [61]. Na obr. 27 jsou znázorněny závislosti vybraných výstupních proměnných MSF jednotky v závislosti na celkovém počtu stupňů. Vstupní proměnné uvedených závislostí jsou: teplota ohřívací vody 100 °C, teplota napájecí vody 30 °C. Konstrukční aspekty uvedené jednotky jsou shodné s experimentální jednotkou, která je předmětem řešení této práce. Z uvedených závislostí je patrné, že se zvyšujícím se počtem stupňů se markantně zvyšuje výkonový poměr, tj. zvyšuje se kapacita zařízení a snižuje spotřeba tepla. Také dochází se zvyšujícím se počtem stupňů ke snižování teplotního rozdílu mezi jednotlivými stupni, avšak celkový rozdíl teplot mezi napájecí a ohřívací vodou je shodný s jednotkou o menším počtu stupňů. Díky menšímu teplotnímu rozdílu mezi stupni jsou celkové ztráty energie nižší. Rovněž se zvyšujícím se počtem stupňů se zvyšuje velikost přehřátí napájecí vody v HRS sekci, a tudíž následně stačí méně dodaného tepla do dodatkového ohříváku, čímž se zvýší výkonový poměr. S více stupni jednotky lze dosáhnout stejné kapacity jednotky při menším průtočném množství napájecí vody. Na druhou stranu vyšší počet stupňů přináší vyšší investiční náklady. U velkých jednotek se dle [61] doporučuje jako ideální počet stupňů 24.



Obr. 27 Závislost výstupních proměnných jednotky na počtu stupňů jednotky

Jak již bylo uvedeno, pro dosažení lepšího využití tepla a snížení spotřeby topného, popř. i chladicího média se zapojuje několik odpařovacích členů (stupňů) za sebe tak, že koncentrát (zahušťovaný roztok) postupuje z jednoho členu do dalšího [35]. Teplo je do odpařovacích komor dodáváno v koncentráte (zahušťovaném roztoku). Zapojením více stupňů (v našem případě modulů) se spotřeba topného média i chladicí vody teoreticky sníží proti jednostupňové jednotce tím více, čím vyšší počet stupňů jednotka má. Skutečná spotřeba médií je o něco větší vzhledem ke ztrátám. Pro každé zadání odpařování (množství a koncentrace zpracovávaného roztoku, požadovaná výstupní koncentrace) a technické provedení členu odpařky existuje ekonomicky optimální počet členů, se kterým lze zadání plnit s vynaložením nejmenších nákladů [35].

3.4 Konstruktivní návrh

Po výchozím tepelném návrhovém výpočtu, kdy se obdrží výchozí představa o konkrétním geometrickém provedení odsolovací jednotky, je potřeba provést konstrukční návrh jednotlivých částí jednotky. Konstrukční návrh se sestává z těchto kroků:

- volba vhodných materiálů
- celkový geometrický návrh kondenzátorů vyplývající z parametrů teplosměnných trubek vzešlých z výchozího tepelného výpočtu
- celkový geometrický návrh odpařovací nádoby a jejích prvků
 - průřez a výška nádoby
 - průřezy všech hrdel
- výpočet výšky rámu celé jednotky tak, aby byla zajištěná sací schopnost čerpadel destilátu a koncentráту.

3.4.1 Důležité aspekty při návrhu

V tepelných metodách odsolování se využívá podtlaku, kdy sytá pára zvětšuje svůj objem s klesající teplotou. Z tohoto důvodu je třeba věnovat zvýšenou pozornost řešení stupňů s nejnižší teplotou, kde bude mít pára největší objem, a tudíž i největší rychlost. Rozměry zařízení pak vycházejí z maximální dovolené rychlosti páry.

Pára nesmí být nikde brzděna ani škrcena. Při škrcení má totiž pára téměř stejnou teplotu, avšak menší tlak, a tudíž se přehřeje. Aby potom mohla přehřátá pára kondenzovat, je potřeba ji podchladit na teplotu syté páry daného tlaku.

3.4.2 Materiály

Použité materiály v odsolovacích zařízeních lze rozdělit do čtyř hlavních skupin, podle pracovní látky (médiu), se kterou jsou ve styku. Materiály mohou přijít do kontaktu s těmito médii:

- se slanou vodou (mořská voda nebo koncentrát)
- s párou
- s destilátem
- s ohřívací vodou (v dodatkových výměnících).

Komponenty, které jsou ve styku se slanou vodou, jsou vyráběny ze speciálních korozivzdorných materiálů odolávajících mořské vodě. Jsou to převážně různé slitiny mědi (např. CuNi 90/10, CuZn20Al2As aj.). Materiály odolávající účinkům mořské vody bývají často nazývány námořní bronz. Části ve styku se slanou vodou jsou:

- přívodní potrubí napájecí vody
- trubkové prostory výměníků tepla
- odpařovací nádoba
- odpadní potrubí koncentráту
- čerpadlo koncentráту, popř. recirkulační čerpadlo.

Samostatnou skupinou jsou materiály odpařovacích nádob, které musí být odolné účinkům slané vody. Odpařovací nádoby tvoří stěžejní část jednotky, a tudíž

musí být velmi odolné. Také se však musí brát v úvahu výrobní cena nádob z důvodu konkurenceschopnosti celého výrobku. Mezi používané materiály odpařovacích nádob patří „kuproniklová“ ocel (CuNi) nebo uhlíková ocel se speciální povrchovou úpravou pogumováním. Velmi zajímavým a potenciálním řešením materiálu pro styk se slanou vodou se jeví sklolamináty. Ty odolávají chemickým účinkům mořské vody a zároveň poskytují dostatečnou pevnost. Použití sklolaminátů bude jedním z hlavních inovativních prvků vyvíjeného modulového zařízení.

Ty části zařízení, které jsou ve styku s parami nebo destilátem, bývají vyrobeny z chromniklové nerezové oceli. Vhodná ocel je např. AISI 316L, která jako významný legující prvek obsahuje molybden. Nerezová ocel musí být použita z toho důvodu, že páry nebo destilát obsahují stopy po solích, které byly uneseny parami přes separátor ve formě jemných kapek. Z nerezové oceli budou vyrobeny např. pláště kondenzátorů, parovody a sběrné potrubí destilátu.

Pláště dodatkových ohříváků bývají vyrobeny z uhlíkové oceli, jelikož jsou ve styku pouze s upravenou topnou sladkou vodou. Trubky výměníků, kterými proudí slaná voda, jsou pak vyrobeny z výše zmíněných námořních bronzů.

Výčet vhodných materiálů pro konstrukci odsolovacích jednotek je uveden v kap. 4.1.2 a 4.3.1.

3.4.3 Specifické rozměrové aspekty jednotky

Rozměry odsolovacího zařízení vychází z konstrukce kondenzátorů a odpařovací nádoby. Při rozměrovém návrhu MSF jednotek je zapotřebí vycházet z okrajových podmínek uvedených v této kapitole.

Velikosti hrdel

Součástí rozměrového návrhu je také návrh průřezu hrdel na jednotce. Hrdla na zařízení lze rozdělit do čtyř následujících kategorií dle pracovních látek (médií):

- voda pod tlakem (tlak od čerpadel)
- voda volně odtékající z prostoru vakua
- vakuová pára
- odsávaný vzduch.

Velikosti hrdel na odpařovací nádobě i v podstatě rozměry této nádoby vychází z následujících okrajových podmínek. V případě tlakové vody je zapotřebí dbát na to, aby nebyla překročena její maximální rychlost proudění 2 m/s. Volně odtékající voda z prostoru vakua si také vyžaduje velkou pozornost při návrhu. Konkrétně jde o sací potrubí čerpadla destilátu a koncentráta. Nátoková výška musí být vyšší než je ztrátová výška sacího potrubí. Dalším důležitým konstrukčním aspektem odpařovací nádoby jsou místa proudění vakuové páry přes separátor a spojovací hrdlo mezi odpařovací nádobou a kondenzátorem. V místě separátoru by neměla rychlost proudění páry přesáhnout 13 až 15 m/s a v místě spojovacích hrdel 20 m/s (při teplotě syté páry 40 °C).

Uspořádání mezi jednotlivými odpařovacími komorami

Způsob průchodu koncentrátu mezi jednotlivými stupni (tj. odpařovacími komorami) hraje velmi důležitou roli. Cílem průchodu je:

- vytvoření plynulého toku koncentrátu za vodním zámek (clonou)
- dosáhnout turbulentního proudění za eliminace výskytu nestabilního přechodového režimu toku
- zamezení stříkání koncentrátu do odlučovače, aby nedocházelo ke strhávání kapek slané vody parou.

Obecně se uplatňují dva způsoby návrhu mezistupňových průchodů (tj. clon a vodních zámků), které jsou následující:

- nastavení optimálního průtočného množství koncentrátu pro nominální výkon jednotky
- nastavení takového průtočného množství, aby byl zajištěn stabilní chod jednotky v co nejširším výkonovém rozsahu.

Možnosti konstrukce clon a vodních zámků jsou velice široké. Nesprávný návrh mezistupňových průchodů (clon a vodních zámků) může zapříčinit nestabilní provoz. Případný poddimenzovaný průchod způsobuje vysokou hladinu koncentrátu před ním a následný počet ovlivněných stupňů závisí na jeho umístění vzhledem k ostatním stupňům. Příliš vysoká hladina koncentrátu může vyústit v nadměrné stříkání v odpařovací komoře, zaplavení odlučovače kapek a následně odpovídajícím tepelným ztrátám. Na druhou stranu případné předdimenzování průchodů může vést k profoukávání par do dalších stupňů.

Hladina v posledním stupni

Jak již bylo uvedeno v předchozím textu, nastavení správné hladiny koncentrátu v každém stupni je zásadní pro udržení stability celého procesu. Hladina koncentrátu musí být vždy dostatečně vysoká, aby vytvářela vodní zámek a těsnila tak tlak mezi stupni a aby se zabránilo profoukávání par mezi stupni. Zároveň musí být hladina dostatečně nízká, aby se snížily ztráty při ustavování fázové rovnováhy. Toho lze dosáhnout maximalizováním mezistupňové tlakové ztráty nebo minimalizováním průtoku koncentrátu po šířce jednotky. Hladina v posledním stupni je úzce spjata s hladinami a průtoky v ostatních stupních jednotky a také s TBT.

3.4.4 Odpařovací nádoba

V odpařovací nádobě dochází k mžikovému rovnovážnému odpaření části průtočného objemu. Uvolněná vodní pára sladké vody společně s malým množstvím stržených kapek slané vody je odváděna přes odlučovač kapek na teplosměnné plochy kondenzátorů. Materiál nádoby musí být korozivzdorný, protože zde dochází k neustálému kontaktu s agresivní slanou vodou. Nádoba i přilehlé spoje musí být velmi těsná, aby v ní nebo ve spojích nedocházelo k nežádoucímu přísávání okolního vzduchu a tím ztrátě podtlaku (spadu vakua) v jednotce, která by ovlivnila celkovou kapacitu jednotky.

Odpařovací nádoba může být vyrobena z těchto materiálů:

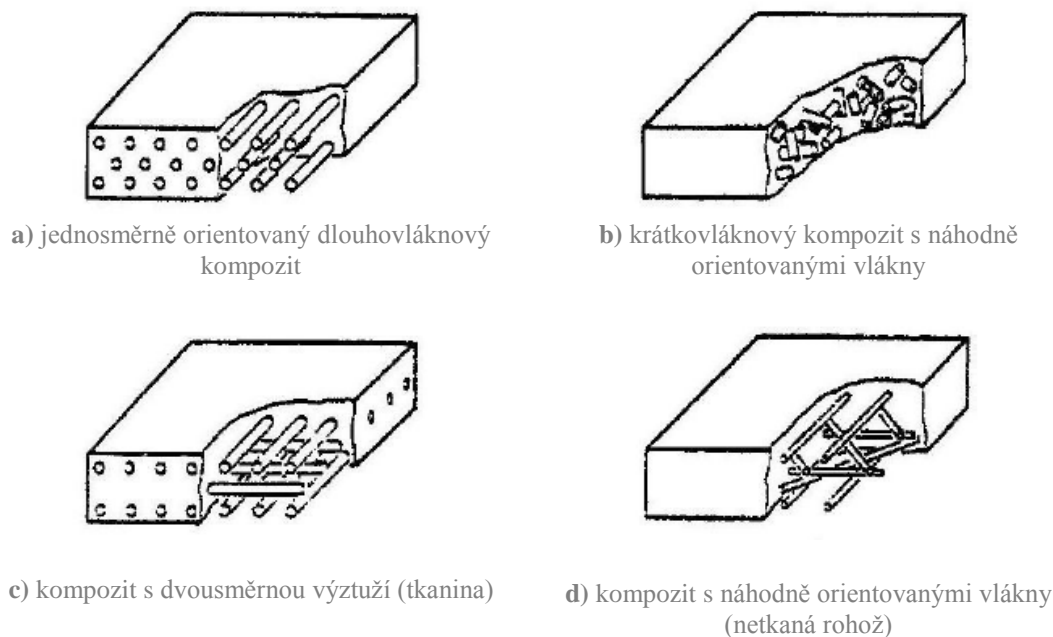
- uhlíková ocel s vhodnou povrchovou úpravou (pogumování, speciální nátěry)
- slitiny mědi a niklu
- sklolamináty.

Jako velmi progresivní materiály se v konstrukci odsolovacích jednotek jeví skelné lamináty, které oproti používaným kovovým materiálům přinášejí řadu výhod. Nutno podotknout, že zavedení výrobci odsolovacích jednotek se do současné doby drží použití ocelových materiálů. Použití sklolaminátů v konstrukci vyvíjených jednotek je jedním z hlavních inovativních prvků této práce. Výhody těchto materiálů jsou podrobně rozepsány v následujících odstavcích.

Geometrické rozměry odpařovacích nádob vychází hlavně z uvedených okrajových podmínek v předešlé kapitole.

Vlastnosti sklolaminátu

Laminát obecně je kompozit složený s několika vrstev (lamin) pevně spojených v jeden celek. Každá z vrstev je obvykle tvořena maticí (např. pryskyřicí) a vyztuženými vlákny [62]. Výrobní lamináty jsou tvořeny spojitými vlákny, která jsou složená v neohebném celku a orientovaná různými směry. Vlákna mohou být například karbonová, skelná, polyesterová, nylonová, keramická nebo křemíková. Tato vlákna dávají laminátu pevnost a tuhost. Pro použití v odsolovacích jednotkách jsou velmi vhodné sklené lamináty (tj. sklolamináty), které velmi dobře odolávají chemickým účinkům mořské vody, poskytují dostatečnou pevnost a jsou zároveň cenově přijatelné.



Obr. 28 Prostorové uspořádání výztužných vláken [63]

Sklolaminát je makroskopický kompozit polymerních a nepolymerních složek. Tento kompozit je vyráběn vrstvením tkanin nebo rohoží takovým způsobem, aby bylo dosaženo požadované pevnosti a tuhosti s ohledem na podmínky namáhání výrobku. V případě sklolaminátu jsou polymerní složkou nenasyčené polyestery.

Jednou z hlavních předností sklolaminátů je jejich vysoká odolnost proti korozi. Korozní odolností sklolaminátů se rozumí jejich schopnost odolávat účinkům nízkomolekulárních látek v kapalně nebo plynné fázi a působení tepelné energie a energie záření. Vytvrzené pryskyřice se vyznačují transparentí, vysokým leskem, odolností vůči vodě, olejům, slabým kyselinám, alkáliím, organickým rozpouštědlům, dobrými mechanickými a elektroizolačními vlastnostmi. Další výhodou sklolaminátů je jejich vysoká pevnost při současně nízké hustotě. Proti kovům mají výhodu v odolnosti proti povětrnostním vlivům i různým chemikáliím, v propustnosti světla, izolaci tepla, zvuku a elektřiny. Běžné typy sklolaminátů jsou použitelné v rozmezí teplot $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (speciální typy až do $150\text{ }^{\circ}\text{C}$) [64]. Polyesterové skelné lamináty jsou vynikajícím konstrukčním materiálem s rozsáhlými aplikacemi například v chemickém průmyslu, dopravní technice (stavba vozidel, člunů, lodí a letadel), ve stavebnictví, elektrotechnickém a nábytkářském průmyslu, apod.

Mezi další vlastnosti sklolaminátů patří jejich nízká hmotnost (cca 5x nižší než uhlíková ocel), vysoká tuhost, která limituje deformaci struktury při vysoké zátěži (složený laminát je 2,5x tužší než ocel), a vysoká pevnost umožňující snést laminátu vysokou zátěž (sklolaminát má více jak 3x vyšší odolnost než uhlíková ocel).

Sklolamináty mají vysokou životnost (neunaví se tak jako železo, nekorodují, neohýbají se a mají vynikající odolnost proti úderům), vynikají ve stabilitě proti povětrnostním vlivům, teplotám atd. Lze je také vytvarovat do téměř libovolných a přesných tvarů. Barvu laminátových materiálů je možné upravit v celé barevné škále RAL a barvostálost je možné zvýšit použitím UV filtrů.

3.4.5 Dodatkový ohřívák

Dodatkový ohřívák (angl. *Brine Heater* – BH) dohřívá napájecí mořskou vodu, popř. její směs s recirkulovaným koncentrátem na její maximální požadovanou teplotu (angl. *Top Brine Temperature* – TBT). Tato teplota se v české terminologii někdy nazývá „teplota nástřiku“. V dodatkovém ohříváku se uplatňuje nepřímý ohřev, tj. přes teplosměnnou plochu. Trubkovým prostorem prochází slaná mořská voda, a tudíž jeho materiálové provedení musí být provedeno z odolných materiálů. Odolné vůči slané vodě musí být minimálně tyto části dodatkového ohříváku: trubky, trubkovnice a obrátové komory.

Výpočet dodatkového ohříváku vychází z tepelné náročnosti celé jednotky. Je velmi vhodné volit shodné geometrické rozměry dodatkového ohříváku jako u kondenzátoru, a to za účelem univerzálnosti použitých trubek, trubkovic a obrátových komor.

Výpočet potřebné velikosti teplosměnné plochy svazku trubek dodatkového ohříváku vychází z výše uvedených energetických bilancí.

3.4.6 Kondenzátor

Kondenzátory MSF jednotek slouží ke kondenzaci vzniklých par sladké vody a předeřevu napájecí mořské vody, popř. její směsi s recirkulovaným koncentrátem. Páry kondenzují na vnějším povrchu trubek (tj. v mezitrubkovém prostoru) a vzniklý destilát se shromažďuje v dolní části kondenzátoru na jeho plášti, odkud je následně odváděn tlakovým rozdílem mezi jednotlivými stupni. Trubkami (tj. trubkovým prostorem) prochází mořská voda (popř. její směsi s recirkulovaným koncentrátem) a je předeřívána odevzdaným kondenzačním teplem vzniklým při kondenzaci par na vnější straně svazků trubek kondenzátoru. Při volbě materiálu kondenzátorů je nutné počítat s určitou slaností destilátu, která je tvořena velmi malým množstvím nezachycených slaných kapek mořské vody. Proto vůči slané vodě musí být odolné minimálně tyto části dodatkového ohříváku: trubky, trubkownice a obrátové komory. Plášť kondenzátorů bývá většinou z austenitických nerezových ocelí. Při návrhu jednotlivých částí kondenzátorů je důležité dbát na správnou volbu tvrdosti použitých materiálů. Musí platit, že trubky mají větší tvrdost než trubkownice a případné podpěry trubek či přepážky. Důvodem volené rozdílné tvrdosti materiálů je vyloučení rizika poškození trubek jejich stříhem o tvrdší materiál, se kterým jsou v mechanickém kontaktu.

Výpočet potřebné velikosti teplosměnné plochy svazku trubek dodatkového ohříváku vychází z výše uvedených energetických bilancí.

Kondenzátorové trubky

V praxi používané kondenzátorové trubky pro použití v odsolovacích zařízeních mohou být na bázi dvou chemických složení. Jsou jimi mosazné trubky na bázi zinku nebo bronzové trubky na bázi mědi.

Trubky v kondenzátorech nebo dodatkových ohřívácích slouží jako teplosměnné plochy pro přestup tepla. V aplikacích odsolovacích jednotek přestupuje teplo vždy z mezitrubkového do trubkového prostoru, kde je předeřívána proudící slaná voda určená k následné destilaci v odpařovacích komorách.

V kondenzátorech těch stupňů, jež tvoří část MSF jednotky s využitím kondenzačního tepla (HRS), je využito kondenzační teplo vzniklé kondenzací mžikově odpařené páry k předeřevu napájecí vody, která proudí uvnitř trubek. Toto zpětné využití kondenzačního tepla je nezbytné pro dosažení vysokého poměrového výkonu jednotky. Ve stupních bez využití kondenzačního tepla (HJS) je vzniklé teplo předáváno při kondenzaci par do chladicí mořské vody. V důsledku toho je napájecí mořská voda ohřáta na teplotu, která je rovna teplotě koncentrátu v posledním odpařovacím stupni jednotky. Použití oddělených posledních několika chladicích stupňů je nezbytné, aby se zamezilo teplotnímu skoku při mísení ohřáté napájecí vody s koncentrátem v posledním stupni. Teplotní šok by mohl způsobit rozklad hydrogenuhličitanu vápenatého a vysrážení uhličitanu vápenatého, které jsou známé účinky tzv. „měkkého zanášení“. Proces rozkladu je také spojen s uvolňováním plynného oxidu uhličitého, který podporuje korozní reakce a zvyšuje nároky na výkon zařízení pro vytvoření podtlaku. Funkce proudu chladicí mořské vody v sekci bez využití kondenzačního tepla (HJS) je odstranění přebytečného tepla dodaného do procesu dodatkovým ohřívákem.

Celková teplosměnná plocha trubek kondenzátorů má značný vliv na celkový poměrový výkon celé jednotky a zároveň je hlavním návrhovým kritériem, které

ovlivňuje teplotu směsi napájecí vody a recirkulovaného koncentrátu přiváděné k dohřevu do dodatkového ohříváku. Je-li teplosměnná plocha menší, než je tepelné zatížení od kondenzující páry, dojde ke zvýšení tlaku ve stupni z důvodu nahromadění nezkondenzovaných par. Toto zvýšení tlaku následně způsobí snížení množství mžikově odpařené páry ve stupni. Z těchto příčin nakonec celý systém dosáhne nového ustáleného stavu s nižším odpařovacím výkonem ve stupni, který má za následek snížení celkové produkce destilátu (tj. kapacity jednotky). Z uvedených důvodů se dojde také ke snížení teploty směsi vstupující do dodatkového ohříváku, což má za následek zvýšení požadovaného výkonu předaného v dodatkovém ohříváku, a tedy i celkové snížení výkonového poměru celé jednotky.

Nesprávným provozem jednotky (popř. znečištěním teplosměnných ploch) dojde ke snížení součinitele přestupu tepla a následnému vytvoření takových nových podmínek provozu, při kterých je celkový tepelný výkon svazku trubek nižší, než byl původně projektovaný výkon, ačkoliv původní návrh jednotky zajišťoval dostatečný přestup tepla v různých stupních. K obdobnému vychýlení od projektovaných provozních podmínek může dojít i v případě poruchy některé z teplosměnných trubek a jejího následného vyřazení z činnosti (např. úmyslným „zazátkováním“).

Materiály teplosměnných trubek musí být odolné vůči účinkům mořské vody. Materiály běžně používané v aplikacích kondenzátorů jsou uvedeny v tab. 12. Jak uvádí [51], jedním z hlavních kritérií výběru vhodného materiálu trubek je teplota média proudícího v trubkách daného stupně. V tomto ohledu je dle [51] nejodolnějším materiálem CuNi 70/30, který je používán ve stupních, kde teplota přesahuje 80 °C. Ve stupních s nižší teplotou může být použito více druhů materiálů (např. CuNi 90/10, mosaz na bázi hliníku, vysoce legované oceli, titan). Nejvyšší tepelnou vodivost z uvedených materiálů má CuNi 90/10 s hodnotou kolem 50 W/m.K. Trubky z titanu poskytují nejvyšší odolnost proti erozi a možnost nejnižší tloušťky stěny. Hliníkový bronz představuje levnější materiál, avšak v něm obsažená měď má tendenci k rozpouštění v mořské vodě, což přináší nepříznivý vliv na cílovou teplosměnnou plochu trubek v podobě jejich zanášení. Se stejným problémem se potýkají i jiné typy trubek, jejichž složení je na bázi mědi. Titanové trubky lze tedy shledat jako vhodnější, ačkoliv jsou dražší alternativou než slitiny na bázi mědi.

Tab. 12 Materiály používané v praxi pro konstrukci kondenzátorů [51], [65]

Skupina materiálů	Materiál		Tepelná vodivost [W/m.K]	Hustota [kg/m ³]	Odolnost na obsah Cl ⁻ [mg/l]	Max. doporuč. rychlost [m/s]	Cena [Kč/kg]	
	[-]	ekvivalent						
Slitiny mědi a niklu	CuNi 70/30	-	29,3	8 950	≤ 30 000 a více	2,0	-	
	CuNi 90/10	-	50,2	8 900	≤ 20 000 a více		290	
Hliníková mosaz	CuZn20Al2As	ASTM B111	100	8 300	-	2,0	250	
Austenitická nerezová ocel	AISI 321	1.4541+AT, 17 248	15,0	7 900	≤ 100	2,3	90	
	AISI 316Ti	1.4571+AT, 17 348	15,0	8 000	≤ 500		180	
	AISI 316	1.4401	15,0	8 000	≤ 2 000		-	
	AISI 317LMN	1.4439	14,6	8 000	≤ 5 000		-	
Super austenitická nerezová ocel	1.4547	254 SMO	14,0	8 000	≤ 10 000		-	
	1.4529		12,0	8 100	≤ 10 000		-	
	1.4539	AISI 904L	12,0	8 000	≤ 20 000		-	
	AL-6XN	ASTM B676	11,8	8 060	≤ 10 000		-	
Feritická nerezová ocel	SEA-Cure S44660	-	16,0	7 695	≤ 20 000 a více			400
Austeniticko-feritické nerezové oceli	1.4462	ASTM A789, SAF 2205	19,0	7 805	≤ 3 000			230
Titan	Titanium Grade 2	-	20,8	4 510	neomezeno	2,5	800	
Uhlíková ocel	1.0335	-	47,0	7 870	-	-	-	

3.4.7 Rám jednotky

Každá jednotka a její vybavení je umístěna na rámu. Rám nese odpařovací nádobu (popř. nádoby) s kondenzátory a jsou na něm umístěné další prvky, jako např. čerpadlo destilátu a koncentrátu, rozvaděč elektro a MaR, úchyty potrubí, kabelové vedení.

3.5 Další prvky

Každá jednotka pro úpravu mořské vody na tepelném principu musí být mimo zmíněná zařízení a části vybavena dalšími komponenty, které zajišťují její správnou funkci. Ty nejdůležitější jsou popsány níže. Před výběrem uvedených zařízení je potřeba rozhodnout, zda bude celá MSF jednotka sloužit pouze pro technologické účely, nebo zda bude někdy sloužit pro úpravu vody, která bude následně upravena na pitnou. V případě možnosti použití jednotky pro účely výroby pitné vody musí být všechny prvky z takových materiálů, které mohou být ve styku s pitnou vodou (tj. které neuvolňují případné zdraví škodlivé sloučeniny).

3.5.1 Čerpadla

Pro funkci každé jednotky je důležitý správný výběr použitých čerpadel. Standardní provedení odsolovací jednotky obsahuje čerpadlo destilátu (kondenzátu) a koncentrátu (zahuštěného roztoku). Obě zmíněná čerpadla musí mít výborné sací schopnosti z důvodu značného podtlaku nad hladinou čerpané kapaliny. V těchto aplikacích jsou osvědčená čerpadla s uzavřeným oběžným kolem a velkým průměrem sacího otvoru.

Podtlak v zařízení zapříčiňuje snížení celkové nátočné výšky čerpadla, a tím následného zhoršení sací schopnosti čerpadla a vzniku nebezpečí kavitace. Snížení nátočné výšky je způsobeno také tlakovými ztrátami v potrubí koncentrátu. Obecně řečeno je potřeba dbát na co nejmenší tlakové ztráty v potrubí před sáním čerpadla, a také na výběr co nevhodnějšího typu čerpadla.

Čerpadla, jež pracují za sníženého tlaku, jsou často v technické praxi nazývána jako kondenzátní, jelikož nachází široké uplatnění u kondenzátorů v aplikacích za parními turbínami. Obvykle u malých MSF jednotek nejsou čerpadla koncentrátu i destilátu zálohována a pracují v konfiguraci 1x 100 % (dle požadavku koncového uživatele se mohou zálohovat v konfiguraci 2x 100 % nebo 3x 50 %). Za čerpadly destilátu i koncentrátu bývá obvykle umístována zpětná klapka pro zamezení zpětného proudění a případného přísávání vzduchu, které by mělo za následek zhoršení podtlaku v jednotce. Jako další pojistka proti zpětnému přísávání vzduchu slouží opatření vhodného zavedení potrubí výtlačku čerpadla destilátu pod hladinu destilátu v jeho zásobníku.

Součástí výkonových charakteristik čerpadel (jako je např. Q – H křivka) je obvykle také graf doporučené nátokové výšky NPSHr (z angl. *Net Positive Suction Head required*). NPSHr uvádí výrobce a udává výšku vodního sloupce v sání čerpadla potřebnou pro eliminaci rizika vzniku kavitace na prvním oběžném kole (prvním stupni) čerpadla [66]. Hodnota NPSHr závisí především na otáčkách oběžného kola čerpadla a na teplotě čerpaného média.

V praxi se lze setkat také s hodnotou pro dostupnou nátokovou výšku NPSHa (z angl. *Net Positive Suction Head available*), což je výška skutečně dostupná na realizovaném díle. Vždy musí být dodržena podmínka $NPSHa > NPSHr$. Zpravidla se tato podmínka dodržuje s rezervou: $NPSHa \geq NPSHr + 0,5\text{m}$ [67].

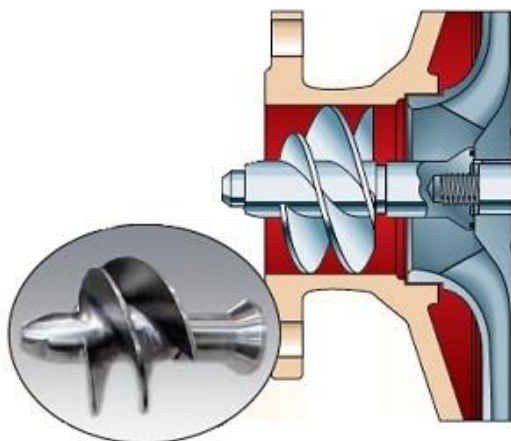
Čerpadlo destilátu

Čerpadlo destilátu slouží k čerpání vyprodukovaného destilátu do zásobníku, kde je tento destilát skladován pro další použití. Destilát je v jednotce sbírán společným sběrným potrubím a dále je gravitačně sveden na sání čerpadla destilátu. Hladina destilátu není v malých a středních aplikacích MSF jednotek monitorována a uvažuje se, že se destilát tvoří stále a tudíž je sání čerpadla neustále zahlcené. Čerpadlo destilátu má jen tepelnou ochranu v rozvaděči. V malých a středních aplikacích se používají horizontální odstředivá čerpadla s uzavřeným oběžným kolem. Materiál bývá ze slitin tzv. „námožní“ bronzi nebo může být i z litiny (předpokládá se, že v destilátu je obsah solí ≤ 10 ppm).

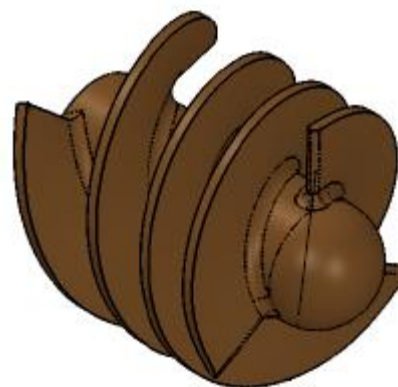
Čerpadlo koncentráту

Čerpadlo koncentráту slouží k odčerpání zahuštěné mořské vody (koncentrátu) z poslední odpařovací komory jednotky. Hladina koncentrátu v posledním stupni není v malých a středních aplikacích MSF jednotek monitorována. Rovněž se předpokládá stálý přísun koncentrátu na sání čerpadla, a tudíž i jeho neustálé zaplavení. Čerpadlo koncentrátu má v rozvaděči jednotky tepelnou ochranu proti přehřátí. Používány jsou horizontální nebo vertikální čerpadla s uzavřeným oběžným kolem a velkým sacím otvorem, který zaručuje uspokojivé sací schopnosti čerpadla. Velkou pozornost je potřeba věnovat umístění těchto čerpadel tak, aby byla zaručena správná sací schopnost čerpadel a minimalizace tlakových ztrát na sání.

Pro zlepšení sací schopnosti čerpadel je možné před oběžné kolo čerpadel předřadit tzv. inducer (viz obr. 29). Ten redukuje NPSHr o 20 až 50 %, má tvar šroubovice a snižuje kavitaci. Díky induceru lze čerpat kapaliny i s obsahem plynů. Inducery dodávají jako příslušenství ke svým čerpadlům jen někteří výrobci. Inducer není univerzální součást a většinou bývá navrhován pro konkrétní aplikaci. Inducer, který byl v rámci prováděných experimentů testován, je znázorněn na obr. 30 a v příloze č. 4 (výrobní výkres). Jeho návrh byl proveden na VUT FSI v Brně a výroba byla objednána u strojírenské firmy zabývající se kovoobráběním.



Obr. 29 Nákres umístění induceru [68]



Obr. 30 Experimentální inducer – 3D model

Dávkovací čerpadla

Dávkovací čerpadla mohou být využita pro dávkování chemie do napájecí mořské vody, popř. pro úpravu destilátu.

Napájecí vodu je nutné před jejím použitím v destilačních zařízeních na úpravu mořské vody upravit. Úprava spočívá v mechanické filtraci od velkých nečistot (např. písek, řasy, mušle, ...) a také v dávkování chemikálií. Chemikálie upraví vlastnosti napájecí vody tak, aby nebylo zařízení vodou poškozeno, a aby byl průběh procesu bezproblémový. Dávkují se chemikálie:

- proti usazování sloučenin vápníku na teplosměnných plochách
- pro snížení pěnivosti.

Vzniklý destilát se může upravovat pro účely pitné vody dávkováním chloridů, síranů, vápníku, hořčíku a dalších minerálů.

3.5.2 Zařízení pro vytvoření sníženého tlaku

Základním principem tepelných metod odsolování (destilace) je snížení tlaku, tedy vytvoření tzv. podtlaku v zařízení. Ten je tvořen kondenzací par, kdy páry mění měrný objem minimálně o tři řády, a také právě zařízeními pro vytvoření podtlaku, které lze rozdělit do tří skupin:

- vodokružné vývěvy
- vodoproudé ejektory
- paroproudé ejektory.

Ve vakuovém prostoru jednotek se vyskytují i jiné plyny, než je vodní pára. Tyto plyny nekondenzují společně s párou a zhoršují přestup tepla na teplosměnných plochách. Do vakuového prostoru jednotky se nekondenzovatelné plyny dostávají následovně:

- jako rozpuštěné v napájecí mořské vodě (a následně uvolněné)
- netěsnostmi ve spojích nebo na armaturách.

Nekondenzovatelné plyny, o kterých pojednává kap. 1.5, je nutné z vakuového prostoru odvádět, jinak by se ve vakuovém prostoru hromadily a významně zhoršovaly dosažené vakuum (a tím i výkon jednotky). Kondenzací páry obsažené ve směsi dochází k jejímu podchlazení. Společně s nekondenzovatelnými plyny je z jednotky zařízeními pro vytvoření podtlaku odsáváno i malé množství páry. Odsávání vodní páry je však nežádoucí, protože způsobuje pokles výkonu jednotky, a musí být tedy minimalizováno.

Nekondenzovatelné plyny rozpuštěné v mořské vodě jsou tvořeny molekulami složek atmosférického vzduchu, jako jsou kyslík (O_2), dusík (N_2) a argon (Ar). Zároveň je v ní obsažen i kysličník uhličitý (CO_2) vyprodukovaný vodními rostlinami. Voda je v běžných průmyslových procesech zbavena O_2 , N_2 a Ar v tzv. odplyňovačích. V procesu odsolování mořské vody MSF jsou všechny tyto nekondenzovatelné plyny uvolňovány v odpařovacích komorách (největší množství je uvolněno v první odpařovací komoře) [69].

Pro směsi plynů, které vznikají bez produkce nebo spotřeby tepla, platí Daltonův zákon, podle kterého každý plyn ve směsi plynů se v daném prostoru chová tak, jako by byl v tomto prostoru sám [70].

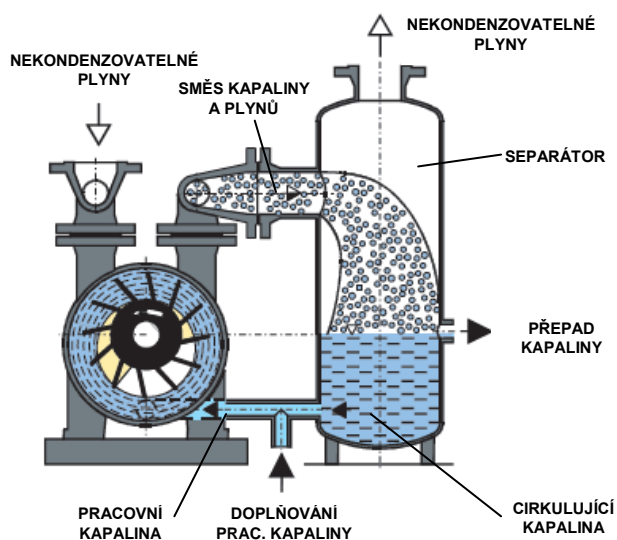
Pro dimenzování odvzdušňovacího potrubí a potrubí vedoucí k ejektorům nebo vývěvám je třeba znát objemový průtok parovzdušné směsi. Ten lze určit dvěma způsoby:

- použitím teorie o směsích plynů
- využitím úvahy na základě Daltonova zákona.

Daltonův vyjadřuje, že každý plyn ve směsi vyplňuje celý prostor, a také že parciální tlak plynu je takový tlak, jaký by měl plyn, kdyby v celém prostoru (odpovídajícímu objemu a teplotě směsi) byl sám.

Vodokružné vývěvy

Jedním ze způsobů k vyčerpání nekondenzovatelných plynů je použití vodokružných vývěv. Ty jsou velmi kompatibilní a svou konstrukcí se podobají odstředivým čerpadlům. Vodokružné vývěvy pracují na principu komprese určitého množství parovzdušné směsi, která je po jejím nasátí uzavřena v komorách rotoru vývěvy. Jako píst zde působí prstavec vody rotující spolu s rotorem v komoře vývěvy. Tloušťka tohoto vodního prstence je vlivem odstředivé síly po celém obvodu komory stejná. Excentrické uložení rotoru v této komoře pak způsobí, že se během jedné otáčky výrazně mění hloubka ponoření jednotlivých komor do vodního prstence. Tím se mění velikost objemu, v němž se nachází plynná směs. Při maximálním vynoření (největší volný objem) dochází k nasátí směsi, během poloviny otáčky dojde k maximálnímu ponoření, vyplnění podstatného objemu komory vodou a tím k maximální kompresi plynného obsahu. V této poloze pak je umístěn výfuk stlačené směsi. Řízení sání a výfuku je různé podle výrobce. Vodokružné vývěvy jsou limitovány teplotou pracovní vody, která musí být co nejnižší. Proto se někdy vodokružné vývěvy vybavují chladiči pracovní vody. Funkční princip vodokružných vývěv umožňuje částečnou kondenzaci páry v jejich pracovním prostoru. Při kontinuálním provozu je tak zajištěno automatické doplňování pracovní kapaliny do cirkulačního okruhu stanice. Na výtlačku je vodní tříšť vznikající v pracovním prostoru vývěv částečně strhávána zkomprimovaným plynem do výtlačného potrubí. K separaci plynné a kapalně fáze je použito následně zařazeného odlučovače kapaliny. Zpětnému průtoku atmosférického vzduchu a pracovní kapaliny do vakuového prostoru zabraňují zpětné ventily instalované na sání vývěv. Samočinnou regulaci hladiny pracovní kapaliny zajišťuje plovákový ventil instalovaný na odlučovači kapaliny.

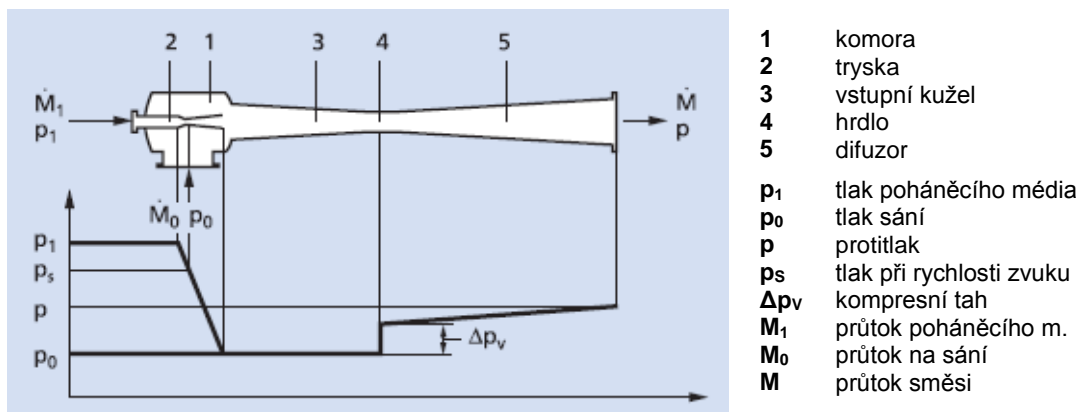


Obr. 31 Princip vodokružné vývěvy [71]

Zkušenosti s funkcí těchto vodokružných vývěv u experimentální jednotky MSF jsou uvedeny dále v textu v kap. 5.3.1.

Vodoproudé ejektory

Dalším ze způsobů pro dosažení podtlaku v zařízeních je použití vodoproudého ejektoru (viz obr. 32). Ejektory patří do skupiny proudových čerpadel. Princip ejektoru je založen na využití podtlaku, vzniklého v místě zúžení (trysce) proudu pracovní kapaliny, k nasávání dopravovaného média (vzduchu), jejíž tlak se za zúženým místem zvýší na potřebnou hodnotu plynulým rozšířením průtočného profilu. Za tryskou poklesne tlak a zvýší se kinetická energie. Za difuzorem se z kinetické energie stane tlaková.



Obr. 32 Princip ejektoru [72]

Příklad provedení vodoproudého ejektoru je znázorněn na obr. 56. Jako poháněcí médium pro činnost ejektorů slouží tlaková voda dodávaná většinou k tomu účelu navrhnutým čerpadlem. Voda přiváděná do trysky ejektoru s přetlakem min. 3,5 bar vytéká tryskou do směšovací komory. Zde se dostává povrch vodního paprsku do kontaktu se směsí vzduchu a páry přiváděné do směšovací komory sacím hrdlem z prostoru kondenzátoru. Při tomto kontaktu dochází k intenzivní výměně hybnosti mezi vodou a plynnou složkou. Plyny jsou strhávány spolu s vodou do vstupního hrdla difuzoru. V určité vzdálenosti od vstupu vody do ejektoru dojde k prakticky skokové změně z odděleného proudění kapalné a plynné fáze na průtok promísené směsi vody a plynných bublin plným průřezem. Zóna tohoto přechodu je vyplněna intenzivními víry a tento jev je nazýván "vodní skok". Důležitým průvodním jevem tohoto skoku je značný nárůst tlaku promíseného čerpaného média za skokem. Celý tento jev je fyzikálně založen na principu změny hybnosti na tlakový potenciál. S výhodou zde lze využít i hydrostatiky při průtoku směsi vody a již částečně stlačených plynů difuzorem, a proto se vodoproudé ejektory instalují zásadně ve vertikálním uspořádání. Při průtoku difuzorem, v důsledku nárůstu průtočného průřezu, dochází ke zpomalování proudu a tím v souladu se zákonem kontinuity a zákonem zachování energie k dalšímu nárůstu tlaku až na úroveň tlaku okolní atmosféry. Výstup proudu vody se stlačeným vzduchem je zaveden zpět do moře. V případě zapojení s recirkulací ejektorové vody je zaveden pod hladinu do vodní jímky, která je v provedení s volnou hladinou. Tudy dopravený vzduch odchází následně do okolní atmosféry. Voda v tomto zapojení s recirkulací je poté z jímky opět nasávána čerpadlem a provozní cyklus ejektoru je tak uzavřen.

Důležitou vlastností, která limituje možnosti použití vodoproudých ejektorů, je vliv teploty poháněcí vody na dosažitelné vakuum. Pro účinný provoz

vodoproudých ejektorů je nezbytné udržovat pracovní (poháněcí) kapaliny co nejnižší. Jak bylo uvedeno výše, tak s čerpaným vzduchem je ejektorem nasávána i pára. Ta v průběhu komprese kondenzuje a předává své kondenzační teplo vodě. Při případné zcela uzavřené cirkulaci poháněcí vody mezi jímkou a ejektorem (tj. zapojení s úplnou recirkulací) by docházelo k postupnému nárůstu teploty vody v okruhu a tím i hodnoty parciálního tlaku páry p_{pary} v ejektoru. Tím by postupně klesal i sací výkon ejektoru při konstantním požadovaném tlaku v jeho sání p_{sm} . Proto se při zapojení s recirkulací průběžně část vody z jímky odvádí a toto množství se nahrazuje přívodem studené vody z jiného zdroje (nejčastěji z přívodu chladicí vody pro kondenzátory). V případě zapojení ejektorů bez recirkulace je do ejektoru nasávána neustále voda o místních konstantních parametrech. Z výše uvedeného je zřejmé, že vodoproudé ejektory jsou provozně spolehlivé a jednoduché.

Paroproudé ejektory

Ve středních i velkých jednotkách pro úpravu mořské vody se pro vytvoření podtlaku uplatňují paroproudé ejektory.

Paroproudé ejektory jsou založeny na mechanismu ejekčního účinku plynného média (poháněcí páry) proudícího vysokou rychlostí ejektorem. Poháněcí pára je přiváděna do ejektoru vstupní dýzou. Aby dodaná energie pro odčerpání potřebného množství vzduchu byla dostatečná při přijatelném množství poháněcí páry a tím i rozměrech vstupní dýzy, bývají parametry poháněcí páry poměrně vysoké (8 až 15 bar, 240 až 400 °C). V naprosté většině případů tedy je expanze páry ve vstupní dýze nadkritická a používá se Lavalova dýza. Nadzvuková rychlost proudění páry se po výstupu z dýzy ve směšovací komoře snižuje na podzvukovou při vzniku rázových vln a vysoké turbulence, což přispívá k intenzivnímu předávání energie mezi poháněcí parou a nasávaným vzduchem nebo parovzdušných směsí zaváděnými do směšovací komory bočním hrdlem. Takto vzniklá směs pak vstupuje do hrdla difuzoru, kde se dokončí promíšení. V navazujícím difuzoru dojde zpomalením proudu k přeměně kinetické energie na energii tlakovou [51], [73].

3.5.3 Odlučovač kapek

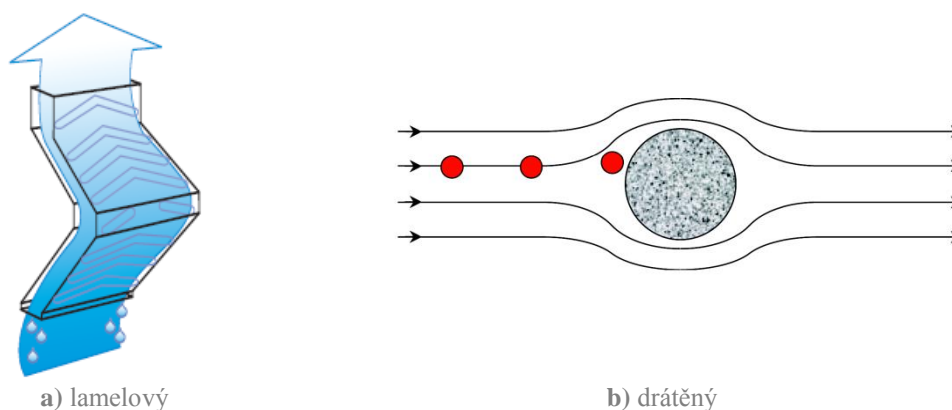
Odlučovač neboli separátor kapek (angl. demister) slouží k zachycení kapek vody, které jsou unášeny proudem páry směrem ke kondenzátorům. Kapky jsou slané, a tudíž je žádoucí jejich zachycení, aby neovlivňovaly kvalitu výsledného destilátu, popř. jej zcela nezneškodily. Odlučovač lze napočítat a navrhnout pro danou aplikaci nebo jej lze koupit od výrobců, které se na výrobu odlučovačů specializují. Za účelem co nejlepších výsledků odloučení (tj. co nejmenší slanosti destilátu) se v praxi spoléhá na ověřené výrobky specializovaných firem, které své odlučovače nabízejí v mnoha konfiguracích a materiálových provedeních. V praxi se používají tyto dva typy odlučovačů:

- lamelový
- drátový.

Lamelové i drátové odlučovače pracují na známém principu využití setrvačnosti proudícího média (tzv. setrvačná retence), díky kterému je možné separovat malé částice nebo kapky z proudu tekutiny. Separace kapek je prováděna na vloženém povrchu do proudu tekutiny, který tyto malé částice vychylí.

Proces separace na lamelovém i drátěném odlučovači kapek se skládá ze tří základních kroků. První z nich je ulpění kapiček kapaliny na povrchu lamely, popř. drátu. Při průchodu plynného média odlučovačem jsou jeho proudnice vychýleny, avšak kinetická energie kapiček kapaliny, které jsou spojené s proudem plynu, je příliš vysoká, aby následovala proudnici plynu a tak dojde ke kontaktu kapiček s odlučovačem. Ve druhé fázi procesu separace dochází ke slučování kapiček, které narazily na povrch odlučovače. Ve třetím kroku, dochází k uvolnění sloučených zachycených kapek z odlučovače. V zařízení se svislým tokem plynného média, kapky zachycené kapaliny odkapávají zpět v podobě velkých kapek. Princip lamelových i drátěných odlučovačů je znázorněn na obr. 33 a jejich vzhled je zobrazen na obr. 34.

Základní pravidla návrhu obou typů jsou stejná a jsou vyráběny v různých geometrických i materiálových provedeních. Mezi základní vlastnosti všech typů odlučovačů patří tlaková ztráta a účinnost odloučení.



Obr. 33 Princip odlučovačů kapek [74], [75]

Výhody lamelových odlučovačů oproti drátovým jsou [76]:

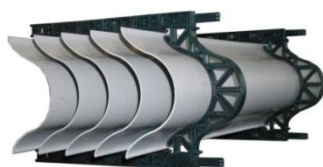
- **Vysoká rychlost**
Jsou méně náchylné ke strhávání kapek kapaliny proudem plynu a zaplavení než drátové odlučovače. Lamelové jednotky mohou pracovat při rychlostech 30 až 40 % vyšších.
- **Vysoké zatížení**
Lamelové odlučovače obvykle umožňují 5 až 10 krát vyšší zatížitelnost než drátové odlučovače.
- **Zanášení a ucpávání**
Lamelové separátory mají mnohem větší otvory než drátěné separátory. U drátěných mohou částice a nečistoty ulpívat v mřížce tvořené dráty (což může vést k následnému čištění nebo výměně separátoru). V aplikacích, ve kterých se hromadí usazeniny, mohou lamelové jednotky pracovat mnohem déle bez potřeby čištění a zároveň se čistí mnohem snadněji.
- **Vyšší korozní odolnost**
Tloušťka lamel dává těmto odlučovačům podstatně vyšší životnost, než je u drátěných odlučovačů v aplikacích se stejnou korozní

rychlostí. Ve stejném korozním prostředí vydrží lamela mnohem déle, než drát ze shodného materiálu.

- **Nízká tlaková ztráta**
Relativní otevřenost lamel jim dává výhodu nad drátěnými oky v těch aplikacích, kde jsou tlakové ztráty několika centimetrů vodního sloupce rozhodující.
- **Kapalina s vysokou viskozitou**
Existuje několik aplikací, v nichž vysoká viskozita kapaliny brání odtoku tak zásadně, že odkap zaplaví objem drátěných ok separátoru i při nízkých rychlostech procházejícího plynného média. Lamely umožňují mnohem vyšší viskozitu kapalného média.
- **Robustní konstrukce**
- **Uvícnutí pěny**
Lamelové odlučovače jsou vhodnější než drátové v těch aplikacích, kde hrozí výskyt pění kapalného média.



a) lamelový



b) lamelový



c) drátěný

Obr. 34 Vzhled odlučovačů kapek [74], [76], [77]

Správná funkce separátorů závisí na rychlosti páry skrz něj. Pro zachování správné funkce u lamelových separátorů jsou používány tyto max. hodnoty rychlosti syté páry:

- 4 až 5 m/s (při teplotě 100 °C)
- 13 až 15 m/s (při teplotě 40 °C).

Pokud by byla rychlost páry přes separátor vyšší, bude docházet ke strhávání a průchodu kapek slané vody skrz separátor, a tím následně vyšší slanosti destilátu, která není žádoucí. Tyto vlastnosti byly potvrzeny experimentálním měřením (viz kap. 5.3.1).

3.5.4 Kontinuální systém čištění kondenzátoru

Jelikož při odsolování tepelnými metodami dochází k zanášení teplosměnných ploch, je potřeba tyto plochy periodicky nebo kontinuálně čistit dle doporučení konkrétního výrobce zařízení. Vnitřní povrchy trubkových svazků použitých výměníků (kondenzátorů a dodatkového ohříváku) lze čistit následujícími způsoby:

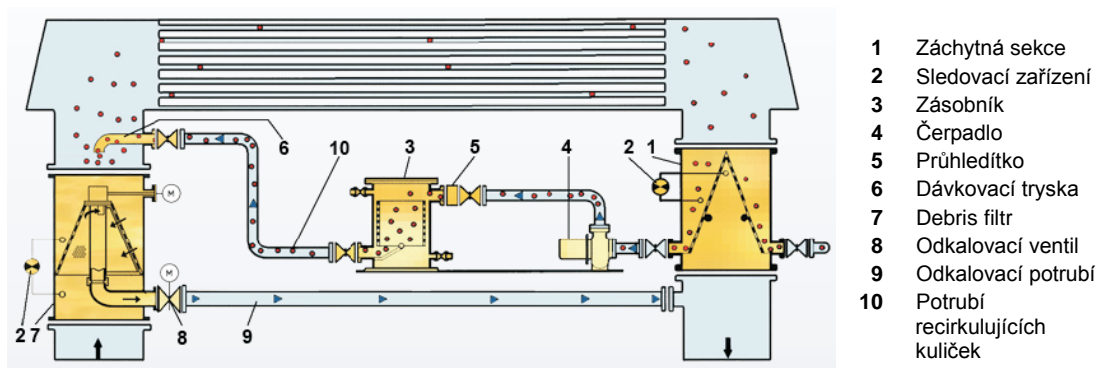
- chemicky
- mechanicky

- ručně
- automaticky (tj. systém kontinuálního čištění kondenzátoru).

Čištění trubek kondenzátoru je nutné, jelikož trubkami procházející napájecí voda vyvolává různé druhy znečištění, které ovlivňuje vnitřní povrch kondenzátorových trubek. Usazování suspendovaných látek, jako je např. bahno, bláto, sliz, biologické znečištění v důsledku přítomnosti bakterií nebo mořských živočichů ve vodě, krystalizací rozpuštěných prvků a usazování mořských mušlí vede k zanášení těchto kondenzátorových trubek. Čistota a tedy i účinnost teplosměnných trubek má přímý vliv na tepelnou účinnost celého procesu.

Systém kontinuálního čištění kondenzátorů a výměníků tepla udržuje účinnost přenosu tepla teplosměnných trubek bez mechanického nebo chemického čištění a bez zvýšení počtu odstávek zařízení, které by byly pro čištění nutné. Kontinuální čištění vnitřních povrchů trubek je prováděno kontinuální cirkulací kuliček z pěnové pryže o velikosti o něco větší, než je průměr daných trubek. Tyto pěnové kuličky jsou dávkovány do přívodů vody daných výměníků, popř. do jejich série. Míčky jsou unášeny do vstupních vodních komor, následně skrz trubky, a nakonec jsou po průchodu celou sérií výměníků zachyceny v kulovém sběrném síti, které je v případě MSF jednotek umístěno za dodatkovým ohřívákem.

Systém kontinuálního čištění kondenzátoru (viz obr. 35) není základní nezbytnou výbavou odsolovacích jednotek. Jeho použití závisí na potřebách a finančních možnostech koncového zákazníka, popř. doporučení konkrétního výrobce odsolovací jednotky.



Obr. 35 Princip systému kontinuálního čištění kondenzátoru [78]

3.5.5 Kompenzátory

V určitých místech potrubních spojení kompletní odsolovací jednotky je vhodné umístit kompenzátory (viz obr. 36), které kompenzují výrobní nepřesnosti, chvění a případné dilatace. Kompenzátory lze také umístit mezi spojení jednotlivých zařízení jednotky, avšak jejich použití závisí na daném výrobcu a jeho konstrukčním řešení. Kompenzátory lze použít gumové nebo ocelové a vždy musí být navrženy k provozu za sníženého tlaku, než je tlak okolí (za vakua). Nejjednodušší možnost kompenzátoru u malých průměrů potrubí je použití standardní hadice, která je navlečená na potrubí, jež je opatřeno zápichy, a utažená stahovací sponou. Mezera mezi dvěma spojovanými potrubími tzv. hadicovým kompenzátozem je max. 2 cm.

Tohoto jednoduchého a zároveň účinného kompenzátoru lze využít u malých jednotek na spojení jednotlivých kompenzátorů na trase destilátu a odsávaných nekondenzovatelných plynů. Pro kompenzaci na průměrech větších než DN40 je nutné použití přírubových kompenzátorů.

3.5.6 Potrubní připojení, připojovací prvky

Každá jednotka pro úpravu mořské vody založená na tepelných metodách odsolování je vybavena mnoha hrdly a přírubami, které slouží pro spojení jednotlivých stupňů, popř. modulů. Pro snadnou montáž i demontáž jsou vhodné přírubové spoje. Z hlediska univerzálnosti je vhodné volit velikosti přírub dle standardních zavedených rozměrů a nikoliv vlastních specifických rozměrů.

V některých případech se může pro výrobce jevit vhodné použití vlastních rozměrů a typů přírub (např. čtyřhranné), které zabírají v prostoru méně místa, než klasické kulaté. Dle zkušeností autora by se měl však výrobce maximálně vyvarovat použití nestandardních prvků v těch místech, kde se očekává budoucí oprava či výměna. V případě potřeby koncového uživatele jednotky na obměnu přírubových spojů či potrubních propojení je pro něj velmi snadné a rychlé obstarat si unifikované spoje a nikoliv nechat vyrábět speciální příruby se specifickými rozměry.

Pro velké průměry potrubí je vhodné použití standardních přírubových spojů. U malých rozměrů do DN50 se jeví jako vhodný spojovací systém ISO KF (viz obr. 37), který je standardně používán ve vakuové technice. Tento systém nabízí širokou škálu připojovacích a těsnících prvků.

Velmi důležitou roli u zařízení pracujících za podtlaku hraje těsnění připojovacích míst. U přírubových spojů, které jsou ve styku s podtlakem, je nutné použití měkkého těsnění (např. gumové těsnění). Toto měkké těsnění se dostatečně přizpůsobí a spoj utěsní. Tvrdé těsnění není pro těsnění spojů ve styku s vakuem vhodné, jelikož by docházelo k nežádoucímu přisávání vzduchu. Systém ISO KF používá těsnících O-kroužků. Ostatní nepřírbové spoje je vhodné těsnit na závit, na kterém je nanesena speciální těsnící hmota.



Obr. 36 Gumové kompenzátory [79]



Obr. 37 Unifikované ISO KF spojovací prvky [80]

U každé MSF jednotky je při její výrobě provedeno potrubní připojení některých hrdel a prvků. Pro některá spojení je vhodné potrubní spojení, a pro některá jiná je vhodnější spojení flexibilními hadicemi. U všech druhů propojení je vyžadována vysoká těsnicí schopnost ve spojích, aby nedocházelo k nežádoucímu přísávání vzduchu. Potrubní spojení lze provést potrubím ze speciálních korozivzdorných ocelí, nebo popř. použitím speciálních potrubí na bázi plastů. Potrubí na bázi plastů je možné spojovat svařovanými spoji (podobně jako u vodoinstalatérského potrubí), nebo pomocí lepených spojů.

3.5.7 Rozvaděč MaR

Provoz odsolovací jednotky je zapotřebí jako každý jiný technologický výrobek řídit a popř. monitorovat. K tomuto účelu slouží systém měření a regulace (MaR) jednotky, kterým by měla být vybavena každá odsolovací jednotka. Jednotky obsahují i silovou část elektro, která zajišťuje jištění a napájení silových prvků (převážně čerpadel).

Rozsah instrumentace je značně závislý na velikosti jednotek a jejich účelu použití. U malých až středních odsolovacích jednotek, kterými se zabývá tato práce, je snaha o co nejjednodušší rozsah částí elektro i MaR. Důvodem je provoz zařízení za téměř konstantních podmínek a výborná houževnatost těchto jednotek na určité změny provozních podmínek. Část měření a regulace zastupuje v základním rozsahu jednotky pouze přístroj pro měření slanosti (někdy bývá nazýván jako „salinoměr“), který měří na principu vodivosti obsah rozpuštěných látek ve vodě. Salinoměr má funkci zobrazovací, tj. zobrazuje aktuální hodnotu slanosti, i funkci vyhodnocovací a řídicí. Při překročení slanosti nad zadanou mez sepne kontakt, kterým je ovládán dvoucestný nebo trojcestný ventil, jenž přepustí nekvalitní destilát zpět do odsolovací jednotky a nikoliv do zásobníku destilátu.

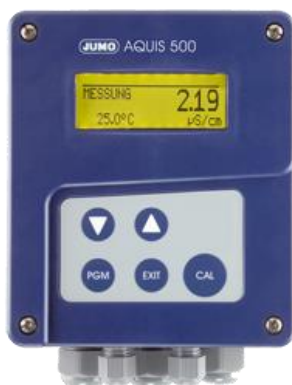
Silová část elektro bývá pojata buď pro ruční, nebo poloautomatický provoz. V ručním provedení se čerpadla, které jsou součástí jednotky, zapínají ručně přímo na jističi. Poloautomatické provedení umožňuje obsluhu stisknout pouze tlačítko „start“, a procesem vyžadované postupné spouštění čerpadel je provedeno automaticky na základě zpoždovacích relé. Toto provedení obsahuje také ochranu čerpadel před případným chodem „na sucho“.

Při vývoji poloautomatického rozvaděče byl kladen důraz na jednoduchost i přehlednost pro obsluhu, vysokou provozní spolehlivost a také na jeho nízkou výrobní cenu. Koncepce tohoto rozvaděče je v principu univerzální pro všechny velikosti a typy vyráběných jednotek, a liší se jen ve velikosti použitých jističů, které jsou různé dle elektrických parametrů použitých čerpadel. Vyvinutý poloautomatický rozvaděč je vidět na obr. 48 a obr. 69a.

Přístroj pro měření slanosti

Přístroj k měření zbytkové slanosti destilátu patří mezi základní vybavení každé odsolovací jednotky. Je vybaven vodivostní sondou a přepočítává naměřenou vodivost na obsah solí v destilátu. Vodivostní sonda obsahuje i termočlánek pro měření teploty slané vody, která slouží pro teplotní kompenzaci měření. Na základě informace o zbytkové slanosti může obsluha kontrolovat správný chod zařízení, a také podle něj elektronika zařízení ovládá trojcestný ventil, popř. spustí varovný signál pro obsluhu. Tento ventil odvede případný nekvalitní destilát zpět do

destilačního zařízení. Na trhu lze pořídit sofistikované přístroje pro měření vodivosti (viz obr. 38), avšak pro potřeby jednotek pro úpravu mořské vody jsou dostačující jednoúčelové zařízení (viz obr. 39), které zobrazují pouze hodnotu slanosti v jednotkách ppm. Jednoúčelové zařízení mají obvyklý měřicí rozsah 0 až 200 ppm a lze na nich nastavit požadovanou hodnotu alarmu (tj. již neakceptovatelnou hodnotu slanosti, při které bude otevřen přepouštěcí trojcestný ventil).



Obr. 38 Sofistikovaný přístroj k měření vodivosti (Jumo) [81]



Obr. 39 Jednoúčelový přístroj k měření slanosti (Uni-Safe) [82]

3.5.8 Speciální ventily

Mezi základní výbavu každé odsolovací jednotky patří membránový ventil, který bývá umístěn v potrubí za čerpadlem destilátu. V principu pracuje jako pojistný ventil, tj. otevírá se při překročení nastavené hodnoty tlaku proudícího média. Slouží však proti zpětnému přísávání vzduchu přes potrubí destilátu a také jako ochrana čerpadla destilátu (v případě, kdy se netvoří destilát, není na výtlaku čerpadla tlak, ventil se uzavře a oběžné kolo čerpadla má stále k dispozici kapalinu, a tudíž nepracuje v režimu „na sucho“). Tento ventil těsní na dosedací ploše speciální membránou a na trhu je k dostání v mnoha variantách rozsahů pro nastavení tlaku. Vhodný tlakový rozsah zmíněného ventilu pro účely odsolovacích jednotek je např. 0,5 až 2,5 bar(g), přičemž tlak otevření bývá nastavován na cca 1 bar(g).

Mezi doplňkovou výbavu na přání zákazníka patří např. samočinný trojcestný termoregulační ventil, který může zajistit regulaci teploty na vratné větvi ohřívací vody na požadovanou teplotu. Jiné zapojení totožného ventilu zabraňuje překročení maximální teploty média v určené potrubní větvi. Tohoto ventilu se využívá např. při provozu zařízení na odpadní teplo z motorů, u kterého se musí zajistit určitá konstantní teplota vratné vody, která je požadována výrobcem pro zajištění optimálního provozu zdroje.

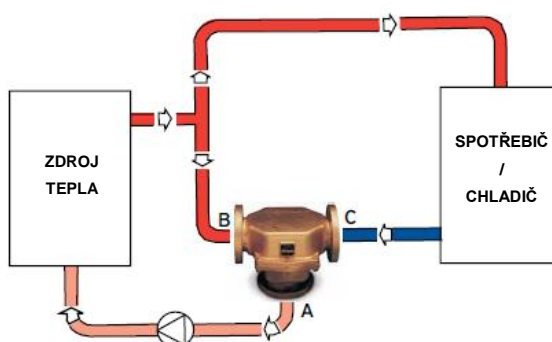
Termoregulační ventily umožňují spolehlivou kontrolu teploty kapalného média v systémech rekuperace tepla, chladicích systémech a v mnoha dalších aplikacích, které vyžadují regulaci teploty. Používají se v těch procesech, kde dochází k mísení nebo rozdělování proudů kapalného média. Nejvíce se pro tyto účely v průmyslu používají ventily od výrobce AMOT (viz obr. 40), jehož ventily jsou samočinné a vyžadují minimální údržbu.

Termostatické regulační ventily poskytují spolehlivé, automatické a přesné ovládání teploty proudících tekutin. Tyto ventily jsou samočinné, a tudíž nepotřebují externí zdroj elektrické energie. Jejich funkce je zajištěna speciální kapslí se speciální náplní. Náplň je volena podle žádané regulované teploty za ventilem, a ta svými dilatačními vlastnostmi zajišťuje pohyb regulačních elementů ventilu.

Při použití ventilu pro účely směšování (viz. obr. 41) je studené (vychlazené) médium přivedeno do vstupu C. Vstup B slouží jako vstup obtoku horkého média a přípojní místo A je společný výstup. Ve výstupu A je prvek kontrolující výstupní teplotu a dle této teploty je nastaven správný poměr horkého a chladného média pro zajištění požadované výstupní teploty. Jsou-li ventily použity pro účely rozdělení proudů, vstupuje horké médium do vstupu A (ten kontroluje teplotu), výstup C je připojen k chladiči a výstup B je připojen k obtokovému vedení.



Obr. 40 Samočinný ventil AMOT [83]



Obr. 41 Zapojení ventilu AMOT pro směšování [83]

3.6 Modelová řada MSF jednotek

Na základě provedených tepelných a konstrukčních návrhů a provedené volbě dalších nezbytných komponent ke kompletnosti MSF odsolovacích jednotek byla v rámci této práce vytvořena produktová řada MSF jednotek určených pro komerční trh. Vytvoření produktové řady bylo jedním ze stěžejních úkolů této práce. Trh výrobků pro účely odsolování mořské vody se nachází výhradně v zahraničí, avšak lze nalézt případy potenciální vhodné aplikace MSF jednotek i v ČR (např. pro účely zahušťování viz kap. 7.1.3).

Vytvoření modelové řady jednotek je v praxi potřebné z několika důvodů, které jsou následující:

- unifikace vyráběných komponent
- odpadnutí návrhu různých variant jednotek „na míru“
- vyšší efektivita výroby
- menší počet náhradních dílů.

Před návrhem modelové řady bylo potřeba provést průzkum trhu, který byl tvořen průzkumem mezi potenciálními zákazníky i průzkumem modelových řad výrobků konkurenčních výrobců. Z průzkumu vyplynulo, že je na trhu zájem o malé až střední jednotky s kapacitou v desítkách až stovkách m^3/den . Zároveň se ověřilo, že trh skýtá dostatečný počet potenciálních zákazníků, kteří mají levný přístup k primárním zdrojům energie, nebo mají popř. dostatek odpadního tepla.

Zaměření modelové řady na malé až střední jednotky vychází kromě uvedeného průřezu i z možností výrobního závodu PBS INDUSTRY, a.s., které jsou tvořeny technickými možnostmi ve výrobě i limitací kapacit členů vývojového oddělení.

Vytvořená modelová řada zahrnuje MSF jednotky s kapacitou 40 až 1500 m³ destilátu za den. Při jejím návrhu se vycházelo z požadavků na nízké výrobní náklady a vysokou účinnost jednotek. Výkonový rozsah celé řady je tvořen 8 rozměrovými typy jednotek, které jsou navrženy jako moduly, a lze je dle potřeb konečného uživatele řadit za sebe. Jak je patrné z výpočtů uvedených v předchozích kapitolách, tak se zvyšujícím se počtem modulů se zvyšuje celková účinnost zařízení (tj. výkonový poměr) a snižují se celkové provozní náklady. Na obr. 42 je znázorněna jednotka skládající se ze tří modulů základních modulů.

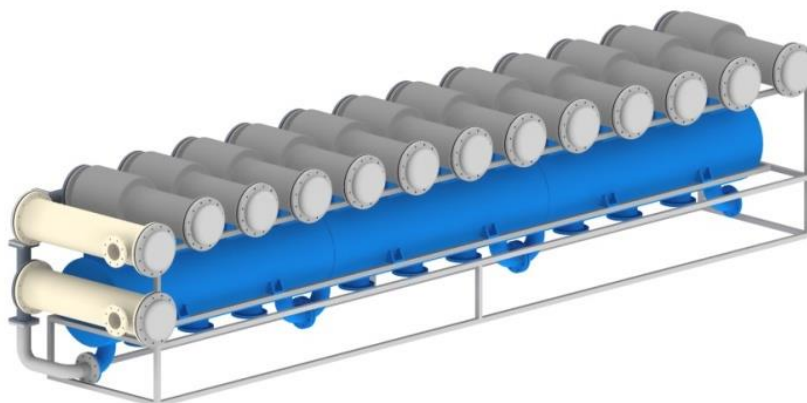
Uvedených 8 typů jednotek využívá 8 typů kondenzátorů a pouze 4 typy odpařovacích komor. Z toho vyplývá, že jeden typ odpařovací komory je použit pro dvě výkonnostní velikosti jednotek. Díky tomuto přístupu plynou úspory na návrh a výrobu odpařovacích komor. V celé modelové řadě jsou pro kondenzátory používány shodné průměry teplosměnných trubek ve dvou různých délkách (déłky jsou odlišné pro třítahové a čtyřtahové řešení trubkových prostorů kondenzátorů).

Výrobní závod, jakožto zavedený výrobce energetických zařízení, je výrobcem pouze ocelových částí jednotek. Výrobce také provádí kompletní finální montáž a předprovozní testování. Výroba sklolaminátových odpařovacích nádob je v první fázi uvádění výrobku na trh zadávána do kooperací, avšak do budoucna se uvažuje i s výrobou sklolaminátových komponent v tomto závodě. Ostatní komponenty, ze kterých se jednotky skládají, jsou nakupovány od specializovaných externích dodavatelů. Nakupované díly tvoří např. odlučovače kapek, čerpadla, kompenzátory, tvrdé těsnění, komponenty měření a regulace.

Po návrhu a technické specifikaci jednotlivých velikostí jednotek a jejich komponent byly také vytvořeny prezentační materiály, které obsahují výčet modelů celé modelové řady (viz tab. 13) vč. parametrů každého modelu, a také obecné technické informace o možnostech použití vyvinutých jednotek.

Označení jednotek vychází z následující koncepce: např. model **SA12**

Jednotka na principu MSF —
Velikost modulu jednotky —
Počet stupňů jednotky —



Obr. 42 Model jednotky SA12

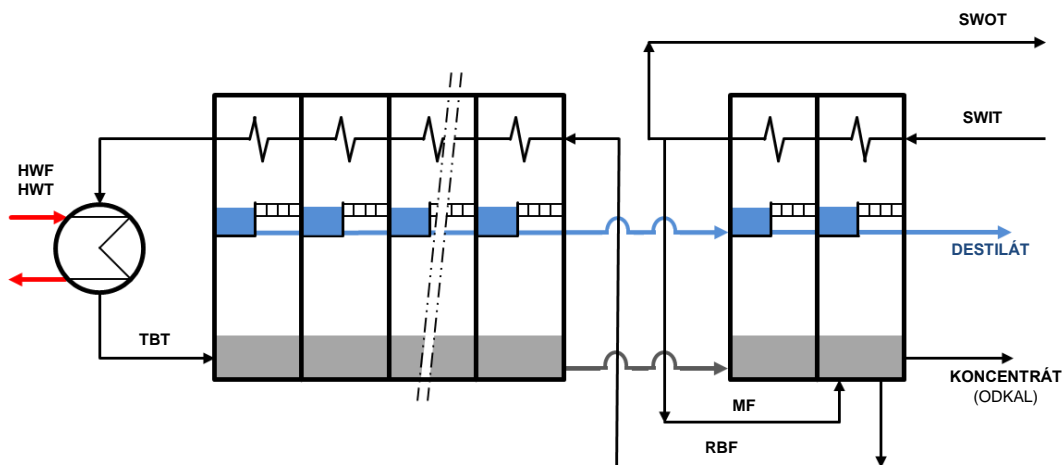
Tab. 13 Tabulka produktové řady vytvořených MSF jednotek

Model	Kapacita		Spotřeba tepla		Počet		Rozměry		
	m ³ /den	US gal/den	kW	Mcal/h	modulů	stupňů	délka	výška	šířka
					-	-	mm	mm	mm
SA04	42	11 000	695	598	1	4	2 200	1 650	1 650
SA08	56	14 800	465	400	2	8	4 000		
SA12	63	16 700	351	302	3	12	5 800		
SA16	68	17 800	281	241	4	16	7 600		
SA20	70	18 600	234	201	5	20	9 400		
SA24	72	19 100	201	173	6	24	11 200		
SC04	64	16 900	1 057	909	1	4	2 200	1 650	2 100
SC08	86	22 600	706	607	2	8	4 000		
SC12	97	25 500	532	458	3	12	5 800		
SC16	103	27 200	425	366	4	16	7 600		
SC20	107	28 300	354	305	5	20	9 400		
SC24	110	29 100	304	261	6	24	11 200		
SE04	89	23 500	1 481	1 274	1	4	3 400	2 400	1 900
SE08	119	31 500	991	853	2	8	6 200		
SE12	135	35 600	748	643	3	12	9 000		
SE16	144	38 000	598	514	4	16	11 800		
SE20	150	39 600	499	429	5	20	14 600		
SE24	154	40 800	428	368	6	24	17 400		
SH04	132	34 800	2 174	1 869	1	4	3 400	2 400	2 350
SH08	176	46 500	1 452	1 249	2	8	6 200		
SH12	199	52 500	1 095	941	3	12	9 000		
SH16	212	56 000	875	752	4	16	11 800		
SH20	221	58 300	729	627	5	20	14 600		
SH24	227	60 000	625	537	6	24	17 400		
SJ04	171	45 100	2 841	2 443	1	4	4 300	2 500	2 100
SJ08	229	60 400	1 902	1 635	2	8	7 800		
SJ12	259	68 400	1 435	1 234	3	12	11 300		
SJ16	276	72 900	1 147	987	4	16	14 800		
SJ20	288	76 000	957	823	5	20	18 300		
SJ24	296	78 200	820	705	6	24	21 800		
SL04	245	64 700	4 046	3 479	1	4	4 300	2 500	2 550
SL08	328	86 500	2 703	2 324	2	8	7 800		
SL12	370	97 800	2 037	1 752	3	12	11 300		
SL16	395	104 200	1 628	1 400	4	16	14 800		
SL20	411	108 500	1 357	1 166	5	20	18 300		
SL24	423	111 700	1 163	1 000	6	24	21 800		
SN04	553	145 900	9 119	7 841	1	4	5 900	3 200	2 850
SN08	738	195 000	6 092	5 238	2	8	10 600		
SN12	835	220 500	4 591	3 948	3	12	15 300		
SN16	889	234 900	3 669	3 155	4	16	20 000		
SN20	926	244 700	3 057	2 629	5	20	24 700		
SN24	953	251 700	2 621	2 254	6	24	29 400		
SP04	838	221 400	13 935	11 982	1	4	5 900	3 200	3 700
SP08	1 122	296 400	9 328	8 021	2	8	10 600		
SP12	1 270	335 500	7 038	6 052	3	12	15 300		
SP16	1 354	357 600	5 627	4 839	4	16	20 000		
SP20	1 411	372 700	4 692	4 034	5	20	24 700		
SP24	1 452	383 600	4 024	3 460	6	24	29 400		

Pozn. údaje jsou platné při teplotě ohřívací vody 100 °C a teplotě mořské vody 30 °C

3.7 Provozní proměnné a vazby

Na obr. 43 jsou znázorněny hlavní provozní proměnné v modelu MSF jednotky, které jsou popsány v textu dále.



Obr. 43 Schéma MSF jednotky označením důležitých proměnných

Nejvyšší teplota směsi před vstupem do odpařovací komory (TBT)

Nejvyšší teplota směsi vstupující do první odpařovací komory (tj. teplota nástřiku) má klíčovou roli při určení výkonových parametrů celé jednotky. Na tuto teplotu je směs ohřívána v dodatkovém ohříváku a v odborné literatuře se nazývá TBT – z angl. *Top Brine Temperature*. Ve schématech zapojení uvedených v kap 3.3.1 a 3.3.2 je tato teplota pod označením $T_{F,1}$. Obecně lze říci, že s rostoucí teplotou nástřiku roste i produkce celé jednotky (z důvodu vyššího poměru odpaření v každém stupni) i výkonový poměr (z důvodu snížení latentního tepla potřebného pro odpaření vody za vyšších teplot). Zároveň zvyšující se teplota nástřiku zvyšuje náchylnost teplosměnných ploch k zanášení. TBT je omezena dostupným teplem v ohřívacím médiu (teplé vody, popř. páry) a také možnostmi použitých chemikálií, které byly použity pro předúpravu napájecí vody. Horní limit TBT je dán koncentrací solí ve vodě, typem použitých chemikálií a předúpravou surové mořské vody. Maximální povolená teplota nástřiku však závisí na kritériu pro ukládání síranu vápenatého, který se přímo vztahuje ke koncentraci solí v napájecí vodě a její pH [51]. TBT bývá nejčastěji v rozmezí 70 až 120 °C v závislosti na počtu stupňů zařízení, použitých inhibitech (např. nízko nebo vysokoteplotní, dávkování kyselin) a popř. dostupné tepelné energii.

Ve výpočtech pro vyvíjené jednotky malého a středního výkonu je uvažován zdroj tepla z chladicí vody motorů pro přehřev dodatkovém ohříváku, která obvykle dosahuje teplot cca 90 až 100 °C.

Výkonový poměr (PR)

Každou jednotku pro úpravu mořské vody charakterizuje výkonový poměr (PR – angl. *Performance Ratio*). Zároveň je u každé jednotky pro úpravu mořské vody snaha o dosažení co nejvyššího výkonového poměru a zajištění stabilního provozu jednotky. Výkonový poměr je v odborné literatuře definován jako

hmotnostní poměr vyprodukovaného destilátu a spotřebované páry pro ohřev v dodatkovém ohřívači [84]:

$$PR = \frac{M_D}{M_S} = \frac{\text{produkce destilátu [kg/h]}}{\text{spotřebovaná pára [kg/h]}} \quad (17)$$

Jelikož jednotky, které jsou předmětem této práce, jsou ohřívány topnou vodou, lze pro účely této práce výkonový poměr definován jako poměr vyprodukovaného destilátu ke spotřebované tepelné energii v dodatkovém ohřívači (není však porovnatelný s výsledky výše uvedeného výpočtu):

$$PR = \frac{M_D}{Q_{BH}} = \frac{\text{produkce destilátu [kg/h]}}{\text{teplo dodané do BH [MJ]}} \quad (18)$$

Průtok napájecí vody (RBF)

Průtok napájecí vody (v zapojení bez recirkulace) nebo popř. průtok směsi napájecí vody a recirkulovaného koncentrátu (v zapojení s recirkulací) je jednou z nejdůležitějších provozních proměnných, které ovlivňují výkon celé jednotky. Tento průtok bývá v anglické terminologii nazýván *Recirculating Brine Flowrate* (RBF). Zvýšením tohoto průtoku se zvyšuje kapacita jednotky, tj. produkce destilátu, avšak je nepříznivě ovlivněn výkonový poměr (tj. do dodatkového ohřívači je potřeba přivést více tepla). RBF má také vliv na rychlost proudění v trubkách kondenzátorů, a s tím související tvorbu a ukládání vodního kamene.

RBF má přímý vliv na kapacitu jednotky a její tepelnou účinnost. Na druhou stranu může jeho snížený průtok ovlivňovat stupeň zanášení teplosměnných ploch trubek kondenzátorů nebo dodatkového ohřívači. Tímto sníženým průtokem jsou sníženy abrazivní účinky částic obsažených ve vodě a následně může dojít ke zvýšenému zanášení trubek. Všechny procesy zanášení jsou časově závislé, což způsobuje, že se projeví až za delší dobu provozu. Většina protiusazovacích přípravků prodlužuje "indukční období", během něhož je snížena schopnost srážení a jakýkoli faktor, který zvyšuje dobu zdržení, zvyšuje možnost znečištění. Snížený průtok recirkulovaného koncentrátu může mít tudíž za následek zvýšení znečištění teplosměnných trubek [51].

Nicméně, pokud bude RBF změněn, bude muset být upraven návrh teplosměnných ploch, protože provozní bod nebude v souladu s návrhovým provozním bodem.

Je-li průtok RBF nízký, nemusí být dostačující tlaková izolace jednotlivých stupňů, jež je zajištěna speciálně navrženými vodními zámky. Provoz jednotky bude nestabilní a neefektivní. Bude-li průtok příliš vysoký, může dojít k zaplavení odpařovací komory a následné kontaminaci destilátu slanou vodou. Po kontaminaci ploch odpařovací komory slanou vodou, které s ní nejsou běžně v kontaktu, trvá jejich dekontaminace poměrně dlouhou dobu.

Z výše uvedených důvodů je spodní hranice RBF stanovena tak, aby se zabránilo problémům s usazováním způsobených nízkou rychlostí vody v dodatkovém ohřívači nebo varu v jeho trubkách. Horní hranice je dána tak, aby se zabránilo erozi trubek nebo zaplavení odpařovací komory a následné kontaminaci destilátu. Obvykle jsou jednotky MSF provozovány v blízkosti horní hranice RBF.

Průtok a teplota ohřívací vody (HWF, HWT)

V dodatkovém ohříváku je potřeba ohřívací voda o nízkém tlaku (např. $p < 1$ bar(g)). Průtok a teplota ohřívací vody (HWT – angl. *Hot Water Temperature*) ovlivňuje hodnotu TBT a tedy i celkovou kapacitu zařízení. Například, v případě značného zanesení teplosměnných trubek ohříváku, je potřeba vyšší teploty nebo průtoku ohřívací vody (HWF – angl. *Hot Water Flowrate*) k dosažení požadované TBT a kapacity jednotky. Toto zvýšení teploty ohřívací vody zapříčiní u zanesených trubek vysokou teplotu na jejich stěnách a lokální přehřátí, což způsobí další nárůst zanesené vrstvy, a to vede nakonec k selhání trubky.

Vstupní a výstupní teplota mořské vody (SWIT, SWOT)

Teplota vod ve světových mořích se pohybuje v rozmezí 0,5 až 35 °C, avšak v Arabském moři, kde se nachází většina odsolovacích stanic na principu MSF, se pohybuje v rozmezí od 14 °C (v zimě) do 35 °C (v létě) [17].

Účinnost MSF odsolovacích jednotek závisí na stupni odpaření, který je dán diferencí mezi TBT a vstupní teplotou mořské vody do sekce HJS. Při vysokých teplotách vstupní (chladicí) mořské vody dochází k menšímu stupni odpaření v komorách HJS sekce a tím je menší i celková kapacita zařízení. Z tohoto důvodu by měl být průtok RBF i teplosměnné plochy výměníků navrženy na dané konkrétní pracovní podmínky. Při nízkých teplotách mořské (chladicí) vody se mění termodynamický stav všech odpařovacích komor. Tlak v odpařovacích komorách se sníží v souladu s poklesem teploty nasycení. Tento jev na druhou stranu ovlivňuje RBF mezi jednotlivými stupni, protože se mění i tlaková ztráta mezi jednotlivými stupni. Kromě toho se zvyšuje rychlost páry z důvodu poklesu její hustoty a souvisejícího zvýšení jejího objemu.

Za účelem kompenzace provozních odchylek od konstrukčních podmínek, bývá v malých a středních MSF jednotkách snižováno dosažené vakuum otevřením přísávacího jehlového ventilu, kterým je do zařízení přísáván vzduch. Snížené vakuum zapříčiní návrat procesu v jednotce zpět na její optimální výpočty plánované provozní podmínky. U velkých jednotek je v zimních podmínkách (tj. při chladné mořské vodě) využita recirkulace chladicí vody v sekci HJS pro dosažení vyšší vstupní teploty chladicí mořské vody. Průtok recyklované ohřáté mořské vody nemusí být dostatečný pro požadovanou celoroční konstantní provozní teplotu, proto většina velkých odsolovacích jednotek pracuje v zimním období s nižší teplotou mořské vody, tj. za jiných provozních podmínek než v létě. Tím je minimalizována doba provozu systému recirkulace chladicí vody, jakož i celková spotřeba el. energie recirkulačních čerpadel.

Průtok doplňovací vody (MF)

Další z provozních proměnných při provozu MSF jednotek je průtok doplňovací vody (MF – angl. *Make-Up Flowrate*). Se zvyšujícím se průtokem doplňovací vody klesá salinita výsledné směsi recirkulovaného koncentrátu a doplňovací (napájecí) vody (tj. RBF), což vede ke snížení relativní hustoty této směsi a následnému snížení jejího bodu varu. Důsledkem vyššího MF je nižší spotřeba dodávané tepelné energie, nižší obsah solí ve vystupujícím koncentrátu (odkalu) a následně lze očekávat i zvýšení poměrného výkonu (PR). Dolní mez průtoku doplňovací vody závisí na koncentraci solí v proudu recirkulovaného

koncentrátu. Horní mez se mění s průtokem chladicí mořské vody a výkonem čerpadla mořské vody. Většinou pracují MSF jednotky s velkým poměrem doplňovací vody.

3.7.1 Zvyšování efektivity provozu jednotky

Výše uvedených proměnných se využívá i při modelování a zvyšování efektivity provozu odsolovacích jednotek. Zvyšováním efektivity procesu odsolování ve fázi návrhu, výroby, provozu a plánování provozu lze dosáhnout vylepšení celého procesu, a také zajistit delší životnost jednotky [85].

Cíle zvyšování efektivity provozů MSF jednotek jsou:

- minimalizace energetické náročnosti (tj. maximalizace výkonového poměru)
- stabilní provoz (tj. optimální hladina koncentrátu v odpařovacích komorách)
- zamezení zanášení teplosměnných ploch (správným nastavením TBT a rychlostí v teplosměnných trubkách)
- minimalizace použitého množství protiusazovacích a protipěnicích chemikálií.

Maximalizace výkonového poměru se provádí vhodným nastavením těchto hlavních procesních proměnných:

- TBT
- průtok recirkulovaného koncentrátu (RBF)
- průtok doplňkové vody (MF).

V návaznosti na výše uvedený text a obecné principy metody MSF lze tedy uvést tyto hlavní omezující podmínky celého procesu:

- horní limit TBT (z důvodu omezení zanášení teplosměnných ploch)
- interval průtočných rychlostí trubkami (zanášení, eroze)
- teplota doplňkové vody MF (měla by být na úrovni teploty koncentrátu z posledního stupně)
- horní limit koncentrace solí v odkalovaném koncentrátu.

Produkce destilátu se zvyšuje se zvyšujícím se průtokem RBF, protože se zvýší teplotní rozdíl mezi jednotlivými stupni. Na druhou stranu se zvýšený průtok nepříznivě projevuje na výkonovém poměru (PR) a na vyšších nárocích na použité chemikálie. Maximální průtok recirkulovaného koncentrátu (RBF) je limitován maximální rychlostí v trubkách kondenzátorů. Nad rychlostí 2,0 m/s může docházet k erozi a při rychlostech pod 1,5 m/s se snižuje součinitel přestupu tepla, a zvyšuje se riziko zanášení teplosměnných ploch [51], [85].

Se zvyšujícím se průtokem doplňující mořské vody (MF) se snižuje slanost odkalovaného koncentrátu i s tím související jeho relativní hustota, bod varu a další termodynamické vlastnosti. Proměnná MF je limitována max. koncentrací solí v odkalovaném koncentrátu a průtokem vody v trubkách kondenzátoru (1,5 až 2,0 m/s).

Jak je z výše uvedeného patrné, na kapacitu jednotky a její výkonový poměr má hlavní vliv TBT a RBF. Z tohoto důvodu je zapotřebí těmto dvěma proměnným věnovat značnou pozornost při simulacích a vhodných nastaveních celého procesu.

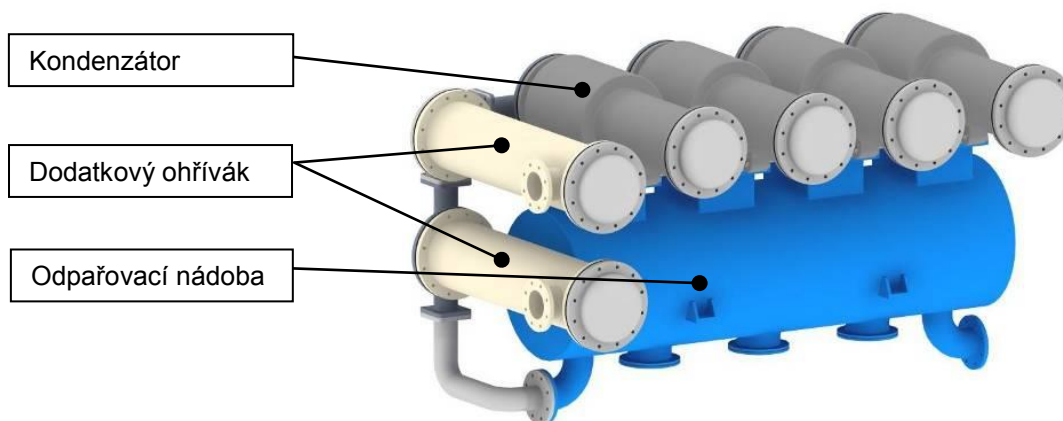
V následující kapitole je popsána výroba experimentálních jednotek, které jsou předmětem řešení této dizertační práce.

4 VÝROBA EXPERIMENTÁLNÍCH JEDNOTEK

V této kapitole je popsána výroba experimentálních jednotek, které jsou předmětem řešené dizertační práce. Cílem dizertační práce je provedení jednotlivých vývojových fází, jako je návrh, výroba, testování a komplexní vyhodnocení modulového zařízení pracujícího na principu destilace pro úpravu mořské vody. Převážná část práce je tak zaměřena na vývoj zařízení MSF s víceúrovňovou destilací. Byly také provedeny významné vývojové fáze u destilačního zařízení typu ME.

4.1 Experimentální jednotka MSF

Princip víceúrovňové mžikové destilace MSF je podrobně popsán v kap. 2.1.1. Experimentální jednotka MSF (viz obr. 44 a obr. 47) byla na základě výchozího návrhu popsaného dle kap. 3 vyrobena ve firmě PBS INDUSTRY, a.s. v Třebíči. V jejím areálu bylo provedeno i základní zprovoznění celé jednotky a následné testování. Výchozí návrh experimentální jednotky včetně jejího základního uvedení do provozu si vyžádal rok usilovné práce.



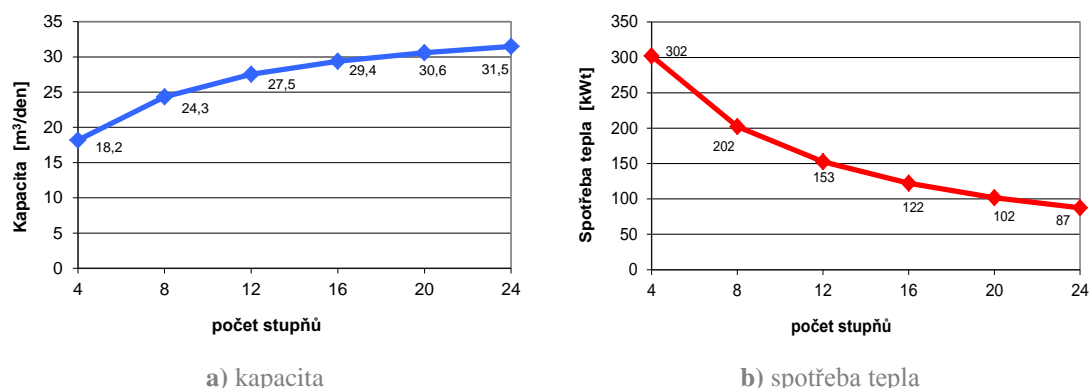
Obr. 44 Model experimentální jednotky MSF

4.1.1 Konstrukce a návrh

Cílem konstrukce experimentální jednotky MSF bylo ověření funkčnosti návrhu jednotlivých zařízení, inovativních prvků a také seznámení se s provozními a realizačními aspekty jednotky vakuové destilace. Na vývoj nebyly poskytnuty žádné dotace, a z tohoto důvodu byly některé části zařízení vyrobeny z jiných (levnějších) materiálů, než jaké bude nutno použít při výrobě zařízení pro trvalý provoz (např. s životností 20 let).

V návaznosti na tepelné a konstrukční výpočty byla navržena experimentální jednotka MSF, která byla konstruována pro denní produkci destilátu cca 20 m³/den. Její výkon závisí hlavně na teplotě dostupné ohřívací a napájecí vody. Na obr. 45 jsou uvedeny výpočtové parametry experimentální jednotky. Ta obsahovala 1 modul

skládající se ze 4 stupňů. V uvedených grafech je vidět vypočtená závislost kapacity a tepelné spotřeby na počtu použitých stupňů jednotky.



Obr. 45 Výpočtové parametry experimentální jednotky v závislosti na počtu stupňů
(data platí pro teplotu ohřívací vody 100 °C a teplotu mořské vody 30 °C)

Rozvaděč elektro a MaR byl v případě první experimentální jednotky MSF navržen pouze jako soustava několika jističů, kterým byla jištěna čerpadla. Použitý přístroj pro měření slanosti (Jumo Aquis 500) nebyl osazen do rozvaděče, ale byl umístěn samostatně na panel.

4.1.2 Použité materiály a jejich vlastnosti

Před zahájením výroby jednotky bylo rozhodnuto, že při výrobě tohoto experimentálního kusu nebudou všechny použité materiály ve vysoké jakosti, které by umožnily trvalý provoz jednotky (např. 20 let), a to ze dvou důvodů. Prvním je úspora finančních nákladů při výrobě experimentálního kusu a druhým důvodem jsou jisté výhody při použití jiných materiálů (např. odpařovací nádoba z oceli, namísto sklolaminátu, která umožňuje v případě potřeby určitou úpravu vstupních a výstupních hrdel, popř. navaření potřebných návarků pro dodatečně zjištěnou potřebu měření).

Největší odlišností experimentální jednotky od její sériové podoby spočívají v použitých materiálech odpařovací nádoby a trubkovnic. Trubkovnice kondenzátorů i dodatkového ohříváku byly z důvodu finančních úspor vyrobeny z austenitické oceli a při sestavování trubkových svazků byly přivařeny přímo k plášti daného výměníku. Správná (odolná) konstrukce spočívá v použití mosazných nebo bronzových trubkovnic a jejich připevnění k přírubě na plášti výměníků stahujícími šrouby (jako na obr. 46b, obr. 49a). Použité materiály v konstrukci experimentální jednotky MSF jsou uvedeny v tab. 14.

Tab. 14 Vhodné vs. použité materiály v experimentální jednotce MSF [15], [51]

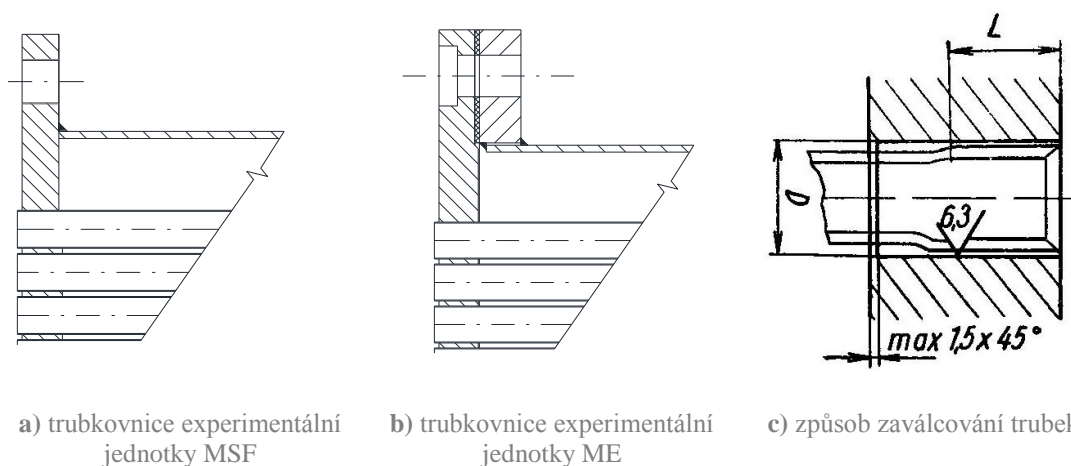
Díl MSF	Médium	Materiál	
		vhodný	použitý
teplosměnné trubky	mořská voda	CuNi 90/10 CuNi 70/30 CuZn20Al2As	CuNi 90/10
trubkovnice	mořská voda	CuNi 90/10 CuZn40	AISI 316L
víka výměníků	mořská voda	CuNi 90/10 uhl. ocel s pogumováním sklolaminát	AISI 316L
plášť kondenzátorů	pára, destilát	AISI 316L	AISI 316L
plášť ohříváků	topná voda	uhl. ocel	uhl. ocel
odpařovací nádoba	mořská voda	CuNi 90/10 uhl. ocel s pogumováním sklolaminát	uhlíková ocel

4.1.3 Strojní výroba

Veškerá strojní výroba i celková montáž probíhala ve výrobním závodě PBS INDUSTRY, a.s., která disponuje veškerou technickou infrastrukturou i dlouholetými zkušenostmi ve výrobě energetických zařízení. Při výrobě je potřeba dodržovat vysoké nároky a standardy pracovních postupů, díky kterým je zajištěna požadovaná excelentní jakost výrobku. Samozřejmostí při prováděné strojní výrobě je využívání vizuálních a dalších nedestruktivních zkoušek jakosti svařovaných spojů. Jednotlivé díly prochází po dokončení tlakovými zkouškami, aby bylo ověřeno tlakotěsné provedení všech svařovaných i válcovaných spojů.

Výroba rozvaděče proběhla také ve výrobním závodě PBS, jelikož tento závod disponuje i vysoce moderním zázemím pro výrobu a kompletaci rozvaděčů.

Jak již bylo zmíněno, trubkovnice kondenzátoru experimentální jednotky byla k plášti kondenzátoru připevněna zjednodušeným (levnějším) způsobem (viz obr. 46a). Na obr. 46b je znázorněné spojení trubkovnice s pláštěm kondenzátoru správným způsobem. Tento způsob spojení a vhodný materiál trubkovnice byl použit u experimentální jednotky ME. Hloubka zaválcování trubek nesmí být přes celou tloušťku trubkovnice (viz obr. 46c).



Obr. 46 Trubkovnice a způsob válcování trubek

4.1.4 Sestavení kompletní jednotky

Po výrobě jednotlivých komponentů vyráběné jednotky následovala její celková kompletace. Při kompletaci je velmi důležité dbát na řádné utěsnění všech spojů, a to hlavně těch, které jsou ve styku s velmi nízkým tlakem. U vyráběných odsolovacích jednotek jsou všechny přírubové spoje těsněny měkkým těsněním (tj. gumovým nebo silikonovým) těsněním, které zajistí po použití předepsaného utahovacího momentu dobrou těsnost těchto spojů. Po kompletaci celé jednotky je velmi důležitým krokem tlaková zkouška celkového sestavení jednotky. Ta probíhá zaslepením všech přípojných hrdel těch prostorů, ve kterých se za provozu vyskytuje velmi nízký tlak, a následným natlakováním tohoto prostoru tlakovým vzduchem na přetlak max. 1 bar. Po natlakování je těsnost spojů ověřována aplikací vhodného roztoku (např. mýdlové vody) a případná netěsnost je indikována tvořením malých bublin v místě netěsnosti.

Další tlaková zkouška následuje po sestavení jednotlivých zařízení a jejich zapojení do okruhů cirkulujících vod pro nalezení dalších případných míst netěsností.



Obr. 47 Experimentální jednotka MSF

4.1.5 Uvedení do provozu

Sekvence činností při uvádění jednotky do provozu je takové, že se nejprve spustí zařízení pro vytvoření podtlaku, poté se spustí systémy pro cirkulaci napájecí mořské vody a následně se začne přivádět teplo z externího zdroje.

4.2 Demonstrační jednotka MSF

Cílem každého komerčně vyvíjeného produktu je jeho prodej a s tím související vytváření zisku komerční společnosti. Každého zákazníka před zakoupením jakéhokoliv zařízení velmi zajímají reference nabízeného produktu. Z důvodů zajištění výchozích referencí, a také z důvodu provedení dlouhodobých funkčních zkoušek v reálném prostředí, byla na základě zkušeností s výrobou a zprovozněním experimentální jednotky MSF vyrobena demonstrační jednotka MSF (viz obr. 48), která byla nainstalována a pracovala na egyptském pobřeží po dobu jednoho roku.

Tato demonstrační jednotka použila provedení kondenzátorů z experimentální jednotky, avšak odpařovací nádoba musela být vyrobena z vhodnějšího materiálu. Také konstrukce odpařovací nádoby byla postupně optimalizována. Z konstrukčního a výrobního hlediska se dospělo k závěru, že je zapotřebí experimentálně ověřit variantu provedení odpařovací komor jednotky ze samostatných odpařovacích komor. Důvodem byla větší modularita celé jednotky a snadnější výměna při případných závadách. Materiálem nádob byl zvolen CuNi 90/10. Při sériové výrobě se však také počítá se sklolaminátovými materiály. Demonstrační jednotka byla navržena na produkci odsolené vody cca 20 m³/den.

Při výrobě demonstrační jednotky MSF byl vyvinut poloautomatický rozvaděč elektro a MaR, jenž nyní tvoří obvyklou součást všech vyráběných jednotek.

Zapojení demonstrační jednotky MSF a popis jejího provozu je podrobně popsán v kap. 5.3.2.



Obr. 48 Demonstrační jednotka MSF

4.3 Experimentální jednotka ME

Princip odsolování metodou ME je podrobně popsán v kap. 2.1.2. Experimentální jednotka byla navržena jako dvoustupňová s plánovanou produkcí sladké vody 35 m³/den. Výroba experimentální jednotky ME proběhla stejně jako u ostatních jednotek ve společnosti PBS INDUSTRY, a.s. Při řešení specifických konstrukčních prvků jednotky i při její výrobě se vycházelo ze zkušeností získaných při výrobě i uvádění do provozu experimentální jednotky MSF.

4.3.1 Konstrukce a použité materiály

Experimentální jednotka ME je vyrobena z materiálů, které umožňují její dlouhodobý provoz (desítky let), což ji předurčuje ke komerčnímu využití u koncového zákazníka po absolvování různých experimentů ve výrobním závodě. Na vývoj nebyly, stejně jako u experimentální jednotky MSF, poskytnuty žádné dotace.

Záměrem konstrukční fáze této jednotky bylo provedení významného množství inovací, které zajistí výrobku tržní výhody, díky kterým bude výrobek jednoznačně konkurenceschopný. Výčet vhodných konstrukčních materiálů i materiálů použitých při výrobě experimentální jednotky ME jsou uvedeny v tab. 15. Materiálové listy použitých materiálů pro výrobu tepelných výměníků jednotky ME jsou uvedeny v příloze 6 až 8.

Záměrem důkladných experimentálních zkoušek této experimentální jednotky bylo seznámit se s touto metodou destilace a provést případné experimenty s nekonvenčním použitím této jednotky (např. zkouška zahušťování zbytkového fugátu z bioplynové stanice).

Tab. 15 Vhodné vs. použité materiály v experimentální jednotce ME [15], [51]

Díl ME	Médium	Materiál	
		vhodný	použitý
teplosměnné trubky	mořská voda	CuNi 90/10 CuNi 70/30 CuZn20Al2As	CuZn20Al2As
trubkovnice	mořská voda	CuNi 90/10 CuZn40	CuZn40
víka výměníků	mořská voda	CuNi 90/10 uhl. ocel s pogumováním sklolaminát	sklolaminát
plášť kondenzátoru	pára, destilát	AISI 316L	AISI 316L
plášť ohříváku	topná voda	uhl. ocel AISI 316L	AISI 316L
odpařovací nádoba	mořská voda	CuNi 90/10 uhl. ocel s pogumováním sklolaminát	sklolaminát

Postup strojní výroby i celkového sestavení experimentální jednotky ME byl téměř totožný s postupem u experimentální jednotky MSF. Jednou z výjimek byla montáž všech trubkovnic, které byly všechny připevňovány k přírubě výměníku stahovacími šrouby. Mezi nerezovými přírubami a mosaznými trubkovnicemi bylo použito tvrdé těsnění. Sestavení trubkovnice kondenzátoru a jeho pláště je znázorněno na obr. 46b. Při zaválcování trubek výměníků i kondenzátorů do trubkovnic došlo při výrobě k mírnému prohnutí trubkovnic směrem ven v ose trubek. Důvodem byly značné axiální síly od zaválcovaných trubek. Po prohnutí trubkovnic byly u vývojových pracovníků produktu obavy o dostatečnou tlakotěsnost výměníků. Tlakotěsnost byla opět ověřena po sestavení jednotlivých dílů celé jednotky, byla dostatečná a neohrožila tedy nežádoucí přísávání vzduchu, které by neblaze ovlivnilo provoz celé jednotky.

Rozvaděč elektro a MaR byl u experimentální jednotky MSF použit již standardní poloautomatický, jenž byl vyvinut pro demonstrační jednotku MSF a následně úspěšně odzkoušen při dlouhodobém provozu v Egyptě.

4.3.2 Sestavení jednotky a její uvedení do provozu

Postup při sestavování experimentální jednotky ME byl shodný jako při sestavování jednotky experimentální i demonstrační MSF. Lze říci, že se jedná o již zavedené a osvědčené postupy, které jsou a nadále budou aplikovány při výrobě i sestavování jednotek. Pohled na sestavenou jednotku ME je na obr. 49b.

Uvádění do provozu je taktéž shodné jako u jednotek MSF.



a) sestavení kondenzátoru



b) po kompletním sestavení

Obr. 49 Experimentální jednotka ME

Následující kapitola popisuje proběhlé experimenty na experimentálních jednotkách a vyhodnocuje výsledky proběhlých měření.

5 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ

Tato kapitola pojednává o uskutečněných experimentech na vyrobených experimentálních jednotkách, seznamuje s hlavními výsledky experimentálních měření a plánováním experimentů.

Experimenty slouží v dobrých podnicích k návrhu nových produktů či procesů, nebo ke zlepšování současných produktů či procesů. Průmyslové podniky jsou však zakládány proto, aby podnikaly a vytvářely zisk, a proto musí být experimentování co nejvíce efektivní (stejně jako všechny ostatní činnosti v podniku). Cílem vhodně navrženého experimentu je získání co nejvíce informací za co nejmenší cenu. Experiment je potřeba naplánovat co nejefektivněji. Fáze plánování experimentu vyžaduje co možná nejhlubší teoretické i praktické znalosti o zkoumaném výrobku či procesu.

Pod pojmem experimentovat se rozumí měnit obvyklé pracovní podmínky s cílem nalézt nejlepší odezvu a současně získat hlubší poznatky o vlastnostech výrobku nebo výrobního procesu.

Navržené a vyrobené jednotky MSF a ME byly podrobeny ověření jejich vlastností na zkušebně jejich výrobce. Hlavní cíle plánovaných experimentů u experimentálních jednotek MSF a ME byly:

- ověření funkce jednotlivých zařízení u částí experimentálních jednotek MSF a ME
- ověření inovativních prvků v konstrukci zařízení
- prověření provozních vlastností jednotek za různých provozních podmínek
- vylepšení konstrukce či řízení celého procesu na základě obdržených experimentálních výsledků.

Navíc, jak bylo zmíněno v předchozích kapitolách, byla experimentální jednotka MSF přebudována po provedených experimentech na demonstrační jednotku, která slouží k ověření vlastností za reálných podmínek na egyptském pobřeží.

5.1 Předpoklady pro experiment

Provedení plánovaných experimentů vyžadovalo splnění několika základních předpokladů. Ty hlavní jsou blíže diskutovány v následujících odstavcích.

5.1.1 Mořská voda

Jelikož se zkušebna experimentálních jednotek nenachází u zdroje mořské vody, bylo nutné si mořskou vodu uměle vytvořit. Pro experimentální účely dostačuje vytvoření roztoku obyčejné vody a kuchyňské soli. Na konci procesu je vzniklý destilát a koncentrát přiváděn z experimentálního okruhu zpět do nádrže, kde dojde ke smísení za opětovného vniku napájecí vody o původní koncentraci soli.

5.1.2 Zdroj tepla

Pro provedení experimentů je potřebný zdroj tepla (pro dodatkové ohříváky). Teplo bylo přiváděno ve formě teplé vody do dodatkových ohříváků testovaných experimentálních jednotek. Ve zkušebně výrobce je k dispozici pára z parních kotlů. Energie v páře byla transformována ve výměnících pára-voda do teplé vody, která již byla pro ohřev experimentálních jednotek vhodná. V praxi jsou často zdrojem tepla pro dodatkové ohříváky spalovací motory, které produkují značné odpadní teplo. Alternativou jsou také průmyslové kotle pro spalování různých druhů paliv.

5.1.3 Zdroj chladu

Každé odsolovací zařízení musí být chlazeno. Chlazením posledního kondenzátoru (popř. několika kondenzátorů) se zajistí dostatečná kondenzace par posledního stupně (stupňů). Ve zkušebně výrobce slouží jako zdroj chladu nádrž studené vody o objemu 20 m³, jejíž chladicí kapacita je za krátkou dobu vyčerpána. V praxi se nejčastěji chladí mořskou vodou, která je po průchodu zařízením odvedena zpět do moře.

5.1.4 Měřicí trať a měřidla

Jedním ze základních předpokladů experimentu je sestavení měřicí trati, do které je testovaný výrobek osazen. Měřicí trať musí být vybavena potřebnými měřidly, aby bylo o proběhlém experimentu k dispozici co nejvíce užitečných informací k jeho následné analýze. Měřicí trať proběhlých experimentů jsou detailně popsány v následujících odstavcích.

Popis měřicí trati

Pro potřeby testování a měření vyrobených jednotek MSF i ME byla navržena a sestavena měřicí trať, která byla složena z potřebných provozních i měřicích prvků. Trať je umístěna v areálu výrobce jednotek v Třebíči. Pohled na trať se zapojenou experimentální jednotkou MSF je na obr. 50. Schéma zapojení měřicí trati jednotky MSF je znázorněno na obr. 51 a pro jednotku ME na obr. 52.

Měřicí trať je tvořena několika nezávislými okruhy pro distribuci provozních médií. Konkrétně jde o tyto okruhy:

- napájecí vody
- ejektorové vody
- chladicí vody (v případě potřeby zapojení jednotky s HJS sekci)
- ohřívací vody.

Okruh napájecí vody se skládá z nádrže napájecí vody, napájecího čerpadla, napájecího potrubí a armatur. V odsolovací jednotce probíhá destilace a vystupuje z ní proud koncentráту a destilátu. Tyto oba proudy jsou následně smíchány za vzniku směsi napájecí vody o původní koncentraci. Slaná voda byla pro potřeby experimentu vytvořena smícháním obyčejné vody a potřebného množství NaCl. Tím vznikla „mořská“ voda o požadovaném obsahu rozpuštěných solí.

Rozvody neagresivních médií byly řešeny potrubím z uhlíkové oceli. Rozvody bez kontaktu se slanou vodou byly řešeny plastovým potrubím.

Okruh chladicí vody byl využíván pouze v případě zapojení jednotky se separátním chlazením posledních dvou stupňů jednotky (tj. HJS sekcí). Oba okruhy byly složeny opět z čerpadel, potrubí, armatur a nádrže. Jelikož zásobní nádrž napájecí vody s čerpadlem byla umístěna ve vedlejším stavebním objektu, tak bylo propojení mezi jednotlivými objekty provedeno hadicovým spojením, které bylo instalováno pouze v případě probíhajících experimentů.

Okruh ohřivací vody slouží pro distribuci teplé vody, která je zdrojem tepelné energie pro zkoumané jednotky. Okruh byl složen z výměníku pára-voda (zdrojem tepla na zkušebně byly parní kotle), expanzní nádrže, čerpadla, potrubí a armatur.

Ejektorový okruh slouží pro distribuci tlakové vody pro činnost vodoproudých ejektorů. Okruh byl složen ze zásobní nádrže ejektorové vody, čerpadla, potrubí a armatur.

Všechny okruhy byly vybaveny potřebnou instrumentací pro získání důležitých provozních parametrů a měřených odezev. Při experimentálních měřeních byly zaznamenávány i takové hodnoty, které byly snímány přímo na komponentech zkoumané jednotky. Většina měřicích míst pro tyto hodnoty není ve standardním rozsahu dodávky jednotky, jelikož nejsou tyto hodnoty při běžném provozu jednotky pro koncového uživatele důležité. Na druhou stranu byly tyto hodnoty velmi důležité při prováděných experimentech, a tudíž byla experimentální jednotka těmito měřicími místy vybavena. Konkrétně šlo o měřicí místa teploty napájecí vody mezi jednotlivými kondenzátory a místa pro měření podtlaku v odpařovacích komorách.

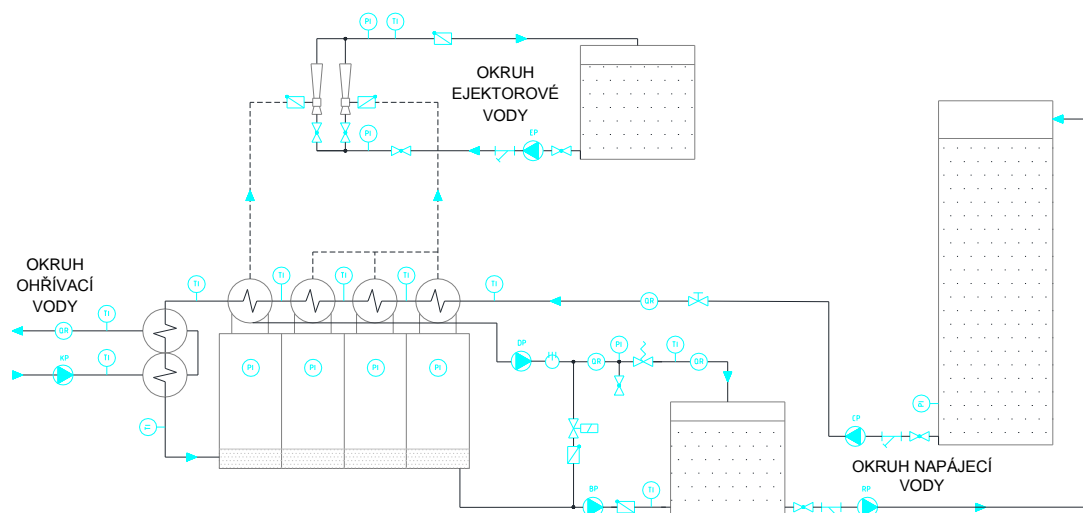
Měřicí trať byla vybavena analogovými i digitálními snímači pro měření fyzikálních veličin. Měřicí trať byla osazena následujícími snímači pro měření:

- **Teploty** – pro měření teploty v laboratoři byl využíván digitální laboratorní teploměr T352 s teplotním rozsahem -50 až $+70$ °C s přesností $\pm 0,5$ °C. Pro měření teploty proudů v potrubí a konkrétních prvcích byl použit tříkanálový teplotní datalogger T410 s teplotním rozsahem -100 až $+1300$ °C, přesností 0,5 % a teplotními články typu K. Teplotní články byly zavedené do jímek instalovaných v potrubí. Rovněž byly v měřicí trati instalovány i analogové teploměry TR 60. Pro potřeby kontroly teplot v jiných místech, než byly nainstalovány jímky, byl používán bezkontaktní teploměr T026 s rozsahem -50 až $+900$ °C a přesností ± 2 °C.
- **Relativního tlaku** – každá z odpařovacích komor byla vybavena analogovým manometrem 3402 s rozsahem 0 až 100 kPa a přesností 0,6 % nebo manometrem 03358-AZ s přesností 2 %.
- **Průtoku** – byly použity průmyslové axiální turbínové průtokoměry typ TT-WHHY a TT-KDSHY od výrobce Maddalena. Průtokoměry byly vybaveny impulzními výstupy typu REED. Pro měření produkce destilátu je obecně každá jednotka v základním provedení vybavena průtokoměrem, jehož typ odpovídá hodinové kapacitě zařízení.

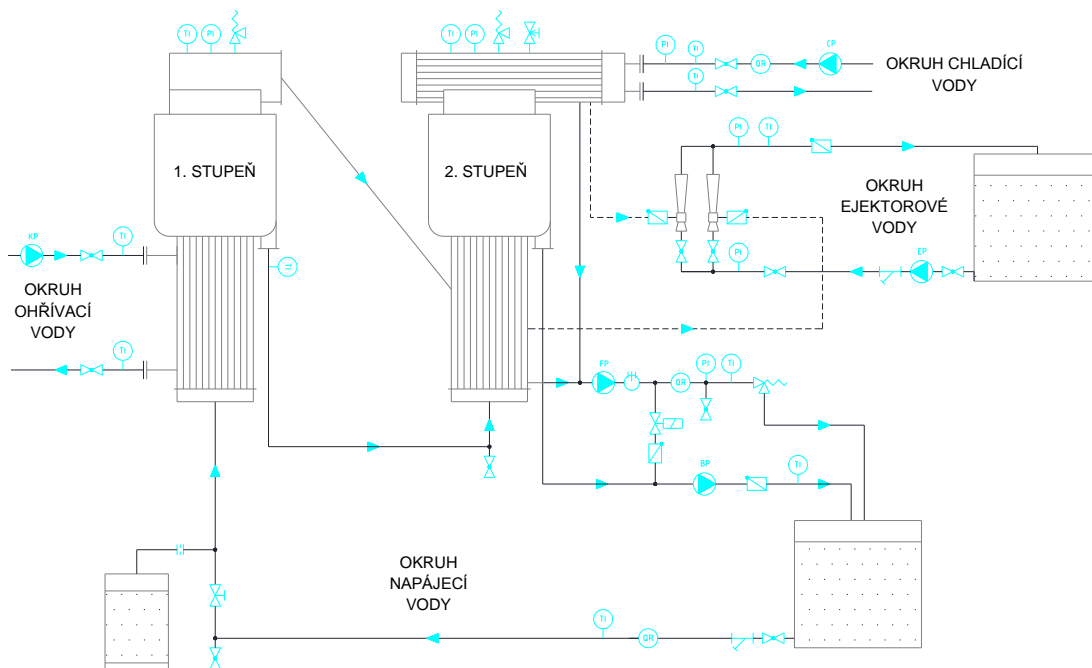
Odečítání hodnot jednotlivých snímačů z měřicího systému bylo v průběhu experimentu či předběžných zkoušek řízeno experimentátorem.



Obr. 50 Měřicí trat experimentální jednotky MSF



Obr. 51 Schéma zapojení měřicí trati experimentální jednotky MSF



Obr. 52 Schéma zapojení měřicí trati experimentální jednotky ME

5.2 Příprava a plánování experimentu

Před každým experimentem je nutné detailně naplánovat jeho průběh. Plánováním experimentů se zabývá Metoda plánování experimentů (angl. *Design of Experiments* – DOE) a vychází ze známého poznatku, že teprve při různém nastavení vstupů a pozorováním příslušné odezvy na výstupu, je možné proces řádně poznat a poté zlepšovat. Nastavení vstupních parametrů (faktorů) je v DOE prováděno plánovitě a tvoří tzv. plán experimentu.

DOE nabízí značné množství možností k poznání a zlepšování výrobků či technologických procesů. Hlavní cíle DOE jsou však dva [86]:

- zjistit, které z faktorů, vstupujících do procesu, jsou pro sledovaný výstup rozhodující
- nalézt optimální nastavení klíčových vstupů.

Obecně lze experimentální postupy rozdělit do těchto skupin:

- experimenty neplánované (živelné)
- experimenty plánované.

Plánované experimenty se řídí plánem experimentu, který stanovuje tři charakteristiky (tzv. „3P“) [87]:

- počet pokusů, ze kterých se experiment skládá
- podmínky, za kterých se jednotlivé pokusy uskuteční
- pořadí pokusů.

Z výše uvedeného je zřejmé, že se v praxi rozlišuje význam těchto pojmů:

- pokus - zjištění hodnoty ukazatele kvality za určitých, předem plánovaných, podmínek výroby
- experiment - systém všech pokusů.

Faktory vstupující do procesu budou ve vybraných částech následujícího textu pro větší přehlednost a srozumitelnost nazývány vstupními proměnnými.

5.2.1 Teorie plánování experimentů

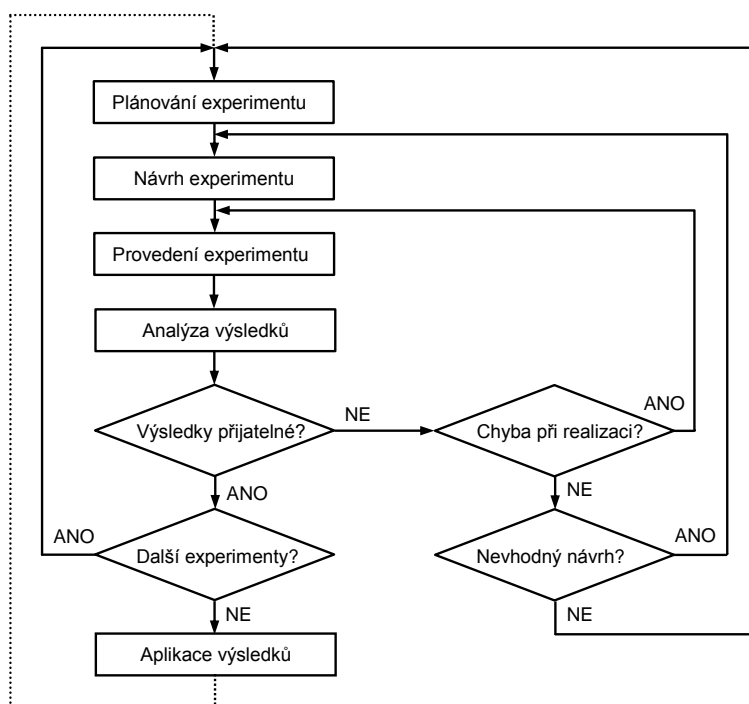
Plánování experimentů slouží jako velmi účinný nástroj předvýrobní etapy každého výrobku nebo předprovozní etapy každého procesu. Umožňuje nalézt faktory, které nejvýznamněji ovlivňují výrobní proces i jeho výstupy a stanovit také jejich optimální hodnoty. Dle [87] lze tedy říci, že plánování experimentů je matematickým prostředkem, který umožní výrobcům kvantifikovat významnost vstupů, které jsou na počátku vytypované jako pravděpodobně vlivné. Dále DOE stanoví, jak vybrané vstupy nastavit, aby proces dosahoval požadovaných výstupů při maximální stabilitě (tedy minimální variabilitě) a odolnosti proti tzv. šumům, tj. nepředvídatelným negativním vlivům na proces [88]. Disciplína plánování experimentů využívá poznatků matematické statistiky i teorie pravděpodobnosti [89].

DOE je mimo fázi plánování experimentu i souhrn dalších několika činností. Tyto činnosti, ze kterých by se měl skládat každý experiment, lze rozdělit do následujících několika etap [90]:

- stanovení cíle experimentu
- plánování (příprava) experimentu
- vlastní návrh experimentu
- provedení experimentu
- analýza výsledků
- aplikace výsledků.

Zpravidla se začíná experimentovat v situaci, kdy není dostatek znalostí o daném procesu nebo o výrobku, aby bylo jedním experimentem (pokusem) rovnou nalezeno optimální řešení či nastavení daného výrobku či procesu. Proto je prováděna řada drobnějších experimentů, v jejichž průběhu se tím dozvídá o procesu či výrobku více informací a dostává se do blízkosti optima.

Grafické znázornění postupu experimentování je znázorněno na obr. 53.



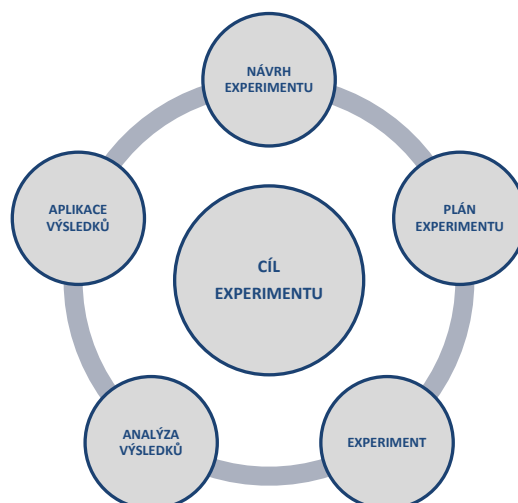
Obr. 53 Vývojový diagram experimentování [90]

Každý experiment by měl být řádně naplánován a také by měly být jasně stanovené cíle každého experimentu. Cíle experimentů mohou být různé a vyžadují odlišnou taktiku experimentování. Nejjednodušší podobu experimentu představuje ten, kde má experimentátor možnost volby nastavení a následné porovnání získaných údajů. Některé procesy mohou být však natolik složité, že teoretické znalosti jedince nebo týmu nestačí k tomu, aby určili nejvýhodnější nastavení procesu. Často v těchto případech není známo, které faktory (vstupní proměnné) mají na výsledek procesu největší vliv. V těchto případech je nejvhodnější, pokud jsou při experimentování odděleny důležité faktory od těch méně důležitých (k tomu slouží např. druh experimentu, který je nazýván „screening“) [90].

Po vytřídění těch faktorů, které významně ovlivňují výsledek procesu lze v následujícím experimentu sledovat další cíle, které mohou např. být:

- maximalizace nebo minimalizace odezvy (např. maximalizace produkce destilátu, minimalizace provozních nákladů)
- snížení proměnlivosti (např. dosažení konstantní slanosti destilátu)
- dosažení odolnosti vůči vlivům, které nelze řídit (např. kvalita napájecí vody)
- vyhledání pracovního bodu procesu přijatelného z více hledisek (např. vysoká produkce a zároveň nízké provozní náklady).

Postup strategie efektivního experimentování je znázorněn na obr. 54.



Obr. 54 Diagram strategie efektivního experimentování (podle [90])

Před samotným provedením měření se obecně musí vyřešit některé otázky související s výběrem měřicí metody a postupu měření, výběrem měřicích zařízení, výběrem podmínek měření a personálu. Před realizací měření je potřeba stanovit také počet měření, pořadí měření a experimentální body, ve kterých se bude měření realizovat.

Jakékoliv měření (experiment) je prováděno v určitém prostředí. Parametry prostředí mohou podstatně ovlivnit výsledek měření, zejména v případě vysoce přesných měření s vysokými metrologickými požadavky. Obecně je v případě potřeby vysoce přesných měření nutnost věnovat značnou pozornost návrhu laboratoře s řízeným prostředím.

Výběr experimentálních bodů

Návrhem měření (experimentu) se rozumí výběr experimentálních bodů, ve kterých bude měření realizováno, stanovení počtu měření v těchto bodech a stanovení pořadí jednotlivých měření.

Cílem navrhování měření je poskytnout co nejúčinnější a nejúspornější metody k dosažení platných závěrů na základě provedených měření. Volba vhodného návrhu pro jakýkoliv experiment je funkcí mnoha úvah, jako je např. typ otázek, které se mají odpovídat, stupeň obecnosti závěrů, náklady na realizaci experimentu atd. Kromě toho vhodně navržený experiment dovolí vhodné statistické vyhodnocení a interpretaci výsledků, což při nevhodně zvoleném návrhu nemusí platit [91].

Kritéria pro navrhování experimentu jsou závislá na cíli experimentu. Pokud je cílem experimentu stanovit hodnoty měřených veličin s co nejmenšími nejistotami, bude kritériem pro stanovení návrhu experimentu (tj. pro výběr experimentálních bodů, stanovení počtu měření v jednotlivých bodech a stanovení pořadí jednotlivých měření) velikost nejistoty stanovené hodnoty měřené veličiny, nebo při měření více veličin, nějaká funkce nejistot a kovariance odhadů hodnot jednotlivých veličin.

Pokud je cílem experimentu stanovit vliv jednotlivých faktorů na měřenou (zkoumanou) veličinu, pro výběr návrhu experimentu bude kritériem takové pravidlo výběru experimentálních bodů, při kterém všechny sledované faktory budou mít odpovídající zastoupení.

Pokud je cílem experimentu stanovit hodnoty ovlivňujících faktorů, při kterých bude hodnota zkoumané veličiny mít extrémní (maximální nebo minimální) hodnotu, bude návrh experimentu odpovídat určité optimalizační strategii.

Pokud je cílem experimentu stanovení odhadů hodnot výstupních veličin, které jsou nekorelované, bude kritériem pro stanovení návrhu experimentu diagonálnost kovariance matice výstupních veličin.

Uspořádání návrhů

V této části jsou popsány experimenty, ve kterých vystupuje několik vstupních veličin (faktorů), které ovlivňují výsledek. Faktory mohou být [91]:

- kvantitativní (např. teplota, tlak, procentuální obsah přísady)
- kvalitativní (např. druh materiálu, přítomnost nebo nepřítomnost nějakého konstrukčního prvku či zařízení, typ zařízení, typ laboratoře atd.).

Hodnoty jednotlivých faktorů bývají nazývány úrovněmi nebo verzemi faktoru. Přitom zde nemusí jít o hodnoty v pravém slova smyslu, ale může to být i specifikovaný postup nebo zadané nastavení faktoru. Např. dvě verze (úrovně) odlučovače kapek mohou být tvořeny jeho přítomností nebo nepřítomností. Pět úrovní tlaku může být tvořeno pěti hodnotami: 1 bar, 2 bar, 3 bar, 4 bar a 5 bar. Výběr faktorů souvisí s cílem experimentu. Výběr úrovní faktorů souvisí s požadovanými vlastnostmi návrhu. Při kvalitativních faktorech jsou úrovně (verze) často dané samotným charakterem faktoru.

5.2.2 Plánování experimentů pro testy odsolovacích jednotek

Výchozí částí provedení měření na experimentálních jednotkách bylo vytvoření plánu komplexního experimentu i předběžných zkoušek.

Cíl experimentu

Cílem experimentu bylo vyšetřit vliv skupiny vstupních provozních proměnných a konstrukčních prvků jednotky na následující odezvy:

- kapacita jednotky
- slanost produkovaného destilátu.

Experimentům však předcházely předběžné zkoušky (pokusy) k výchozímu ověření konstrukčního návrhu jednotky. Předběžné zkoušky byly zaměřeny na ověření správné funkce jednotky při použití různých konstrukčních prvků. Experimentátorský tým nedisponoval předchozími praktickými zkušenostmi s provozem odsolovacích jednotek, a tudíž si chtěl ověřit některé svoje konstrukční úvahy nebo tvrzení publikované v odborné literatuře.

Výběr faktorů a určení jejich úrovní

MSF jednotka nabízí možnost měnit nastavení široké škály provozních podmínek, při kterých může být jednotka provozována. Mimo provozních podmínek bylo možné měnit i vybrané konstrukční prvky. Tato vysoká variabilita provozních podmínek a několika konstrukčních prvků umožňovala provedení předběžných zkoušek i detailních experimentů na vyrobených jednotkách.

Vstupní provozní faktory a jejich úrovně, které byly v průběhu experimentálních měření nastavovány, jsou tyto:

- teplota ohřívací vody
- rychlost vody v teplosměnných trubkách

Teplota ohřívací vody ovlivňuje teplotu nástřiku (TBT), při které vstupuje napájecí voda do první odpařovací komory a má přímý vliv na výkon jednotky a v extrémních případech i na kvalitu výsledného destilátu.

Experimentům předcházely předběžné zkoušky, jejichž účelem bylo ověření vhodnosti použitých konstrukčních řešení či zařízení. Konstrukční vstupní faktory, které byly při předběžných zkouškách nastavovány, jsou tyto:

- typ evakuačního zařízení
- typ čerpadla koncentrátu
- typ čerpadla destilátu
- použití induceru
- typ odlučovače kapek
- typ zařízení pro měření slanosti destilátu.

Přehledné shrnutí vybraných faktorů předběžných zkoušek i jejich úrovní je uvedeno v tab. 16. Faktory a úrovně experimentálních měření jsou shrnuty v tab. 17.

Tab. 16 Přehled plánovaných faktorů pro předběžné zkoušky

Cíl zkoušky	Faktor				Odezva			
	veličina	jednotka	okrajové podmínky	úrovně	popis	veličina	jednotka	
Zkouška těsnosti zapojené jednotky do měřicí trati	tlak	kPa	100 ÷ 250	200	indikace míst s únikem tlakového vzduchu	-	-	
Nalézt vhodný typ evakuačního zařízení	-	-	ejektory / vývěvy	vývěva MEX 25 vývěva MEX 50 ejektor 8/15	tlak v odpařovacích komorách	tlak	kPa	
Zkouška dosaženého podtlaku za studeného stavu jednotky s nevhodnějším evakuačním zařízením	-	-	-	-	tlak v odpařovacích komorách	tlak	kPa	
Nalézt vhodný typ čerpadla koncentrátu	-	-	-	Sigmat CRX 200 Calpeda B-NM 40/16	množství odčerpaného koncentrátu	průtok	m ³ /h	
Nalézt vhodný typ čerpadla destilátu	-	-	-	Sigmat CX 50 Pedrollo PK 70 Merser EP-20	množství odčerpaného destilátu	průtok	m ³ /h	
Ověřit vhodnost induceru	-	-	použit / nepoužit	nic / DN65	množství odčerpaného koncentrátu	průtok	m ³ /h	
Nalézt vhodný typ odlučovače kapek	-	-	lamelový / drátěný	lamelový (samovýroba) lamelový DV270 drátěný (samovýroba)	kvalita destilátu	salinita	ppm	
Nalézt vhodný typ zařízení pro měření slanosti destilátu	-	-	-	Jumo Aquis 500 Ninasoft Mini	vhodnost použití, uživatelský komfort	-	-	

Tab. 17 Přehled plánovaných faktorů pro experimentální měření

Cíl měření	Faktor					Odezva		
	veličina	jednotka	okrajové podmínky	měněný rozsah	popis	veličina	jednotka	
Ověřit výkon jednotky a závislost kapacity jednotky na teplotě ohřívací vody	teplota ohřívací vody	°C	0 ÷ 120	85 ÷ 100	vyprodukované množství destilátu	průtok	l/h	
	teplota ohřívací vody	°C	0 ÷ 120	85 ÷ 120	salinita destilátu	salinita	ppm	
Ověřit závislost slanosti destilátu na rychlosti páry přes odlučovač kapek DV270	průtok napájecí vody	m ³ /h	0 ÷ 16,4	0 ÷ 16,4				

Výběr odezvy

Při předběžných zkouškách bylo na základě odezev rozhodnuto o jejich vhodnosti či nevhodnosti pro použití ve vyvíjených odsolovacích jednotkách. Vždy byly k dispozici minimálně dvě alternativní zařízení, z nichž bylo vybráno to vhodnější. Při experimentálních měřeních byla jako odezva měřena kapacita jednotek (tj. výkon) a obsah rozpuštěných solí v destilátu při určitých podmínkách daných plánem experimentu.

Vybrané odezvy předběžných zkoušek jsou přehledně uvedeny v tab. 18 a odezvy experimentálních měření jsou uvedeny v tab. 19.

Tab. 18 Přehled odezev předběžných zkoušek

Cíl zkoušky	Úrovně faktorů	Odezva		
		popis	očekávaná hodnota	zjištěná hodnota
Zkouška těsnosti zapojené jednotky do měřicí trati	200 kPa	indikace míst s únikem tlakového vzduchu	žádný únik	nalezeny místa s úniky
Nalézt vhodný typ evakuačního zařízení	vývěva MEX 25	dosažený podtlak v MSF jednotce	0,05 kPa	0,14 kPa
	vývěva MEX 50		0,05 kPa	0,12 kPa
	vývěvy MEX 25 a MEX 50		0,05 kPa	0,10 kPa
	2 ks ejektorů 8/15		0,05 kPa	0,06 kPa
Nalézt vhodný typ čerpadla koncentráту	čerpadlo Sigmat CRX 200	množství odčerpaného koncentráту z jednotky za daného podtlaku	14 m ³ /h	7,8 m ³ /h
	čerpadlo Calpeda B-NM 40/16		14 m ³ /h	17,2 m ³ /h
Nalézt vhodný typ čerpadla destilátu	čerpadlo Sigmat CX 50	množství odčerpaného destilátu z jednotky za daného podtlaku	1,5 m ³ /h	0 m ³ /h
	čerpadlo Pedrollo PK 70		1,5 m ³ /h	0 m ³ /h
	čerpadlo Merser EP-20		1,5 m ³ /h	1,5 m ³ /h
Ověřit vhodnost induceru	inducer D 65	množství odčerpaného koncentráту z jednotky za daného podtlaku	14 m ³ /h	10 m ³ /h
Nalézt vhodný typ odlučovače kapek	lamelový (samovýroba)	salinita destilátu	< 10 ppm	> 30 ppm
	drátěný (samovýroba)			> 50 ppm
	Lamelový (vanový) DV270			< 10 ppm
Nalézt vhodný typ zařízení pro měření slanosti destilátu	Jumo Aquis 500 Ninasoft Mini	přítomnost potřebných funkcí, uživatelský komfort	Jumo Aquis 500	Ninasoft Mini

Tab. 19 Přehled odezev při experimentálním měření

Cíl zkoušky	Faktor	Odezva		
		popis	očekávaná hodnota	zjištěná hodnota
Ověřit výkon jednotky a závislost kapacity jednotky na teplotě ohřívací vody	teplota ohřívací vody	vyprodukované množství destilátu	dle nastavených úrovní faktorů (viz příloha č. 1)	
Ověřit závislost slanosti destilátu na rychlosti páry přes odlučovač kapek DV270	teplota ohřívací vody	salinita destilátu	dle nastavených úrovní faktorů (viz příloha č. 1)	
	průtok napájecí vody			

Plán experimentu

Vybavenost zkušební tratě umožňovala indikovat velké množství odezev na vybrané faktory. Pro každé experimentální měření byly zaznamenávány tyto vstupní proměnné:

- průtok vstupní napájecí vody (tj. „mořské vody“)
- průtok chladicí vody (v případě zapojení s odděleným chladicím okruhem, tj. HJS sekcí)
- salinita napájecí vody
- teplota vstupní napájecí vody
- teplota vstupní chladicí vody (v případě zapojení s odděleným chladicím okruhem, tj. HJS sekcí)
- teplota napájecí (popř. chladicí) vody za kondenzátorem 4. stupně
- teplota napájecí (popř. chladicí) vody za kondenzátorem 3. stupně
- teplota napájecí vody za kondenzátorem 2. stupně
- teplota napájecí vody za kondenzátorem 1. stupně (je shodná s teplotou vstupující napájecí vody do dodatkového ohříváku)
- teplota nástřiku (TBT) do 1. odpař. komory (je shodná s teplotou vystupující napájecí vody z dodatkového ohříváku a vstupující vodou do 1. odpař. komory).

V odpařovacích komorách byla měřena pouze hodnota tlaku. Za odpařovacími komorami byly zaznamenány tyto hodnoty na výstupu ze zařízení:

- teplota koncentrátu (tj. teplota za 4. odpař. stupněm)
- teplota destilátu
- průtok destilátu
- salinita destilátu.

Předběžné zkoušky byly naplánovány v tomto pořadí:

- zkouška těsnosti celého zapojení přetlakem
- zkouška různých typů evakuačních zařízení (tj. zařízení pro vytvoření podtlaku v jednotce)
- zkouška dosaženého podtlaku za studeného stavu

- zkouška různých typů čerpadel koncentrátu
- zkouška různých typů čerpadel destilátu
- ověření vhodnosti použití induceru pro zlepšení sacích schopností čerpadla
- zkouška separátorů kapek
- zkouška zařízení pro měření slanosti.

5.2.3 Provedení experimentu a předběžných zkoušek

Experimentální ověření vlastností navrhnuté odsolovací jednotky na principu MSF probíhalo na zkušební výrobce PBS INDUSTRY, a.s. v Třebíči. V této kapitole je popsán průběh předběžných zkoušek a experimentálních měření.

Předběžné zkoušky

Detailním experimentálním měřením předcházely předběžné zkoušky pro ověření konstrukčního návrhu MSF jednotky a jejich prvků. Ty se řídily také plánem experimentu (neboli plánem předběžných zkoušek), avšak se vyznačovaly vylučovacím charakterem. Tzn. že v daném konstrukčním uzlu jednotky bylo vyzkoušeno několik variant (úrovní) zařízení a následně bylo vybráno to nejvhodnější zařízení. Po výběru vhodného konstrukčního prvku (faktoru) se pokračovalo v předběžné zkoušce dalšího faktoru atd. Pořadí předběžných měření bylo uspořádáno takovým způsobem tak, aby byly měření co nejvíce časově efektivní. Tudíž každé nové nastavení měření vyžadovalo nejmenší možný počet změn úrovní faktorů vzhledem k předcházejícímu nastavení.

Při zkoušce těsnosti zapojené jednotky do měřicí trati byl parní prostor jednotky natlakován vzduchem a na všechny závitové i přírubové spoje byl nanesen roztok, díky jehož reakci (pěněním) lze snadno identifikovat místa případných netěsností. Odezvou zkoušek těsnosti byly vytvořené bubliny pěnотvorného roztoku v případných místech netěsností.

Při předběžné zkoušce, jejímž cílem bylo nalezení vhodného typu evakuačního zařízení, byly nejprve zkoušeny vodokružné vývěvy a následně vodoproudé ejektory. Odezvou byl dosažený podtlak jednotlivými evakuačními zařízeními.

Zkouška dosaženého podtlaku za studeného stavu jednotky byla provedena již s nejvhodnějším typem evakuačního zařízení (tj. vodoproudých ejektorů), který vzešel z předchozí předběžné zkoušky. Odezvou této zkoušky byla hodnota dosaženého tlaku v jednotce za studeného stavu. Studeným stavem jednotky je myšlen stav, kdy nedochází k destilaci, tj. že jednotkou procházející napájecí voda není ohřívána ohřívací vodou v dodatkovém ohřívačku.

Další předběžnou zkouškou bylo nalezení vhodného typu čerpadla koncentrátu, při které byly zkoušeny 2 typy čerpadel a jedna úprava na prvním typu čerpadla. Úprava na čerpadle Sigmat CRX 200 spočívala ve zvětšení sacího hrdla čerpadla z dimenze DN50 na DN80. Měřenou odezvou byla schopnost čerpadla odčerpat koncentrát z prostoru poslední odpařovací komory za daného tlaku v této komoře.

Při předběžné zkoušce čerpadel destilátu byly zkoušeny tři typy čerpadel různých konstrukčních provedení. Odezvou byla schopnost čerpadla odčerpat destilát

z prostoru sběrného místa v kondenzátoru poslední odpařovací komory za daného tlaku.

Před další předběžnou zkouškou byla záměrně snížena nátoková výška čerpadla koncentrátu tak, aby byla jeho sací schopnost neuspokojivá pro danou aplikaci. Následně bylo sání čerpadla koncentrátu vybaveno speciálně navrhnutým inducerem. Odezvou předběžné zkoušky induceru byla jeho vhodnost či nevhodnost, tj. zda použití induceru vede ke zvýšení sací schopnosti čerpadla koncentrátu.

Další předběžná zkouška spočívala v testování různých druhů odlučovačů kapek. Před touto zkouškou bylo očekáváno, že jako nejvhodnější odlučovač bude potvrzen lamelový odlučovač typu DV 270, avšak experimentátorský tým chtěl vyzkoušet i jiné druhy odlučovačů, které sám navrhnul, a které byly následně vyrobeny v závodě výrobce odsolovací jednotky. Odezvou zkoušek byla salinita výsledného destilátu.

Poslední předběžnou zkouškou byl test dvou přístrojů pro měření slanosti. První z nich (Jumo Aquis 500) je univerzální přístroj pro měření vodivosti, který umožňuje široké nastavení (jednotky, rozsahy, kompenzace, aj). Druhý byl jednoúčelový přístroj Ninasoft Mini, který je přímo určený pro použití v odsolovacích jednotkách. Odezvou byla vhodnost použití v nově vyvíjených odsolovacích jednotkách a uživatelský komfort.

Experimentální měření

Při provedených laboratorních měřeních na experimentální jednotce byla zjišťována odezva na změnu teploty ohřívací vody, která ovlivňuje teplotu nástřiku (TBT). S každou změnou teploty ohřívací vody se v podstatě dosahuje změny tepelného příkonu do jednotky. Pro zkoumané odezvy experimentálních měření byla provedena série deseti sad měření, kde každá sada obsahovala měření stanovených veličin pro různé hodnoty teplot ohřívací vody.

Vlastní postup měření spočíval v nastavení průtoku napájecí vody jednotkou, který je dán výchozím tepelným i konstrukčním výpočtem a žádané hodnoty teploty ohřívací vody. Při experimentálních měřeních byly v určitých časových intervalech zaznamenávány odezvy i další parametry procesu (např. teploty, tlaky a průtoky).

Technickou komplikací při experimentálních měřeních byla skutečnost, že nebyla k dispozici napájecí, popř. chladicí voda o konstantní teplotě. Důvodem byla nepřítomnost chladicího zařízení, které by udržovalo teplotu napájecí vody (popř. chladicí vody) na konstantní hodnotě. Teplo dodané do dodatkových ohříváků je v odsolovacích jednotkách akumulováno do koncentrátu, destilátu a popř. chladicí vody. V případě experimentálního zapojení (bylo použito zapojení bez recirkulace a HJS sekce) na zkušebně výrobce tvořila napájecí voda s koncentrátem i destilátem jeden uzavřený okruh o celkovém objemu cca 20 m³. Jak je patrné ze schématu zapojení na obr. 50, byl vytvořený destilát se zbytkovým koncentrátem po výstupu z jednotky smíchán za opětovného vzniku napájecí vody o původní koncentraci. Dostupný objem vody v zásobní nádrži měl určitou tepelnou kapacitu, tzn. že odsolovací zařízení mohlo být v provozu po dobu jedné až dvou hodin, dokud nedosáhla teplota vody 30 až 32 °C. Doba experimentálního provozu jednotky závisela na dodávaném teple dodatkovým ohřívákem do procesu a také na teplotě napájecí vody, na kterou byla voda před zahájením experimentu vychlazena. Při teplotách napájecí (popř. chladicí) vody nad 32 °C již nepracuje odsolovací zařízení na tepelném principu ideálně, a proto nemělo dále smysl v experimentu pokračovat.

Teplota 32 °C je tak identifikována jako horní mez teploty vody pro správnou funkci odsolovacího zařízení. Po ukončení experimentu byla ponechána (při občasném míchání) ohřátá voda v její zásobní nádrži tak dlouho, dokud její teplota nepoklesla na požadovanou teplotu (cca 15 °C). Experimentátorský tým měl možnost měnit teplotu v místnosti se zásobní nádrží napájecí vody a tím i rychlost jejího vychlazení. Při dosažení požadované výchozí teploty napájecí vody okolo 15 °C mohla být následně zahájena další sada experimentálního měření.

Při experimentu byla předpokládána homogenita vybraných provozních podmínek, tj. okolní teploty a obsahu rozpuštěných solí v napájecí vodě.

Při experimentálním měření bylo kritériem pro začátek měření odezvy dosažení požadované vstupní teploty ohřívací vody do dodatkového ohříváku. Náhodnost měření byla navíc potlačena jejich opakováním. Opakovaná měření byla prováděna v několika minutových intervalech od ustálení výstupní teploty ohřívací vody.

5.3 Analýza a vyhodnocení výsledků výchozích experimentů

V této kapitole jsou představeny výsledky uskutečněných předběžných zkoušek a experimentů na experimentálních jednotkách MSF a ME. Také jsou představeny získané poznatky z dlouhodobého provozu demonstrační jednotky MSF.

5.3.1 Měření na experimentální jednotce MSF

Na jednotce MSF byly provedeny tyto výchozí předběžné zkoušky experimentální měření:

- ověření inovativní a naprosto ojedinělé konstrukce odpařovací nádoby
- experimenty se zařízeními pro vytváření podtlaku
- experimenty s těsníci materiály
- simulace různých provozních parametrů a průtoků
- experimenty s různými druhy čerpadel kondenzátu a destilátu
- experimenty s různými druhy odlučovačů kapek
- zkouška induceru
- zkouška zařízení pro měření slanosti destilátu
- experiment s provozem jednotky bez a se samostatným chlazením dvou posledních kondenzátorů.

Zkušenosti s uváděním do provozu

První uvedení jednotky MSF do provozu bylo nečekaně komplikované. Hlavní příčiny komplikací byly:

- nedostatečná těsnost některých zařízení a jejich spojů
- nedostatečná funkce zařízení pro vytvoření podtlaku v jednotce
- nedostatečná funkce některých čerpadel a jejich sacích potrubí.

Prvním problémem při najíždění experimentální jednotky MSF bylo dosažení potřebného sníženého tlaku (podtlaku). Ukázalo se, že řádné utěsnění spojů, které

těsní hluboký podtlak, není snadné. Na tvorbu podtlaku má také vliv přísávání vzduchu přes výstupní potrubí destilátu a koncentrátu. Do těchto potrubí je vhodné umístit zpětné klapky a konce potrubí zaústit pod hladinu vody. Po řádném utěsnění všech spojů a provedené tlakové zkoušce vyšlo najevo, že použité vodokružné vývěvy (viz obr. 55), nebyly schopny vytvořit podtlak v zařízení, který byl očekáván (tj. tlak cca 0,05 bar abs.). Vývěvy byly nahrazeny vodoproudými ejektory (viz obr. 56), které požadovaný tlak bez problémů vytvořily. Posledním závažným problémem byla použitá čerpadla. Problém s čerpadly byl vyřešen jejich záměnou za vhodnější typ. Postup ověření konstrukčních prvků je uveden v textu dále.

Předběžné zkoušky

Detailním experimentálním měřením předcházely předběžné zkoušky pro ověření konstrukčního návrhu MSF jednotky a jejích jednotlivých základních komponent.

Z proběhlých předběžných zkoušek vyplynulo, že vhodnými zařízeními pro vytvoření podtlaku v odsolovací jednotce jsou vodoproudé ejektory. Vodokružné vývěvy MEX 25, MEX 50 od italského výrobce Finder Pompe zapojené samostatně i jejich společné zapojení k jednotce nepřinesly požadovanou hodnotu tlaku v jednotce. Obě vývěvy měly deklarovanou schopnost dosažitelného tlaku v zařízení 0,03 bar abs., které se však nepodařilo dosáhnout. V poslední fázi předběžných zkoušek zařízení pro vytvoření podtlaku byly na jednotce odzkoušeny dva ejektory typu 8/15 (průměr trysky 8 mm a průměr difuzoru 15 mm) od dánského výrobce Merser, z nichž jeden odsával nekondenzovatelné plyny z prvního stupně a druhý z ostatních třech stupňů jednotky. Použití vodoproudých ejektorů se osvědčilo a jsou jimi vybavovány i ostatní jednotky z produktového portfolia výrobce odsolovacích jednotek. Vhodný typ zařízení pro vytvoření podtlaku byl také následně konzultován s výrobcem ejektorů, který dodává ejektory několika dalším výrobcům odsolovacích zařízení. Z této konzultace vyplynulo, že využití vodokružných vývěv není v aplikacích s odsolovacími jednotkami vhodné.



Obr. 55 Vodokružná vývěva MEX



Obr. 56 Vodoproudý ejektor a tryska

Cílem další předběžné zkoušky bylo nalezení vhodného typu čerpadla koncentrátu. Jako první bylo zkoušeno čerpadlo Sigmet CRX 200 s otevřeným oběžným kolem a průměrem sání i výtlaku DN50 (viz obr. 57a). Toto čerpadlo nebylo schopné z daného tlaku odčerpávat veškeré množství koncentrátu a následně docházelo k zahlcení celé jednotky koncentrátem. V další fázi byl tomuto čerpadlu

zkušebně upraven průměr sacího otvoru na DN80 (viz obr. 57b) za účelem snížení tlakových ztrát při vstupu koncentrátu do čerpadla, a následného zvýšení sací schopnosti čerpadla. Tato úprava průměru sání nepřinesla očekávané zlepšení sacích schopností. Z těchto předběžných zkoušek vyplynulo jako vhodné čerpadlo koncentrátu čerpadlo Calpeda B-NM 40/16, které mělo uzavřené oběžné kolo, průměr sání DN65 a výtlačk DN50.



Obr. 57 Čerpadlo Sigmoid CRX 200

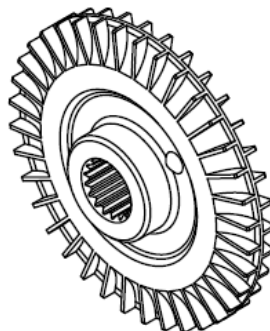
Úkolem další předběžné zkoušky na jednotce MSF bylo nalezení vhodného typu čerpadla destilátu. Při těchto zkouškách se neosvědčila čerpadla Sigmoid CX 50 (viz obr. 58) i Pedrollo PK 70 (viz obr. 59), která by podle jejich výkonových křivek měla dané aplikaci vyhovovat. U experimentální jednotky se osvědčilo čerpadlo EP-20 od dánského výrobce Merser (viz obr. 60), jehož oběžné kolo je řešeno jako „kanálkové“ (někdy se též čerpadlo tohoto konstrukčního řešení nazývá jako kanálkové čerpadlo) (viz obr. 61). Toto čerpadlo se díky použitému oběžnému kolu vyznačuje nízkými specifickými otáčkami n_s . Parametry použitého čerpadla EP-20 jsou: $Q = 2 \text{ m}^3/\text{h}$, $H = 28 \text{ m}$, $N = 2900 \text{ ot/min}$.



Obr. 58 Čerpadlo Sigmoid CX 50

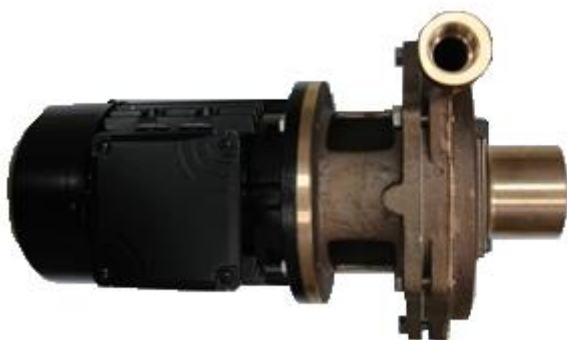


a) celkový pohled



b) oběžné (paprskové) kolo

Obr. 59 Čerpadlo Pedrollo PK 70



a) výtlak



b) sání

Obr. 60 Čerpadlo Merker EP-20



a) čelní pohled

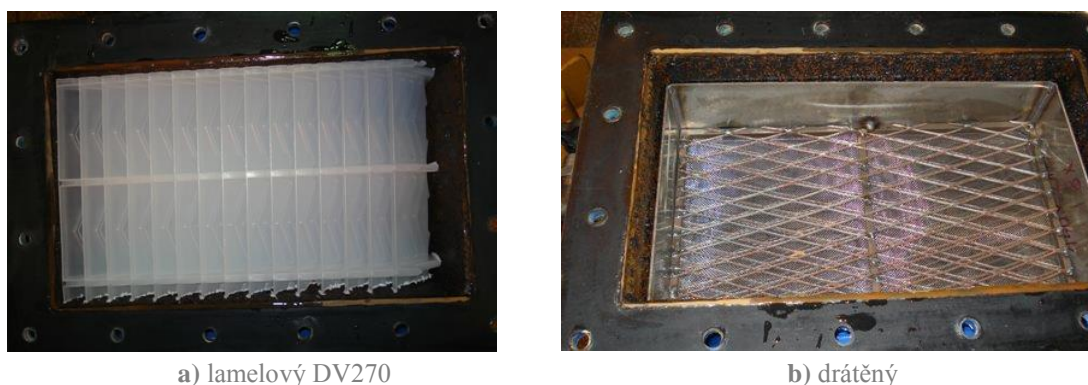


b) pohled na kanálky oběžného kola

Obr. 61 Oběžné (kanálkové) kolo čerpadla Merker EP-20

Další předběžná zkouška byla zaměřena na zvýšení sací schopnosti vybraného čerpadla koncentrátu pomocí induceru. Inducer byl předřazen oběžnému kolu čerpadla, které bylo v předchozí zkoušce vybráno jako nejvhodnější (tj. Calpeda B-NM 40/16) s průměrem sacího otvoru DN65. Pro ověření vlivu induceru na sací schopnost čerpadla byla záměrně jeho sací schopnost potlačena snížením nátokové výšky. Při nové sací výšce čerpadla koncentrátu byla nejprve provedena zkouška sacích schopností bez induceru a poté zkouška s inducerem, aby bylo možné následně obě varianty porovnat. Při použití induceru mělo čerpadlo stejnou sací schopnost jako bez něj, a tudíž se jeho použití neosvědčilo. Zkoušený inducer (viz obr. 30 a příloha č. 4) byl navržen pracovníky Ústavu fluidního inženýrství VUT FSI v Brně a jeho výroba proběhla ve firmě VKV Horák s.r.o.

Následná předběžná zkouška byla zaměřena na pokusy s odlučovači kapek. Před touto zkouškou bylo zřejmé, že nejvhodnějším typem odlučovače bude lamelový typu DV270 (viz obr. 62a) od německého výrobce Munsters, avšak experimentátorský tým se chtěl přesvědčit o hodnotách slanosti destilátu při použití jiných typů odlučovačů. Jedním z navržených typů odlučovačů pro předběžné zkoušky byl lamelový typ s lamelami umístěnými ve třech řadách a drátěný typ (viz obr. 62b), který byl tvořen dvěma vrstvami drátěných sítí. Síť byla tvořena dráty o průměru 0,1 mm a velikostí oka 1 mm, a zároveň byla podepřena tahokovem. Dosažené hodnoty slanosti destilátu při použití různých odlučovačů kapek jsou uvedeny v tab. 18. Osvědčený typ odlučovače DV270 vyrábí jeho výrobce v mnoha materiálových provedeních. Pro použití v experimentálních jednotkách byl zvolen polypropylenový materiál, který odolává teplotám do 130 °C.

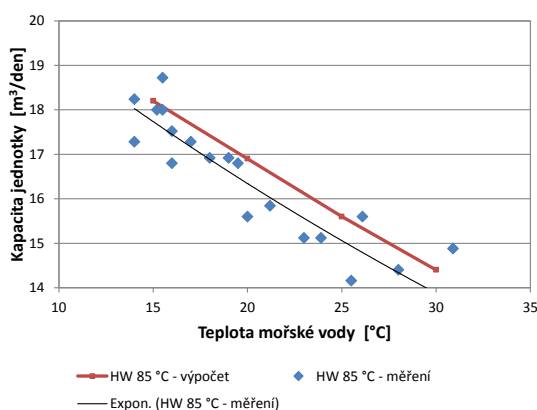


Obr. 62 Odlučovače kapek při předběžné zkoušce MSF jednotky

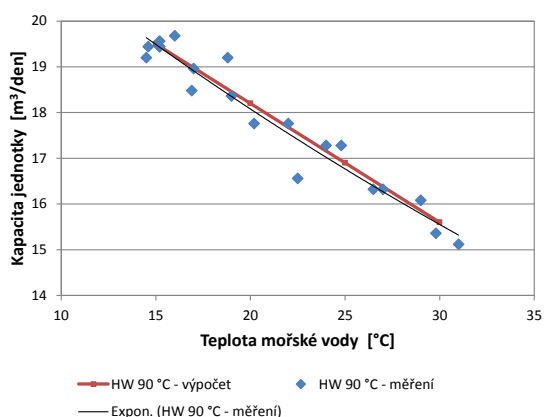
Poslední předběžná zkouška byla zaměřena na porovnání vhodnosti a uživatelského komfortu dvou typů zařízení pro měření slanosti. První z nich, Aquis 500 od výrobce Jumo (viz obr. 38), poskytoval široký měřicí rozsah a širokou škálu nastavení. Druhé zařízení, Ninasoft Mini, vyhovovalo použití v odsolovacích jednotkách lépe. Zařízení je jednoúčelové, má přehledné zobrazení hodnoty slanosti v rozsahu 0 až 200 ppm a jednotky slanosti pouze ppm. Zařízení Mini disponuje možností nastavení alarmu, tj. že při překročení nastavené hodnoty slanosti destilátu je sepnut kontakt a zároveň je překročení nastavené hodnoty avizováno zvukově. Kontaktem lze ovládat přepouštěcí ventil, kterým je produkovaný nekvalitní destilát odkloněn mimo sběrnou nádrž vyrobeného destilátu.

Experimentální měření

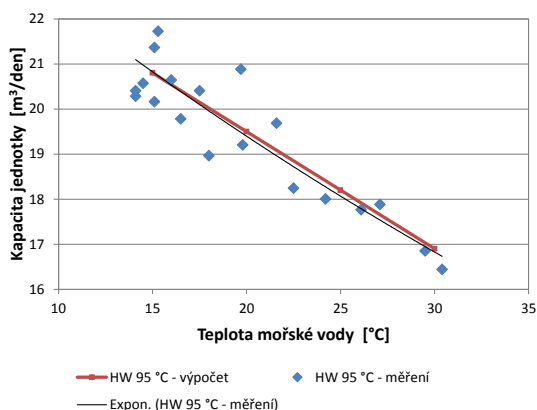
Po proběhlých předběžných zkouškách bylo přistoupeno k detailním experimentálním měřením, které probíhaly dle plánu experimentu. Experimentální měření bylo zaměřeno hlavně na měření odezvy na změnu teploty ohřívací vody. Pro tato měření bylo provedeno osm sad měření. Předmětem dalšího experimentálního měření bylo zjišťování závislosti slanosti destilátu na rychlosti par destilátu přes odlučovač kapek. Rychlost páry byla ovlivňována změnou teploty nástřiku, popř. změnou jeho průtoku. Vybrané závislosti naměřených dat z experimentálních měření experimentální jednotky MSF jsou graficky znázorněny na obr. 63, obr. 64 a obr. 65. V těchto grafech jsou návrhová data znázorněna červeně a data naměřená při experimentálních měřeních modře. Naměřenými body z experimentálních měření jsou proloženy spojnice trendu, díky kterým lze snadno porovnat odchylky mezi návrhovými a skutečnými hodnotami. Z naměřených dat je patrné, že rozdíl mezi nimi a návrhovými daty se pohybuje do 5 %, což lze považovat za uspokojivý výsledek. Kompletní naměřená data uskutečněných experimentů jsou uvedena v příloze č.1.



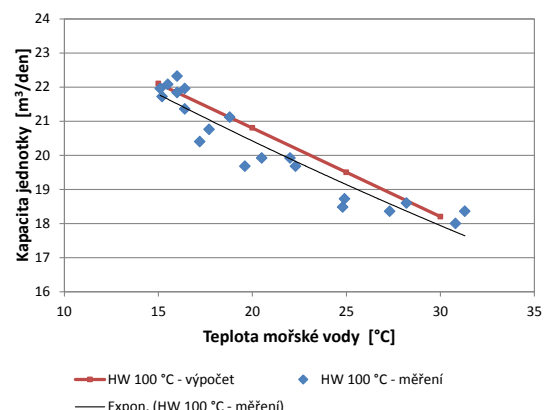
a) při teplotě ohřívací vody 85 °C



b) při teplotě ohřívací vody 90 °C

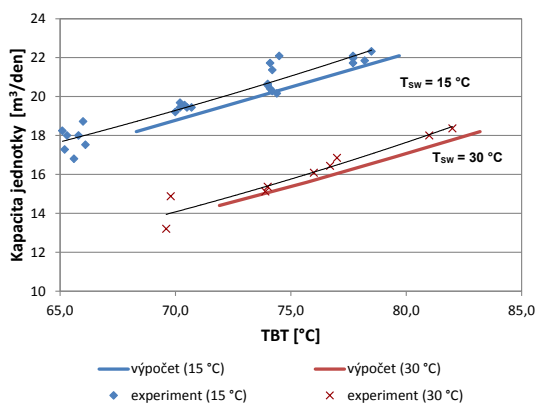


c) při teplotě ohřívací vody 95 °C

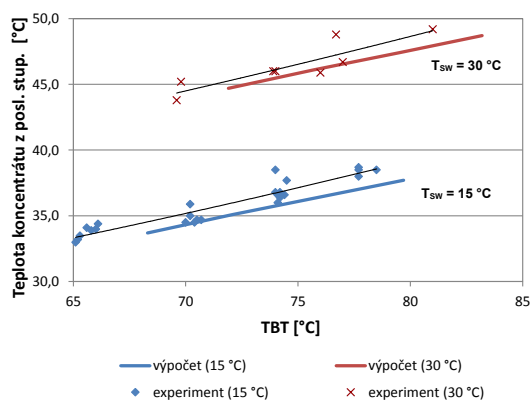


d) při teplotě ohřívací vody 100 °C

Obr. 63 Experimentální měření – závislost kapacity jednotky na teplotě ohřívací vody

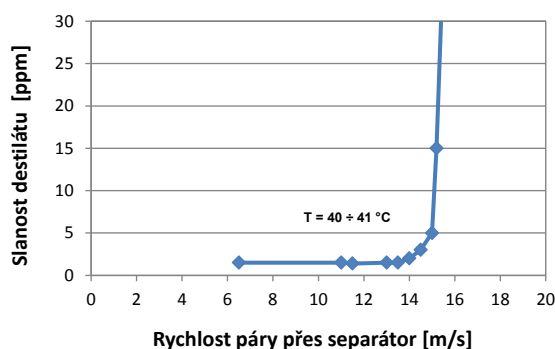


Obr. 64 Závislost kapacity jednotky na teplotě nástřiku



Obr. 65 Závislost teploty koncentráty na teplotě nástřiku

Jedno z experimentálních měření bylo zaměřeno na ověření vlivu rychlosti páry přes odlučovač kapek na výslednou hodnotu slanosti. Při této zkoušce bylo měněno množství par destilátu přes odlučovač kapek a odezvou byla slanost destilátu. Z měření je patrné, že limitní rychlostí par destilátu je rychlost kolem 14 až 15 m/s (viz obr. 66). Při rychlostech nad 15 m/s dochází k prudkému zvýšení slanosti produkovaného destilátu.



Obr. 66 Závislost slanosti destilátu na rychlosti páry přes separátor

Zkouška zahušťování fugátu

S experimentální jednotkou MSF byla provedena zkouška za účelem zahušťování zbytkového fugátu z bioplynové stanice (BPS). Fugát, jenž byl k dispozici, měl obsah sušiny cca 4 % a pocházel z BPS Pacov. Na tuto zkoušku byl k dispozici velmi omezený čas (cca 1 den), protože experimentální jednotka MSF měla být následující den odvezena ze zkušebny do výrobní haly, kde měla být rozebrána a následně byly její vybrané díly použity v demonstrační jednotce MSF. Dle zavedené terminologie v oblasti DOE šlo při zkoušce zahušťování o tzv. „živelný pokus“, protože zkouška nebyla naplánována a neřídila se předem daným plánem experimentu.

Experimentátorský tým použil zapojení jednotky s oddělenou HJS sekci a místo slané vody byl do jednotky distribuován fugát z BPS. Provoz jednotky byl obdobný jako při provozu se slanou vodou, avšak uvedení na provozní parametry bylo velmi pozvolné.

Provoz jednotky probíhal v první fázi dle předpokladů. Výsledný destilát byl relativně čistý, jeho zbarvení bylo lehce do žluta a vyznačoval se mírným čpavkovým zápachem. Důvodem zápachu destilátu je uvolňování některých organických látek při destilaci, které přecházejí do par destilátu. Produkce destilátu v uspokojivé kvalitě probíhala cca 30 minut, avšak poté došlo ke zhoršení kvality destilátu. Důvodem zhoršení vlastností destilátu bylo pravděpodobně pění fugátu v odpařovacích komorách. Z časových i technických důvodů v průběhu zkoušky nebyla zaznamenávána žádná provozní data.

Ze zkoušky vyplynulo, že aplikace MSF jednotek pro zahušťování fugátu je s velkou pravděpodobností možná, avšak je potřeba provést podrobně experimentální měření této aplikace a také se detailně seznámit s vlastnostmi fugátu. Dle provedených rešerší je možné zápach destilátu neutralizovat za účelem splnění hygienických norem, a tudíž je bude možné vypouštět do kanalizace. O aplikacích odparek pro účely zahušťování pojednává kap. 7.1.3 a o zkouškách zahušťování fugátu na jednotce ME kap. 5.3.3.

5.3.2 Provoz demonstrační jednotky MSF

Demonstrační jednotka MSF, která byla umístěná na egyptském pobřeží ve městě El Quseir, měla za cíl ověření dlouhodobé funkce zařízení v horizontu půl až jednoho roku v reálném provozním prostředí a také ověření nového návrhu odpařovacích komor. Dalším cílem bylo, jak bylo zmíněno dříve, vytvoření reference v reálném provozu a také příslib zákazníka k pořízení několika odsolovacích jednotek v případě, pokud se demonstrační jednotka osvědčí v provozu trvajícím minimálně půl roku.

Zkušební trať demonstrační jednotky MSF

Demonstrační jednotka MSF byla umístěná v areálu stanice pro odsolování mořské vody pomocí reverzní osmózy. Tento areál je vybaven dieselgenerátory, které tvoří zdroj elektrické energie pro jednotky RO. Dieselgenerátor je v podstatě motor, a jako každý jiný motor je chlazen chladicí kapalinou, která předává absorbované teplo z motoru do okolního prostředí prostřednictvím vzduchových chladičů. Jelikož je odpadní teplo z generátorů mařeno vzduchovými chladiči, představuje tak bezplatný zdroj tepelné energie pro jednotky na bázi tepelných metod odsolování. Zdrojem tepla pro demonstrační jednotku bylo odpadní teplo z dieselgenerátoru Caterpillar 3412 SVA. Vybrané parametry uvedeného dieselgenerátoru jsou uvedeny v tab. 20. Armatury okruhu a jeho zapojení bylo voleno tak, aby nebyl jakkoli ohrožen chod generátoru a výroba elektrické energie pro stanici RO.

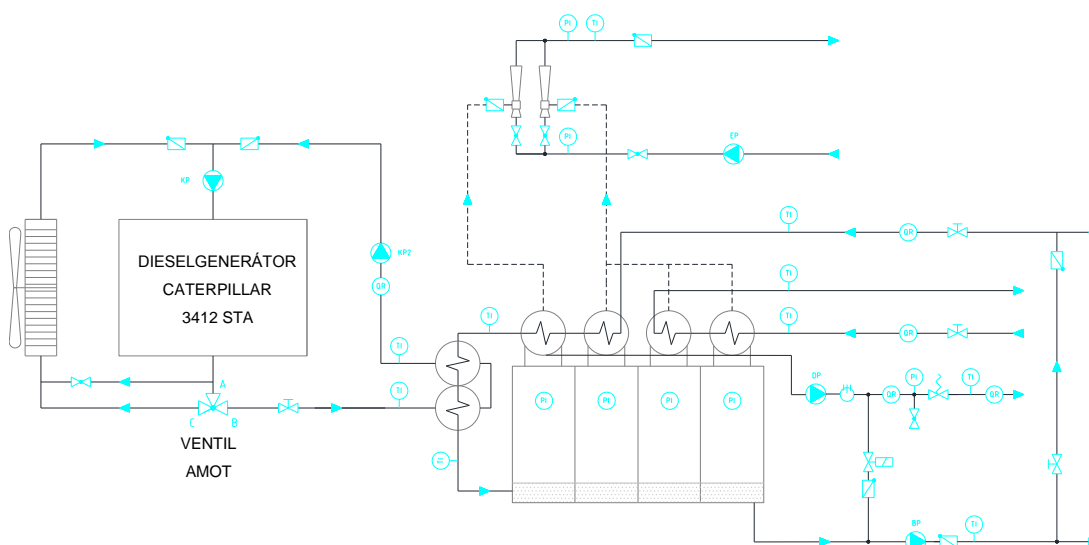
Po návrhu zapojení jednotky do místa instalace a jeho odsouhlasení zákazníkem bylo přistoupeno k úpravám zapojení motoru CAT. Zapojení demonstrační odsolovací jednotky v okruhu s motorem CAT je znázorněno na obr. 67. Filozofie návrhu zapojení spočívala v co nejjednodušším odvedení horkého chladiča z bloku motoru ještě před vzduchovým chladičem, aby se jeho tepelná

energie dala využít pro ohřev odsolovací jednotky. Za tímto účelem byl do okruhu vložen trojcestný termoregulační ventil AMOT v zapojení, které umožňovalo rozdělovací funkci média. Ventil byl z výroby nastaven na regulovanou teplotu 102 °C. Voda vystupující z motoru do ventilu AMOT (vstupem A) byla přeměrována vývodem B do dodatkového ohříváku jednotky MSF, kde sloužila pro ohřev napájecí mořské vody. Zapojení termoregulačního ventilu v rozdělovací funkci sloužilo jako teplotní pojistka jednotky a v případě, že teplota chladiva na výstupu z motoru přesáhla nastavenou hodnotu, začal ventil přepouštět chladivo do nouzového chlazení, tj. do vzduchového chladiče motoru (výstupem C). Vybrané parametry použitého samoregulačního ventilu jsou uvedeny v tab. 21.

Pro bezproblémový chod motoru bylo také potřeba dodržet teplotu vratné vody z dodatkového ohříváku MSF jednotky. Teplota této vody nesměla klesnout pod 86 °C. Jelikož nebyl z finančních důvodů k dispozici další samoregulační termostatický ventil, který by ve směšovacím zapojení řídil průtok mořské vody dodatkovým ohřívákem dle výstupní teploty chladiva z dodatkového ohříváku jednotky, musel být tento problém provizorně vyřešen umístěním ručního regulačního ventilu do okruhu mořské vody, a jeho průtok byl nastaven ručně. Výhodou bylo, že motor pracoval s konstantním zatížením, a nebylo tedy složité nastavit přiměřený průtok ohřívákem.

Tab. 20 Parametry dieselgenerátoru CAT

Parametr	Jednotka	Hodnota
Typ motoru	-	CaterPillar 3412 SVA
Typ chladicí kapaliny	-	Cat ELC
Průtočné množství chl. kapaliny	m ³ /h	39,6
Teplota chl. kapaliny z motoru	°C	98
Teplota chl. kapaliny do motoru	°C	87
Tepelná energie k vychlazení	kW _t	~ 268



Obr. 67 Schéma zapojení demonstrační jednotky MSF v Egyptě

Tab. 21 Parametry ventilu AMOT

Parametr	Jednotka	Hodnota
Typ ventilu	-	AMOT B
Dimenze	-	DN65
Regulovaná teplota	°C	102 (rozsah 98 ÷ 107)
Materiál	-	šedá litina

Poznátky z provozu demonstrační jednotky MSF

Demonstrační jednotka pracovala v Egyptě cca rok trvalého provozu bez závažných problémů. Denní produkce byla kolem 16 m³ destilátu a jeho slanost byla do 15 ppm. Tato hodnota slanosti je pro místní uživatele naprosto úžasnou hodnotou, jelikož do této doby znali jen odsolenou vodu s hodnotami slanosti cca 300 až 400 ppm, kterou produkuje stávající stanice reverzní osmózy. Jednotka MSF nebyla provozována na plný výkon, protože se jí dostávalo omezeného množství tepelné energie. Jediným technickým problémem při dlouhodobém provozu jednotky bylo poškození trubky kondenzátoru v místě jejího zaválcování do trubkovnice. Důsledkem poškození trubky začala protékat napájecí slaná voda do mezitrubkového prostoru kondenzátorů, a tím byla zhoršena kvalita výsledného destilátu. Tato závada byla opravena místními servisními technikami metodou zacpání trubky a jejího vyřazení z provozu. Důvodem závady bylo zjednodušené provedení trubkovnice, která byla z důvodů uvedených v kap. 4.1.1 pouze z nerezového materiálu, namísto odolné slitiny (např. CuZn40). Potrubní propojení veškerých slaných médií bylo realizováno plastovými trubkami z materiálu CPVC, který je určený pro tlakové rozvody vody s možností spojování trubek lepením nebo mechanickými spojkami. Toto potrubí i spoje se provozně osvědčily. Demonstrační jednotka a její instalace je znázorněna na obr. 68.



a) po kompletní instalaci



b) průběh instalace



c) závada na trubce kondenzátoru po několika měsících provozu



d) dieselgenerátor CAT, jehož odpadní teplo sloužilo pro provoz jednotky

Obr. 68 Demonstrační jednotka MSF v Egyptě

Hodnocení provozu

Výroba sladké vody pomocí jednotky MSF přinesla synergický efekt k současné výrobě sladké vody pomocí RO. Roční provoz jednotky proběhl nad očekávání dobře. O provozu demonstrační jednotky není k dispozici rozsáhlé množství dat, jelikož její provozovatelé nebyli schopni v určitých časových intervalech zapisovat provozní data. Skutečnost, že provozovatelé jednotky kontaktovali jejího výrobce velmi zřídka s provozními aktualitami, svědčí o jejich spokojenosti s průběhem provozu.

5.3.3 Experimenty na jednotce ME

Jak již bylo zmíněno dříve, experimentální jednotka ME byla vyrobena jako dvoustupňová s plánovanou produkcí sladké vody $35 \text{ m}^3/\text{den}$. Vybraná návrhová data této jednotky jsou uvedena v tab. 22. Na jednotce byly, na zkušebně výrobce, provedeny výchozí zkoušky pro ověření její funkčnosti a parametrů. V současné době je jednotka instalována na zkušebně výrobce (viz obr. 69) a slouží k demonstračním účelům při prohlídkách potenciálních zákazníků.

Tab. 22 Vybraná návrhová data experimentální jednotky ME

Specifické provozní proměnné		
Teplota mořské vody	30	°C
Průtok napájecí mořské vody	4,5	t/h
Průtok chladicí (mořské) vody	72	t/h
Slanost mořské vody	35 000	ppm
Vstupní teplota ohřívací vody	90	°C
Teplosměnná plocha		
Teplosměnná plocha výparníku	13,2	m ²
Teplosměnná plocha kondenzátoru	13,2	m ²
Parametry teplosměnných trubek výparníku		
Průměr (vnější)	19	mm
Tloušťka stěny	1	mm
Délka	960	m
Materiál	CuZn20Al2As	-
Parametry teplosměnných trubek kondenzátoru		
Průměr (vnější)	16	mm
Tloušťka stěny	1	mm
Délka	4,5	m
Materiál	CuZn20Al2As	-

U experimentální jednotky ME byly v první fázi zkoušek provedeny tyto experimenty:

- ověření potřebného množství ejektorů pro vytvoření podtlaku a jejich parametrů
- simulace různých provozních parametrů a průtoků.

Ve druhé fázi zkoušek došlo na výchozí zkoušku v aplikaci zahušťování zbytkového fugátu z bioplynové stanice.



a) přední pohled



b) boční pohled

Obr. 69 Experimentální jednotka ME na zkušebně

Zkušební s uváděním do provozu

Zapojení jednotky ME do měřicí tratě a její uvedení do provozu proběhlo bez problémů. Důvodem hladkého průběhu byly zkušenosti experimentátorského týmu z předchozích zkoušek a experimentů na experimentální jednotce MSF. Zkušenosti získané při konstrukci jednotek MSF a jejich provozu byly zúročeny a aplikovány při konstrukci i při výchozím testování jednotky ME. Průběh experimentu probíhal dle očekávání a bez komplikací. Výkon jednotky odpovídal tepelné energii přivedené v ohřivací vodě do vařáku 1. stupně. Výkon nedosahoval konstrukčního maximálního výkonu (kapacity) z důvodu malého množství přivedené tepelné energie. Malé množství přivedené tepelné energie bylo dáno nedostatečným výkonem výměníku pára-voda ve zkušební trati, který transformoval energii páry z parního kotle do horké vody.

Zkouška zahušťování fugátu

Na experimentální jednotce ME proběhla zkouška zahušťování zbytkového fugátu z BPS, který měl obsah sušiny 6,8 %. Dostupné množství fugátu bylo 1 m³. Vlastností každého fugátu je, že obsahuje absorbovaný plyn, který následně způsobuje komplikace při destilaci.

Při průběhu testu byla jednotka nejprve evakuována (za studeného stavu) a až poté do ní byl přiváděn v malém množství fugát. Plyn absorbovaný ve fugátu začal zahušťovaný fugát propěňovat (po jeho vstupu do jednotky, kde se nachází podtlak). Aby se zabránilo zahlcení celé jednotky pěnou, byl přívod fugátu uzavřen a následně

byla do vařáku 1. stupně jednotky přivedena ohřívací voda. Po započetí topení odparky 1. stupně pěna opadla a následně se přistoupilo k opětovnému přivedení cirkulujícího fugátu do jednotky, aby jednotka pracovala za kontinuálních podmínek dle její zvyklosti. Při cirkulaci fugátu jednotkou neustále docházelo k pění fugátu a jeho pěna byla velmi stabilní. Při cirkulaci fugátu byla většina tepla z ohřívací vody využita pro jeho ohřev a určitá minimální intenzita varu fugátu již nestačila potlačit vznik pěny. Na druhou stranu při odpařování bez cirkulace fugátu bylo veškeré teplo využito na odpar při relativně intenzivním varu a docházelo k potlačení pěny. Následně se pěna z parního prostoru 1. stupně dostala do pláště vařáku 2. stupně. Ten samý proces probíhal i v trubkách vařáku 2. stupně a pěna se dostala i do pláště kondenzátoru. Pěna byla nasáta z prostorů obou plášťů do ejektorů, a tudíž byla kontaminována ejektorová voda fugátem. Ejektorová voda se znečistila natolik, že následně začala pění v zásobníku ejektorové vody, a tudíž se snížila sací schopnost ejektorů, což v důsledku znamenalo výrazný pokles pracovního vakua v jednotce. Testovací provoz byl následně zastaven a pracovní voda ejektorů byla vyměněna.

Do zbylého objemu fugátu (cca 0,7 m³) byl nadávkován protipěnicí prostředek HYDOS C 600 v množství 0,5 l. Testovací jednotka byla znovu uvedena do provozu. Chování fugátu se po obnovené zkoušce zahušťování i po nadávkování protipěnicího činidla nezměnilo. Pěna se v parním prostoru opět velmi intenzivně tvořila a opět přecházela do pracovní vody ejektorů. Přítomnost protipěnicího činidla však zmenšila znečištění pracovní vody ejektorů a mírně potlačila její pění. Přesto se dařilo udržet vakuum v odparkách na přijatelné úrovni pro provoz.

Ze zkoušky zahušťování fugátu destilačním zařízením ME lze usoudit, že toto zařízení není vhodné pro aplikace zahušťování zbytkového fugátu z BPS. Ačkoliv byl provedený test zahušťování fugátu na odparce ME po technické stránce neúspěšný, přinesl velmi cenné poznatky o chování fugátu při jeho zahušťování.

V jednotce ME brání potlačení (popraskání) bublin hydrostatický tlak sloupce zahušťovaného média v pracovních (varných) trubkách. Na druhou stranu se očekává, že zahušťování fugátu bude úspěšné na jednotkách MSF, kde dochází k varu zahušťované kapaliny její expanzí ve vakuovém prostoru. Tento efekt je možno charakterizovat jako var na povrchu kapaliny. Povrchový var významně omezuje vznik pěny, protože vznikající bubliny vnitřním přetlakem páry popraskají. Výchozí pokus zahušťování fugátu na jednotkách MSF byl ve velmi omezeném rozsahu již proveden a je popsán v závěru kap. 5.3.1.

5.4 Nejistoty měření

Pro každé přesné měření je potřeba dodat informaci, s jakou přesností bylo měření provedeno (výpočet nejistot je neoddelitelnou částí zpracování výsledků měření). Proto bylo v rámci měření provedeno zhodnocení spolehlivosti naměřených hodnot a posouzení nejistot měření.

5.4.1 Teorie k nejistotám měření

Nejistota měření charakterizuje rozsah naměřených hodnot okolo výsledku měření, který lze se zdůvodněním přiřadit k hodnotě měřené veličiny. Nejistota měření není závislá pouze na přesnosti použitých přístrojů, ale také na zvolené metodě měření a na náhodných vlivech, které nelze předem vyloučit. Základní

kvantitativní charakteristikou nejistoty je standardní nejistota, která bývá označována u (angl. *uncertainty*). Nejistota je směrodatná odchylnka veličiny, pro níž je nejistota udávána. Existují tyto tři standardní nejistoty měření [92], [93]:

- nejistoty typu A
- nejistoty typu B
- nejistoty typu C.

Nejistoty typu A (označovány u_A) se stanovují statistickou analýzou naměřených údajů, které byly naměřeny opakovaným měřením. Jejich příčiny se považují (stejně jako u náhodných chyb) za neznámé a jejich hodnota klesá s počtem měření. Při určování nejistoty typu A se považuje za dostatečný počet opakování experimentu $i \geq 10$ a směrodatná odchylnka je určena výběrovým průměrem. Při menším počtu provedených měření je nutné rozšířit interval vynásobením příslušným koeficientem. Cílem při určování nejistoty typu A je stanovení intervalu, který bude s určitou zvolenou pravděpodobností obsahovat pravou hodnotu X . Předpokládá se, že pravé hodnotě X je nejbližší aritmetický (výběrový) průměr naměřených hodnot x_i , který se vypočítá:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (19)$$

Nejistota typu A je určena odhadem směrodatné odchylnky výběrového průměru:

$$u_A = s_{\bar{x}} = \frac{s_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (20)$$

Celková stanovená nejistota dle (rovnice výše) je označována jako základní a vymezuje kolem naměřené (spočtené) hodnoty interval, v němž se daná veličina nachází s pravděpodobností přibližně 68 % (v případě normálního rozdělení veličiny). V případě potřeby dosažení vyššího pokrytí bývá standardní nejistota rozšiřována pomocí koeficientu rozšíření kr , jehož význam je v podstatě shodný s významem kvantilů u Gaussova rozdělení [92], [94]. Pro rozšíření pravděpodobnosti na 95 % je $kr = 2$ a pro pravděpodobnost 99,7 % je $kr = 3$. Rozšířená nejistota lze pak vyjádřit vztahem:

$$U = k_r u \quad (21)$$

Nejistoty typu B (označovány u_B) se stanovují jinak než statistickým zpracováním výsledků opakovaných měření. Jsou vyhodnocovány pro jednotlivé zdroje nejistot identifikované pro konkrétní měření. Hodnoty nejistot typu B nezávisí na počtu opakování měření (obdobně jako u systematických chyb měření) a pocházejí od různých zdrojů. Společné působení různých zdrojů nejistot vyjadřuje výsledná standardní nejistota typu B. Odhad velikosti této nejistoty lze založit na racionální úvaze vlastností měřicích přístrojů, zkušenosti z předchozích experimentů, informací z kalibračních certifikátů, katalogových listů, manuálů apod. V tomto případě je odhadnuta většinou přímo velikost nejistoty typu B pro jednotlivé části měřicího řetězce a na základě zákona o šíření nejistot je určena celková nejistota typu B [94]. V některých případech lze nejistotu typu B najít přímo v informacích od

výrobce přístroje a v kalibračním certifikátu. Pak je možné nejistotu typu B vypočítat ze známé rozšířené nejistoty U a daného koeficientu k_r .

$$u_B = \frac{U}{k_r} \quad (22)$$

Nejistoty typu C (označovány u_C) vyjadřují kombinaci nejistot měření typu A i B, neboť se v praxi jen zřídka vystačí s nejistotou typu A nebo B samostatně. Kombinovaná standardní nejistota u_C se získává sloučením standardní nejistoty typu A s výslednou standardní nejistotou typu B.

$$u_{Cx} = \sqrt{u_{Ax}^2 + u_{Bx}^2} \quad (23)$$

S pomocí výše uvedených metod jsou níže stanoveny nejistoty typu B přímých měření. Stanovení nejistot u nepřímých měření je však více komplikovanější, neboť při nich může docházet k vzájemným korelacím přímo měřených veličin (např. použitím stejného měřidla). Tuto možnost vzájemných korelací je potřeba při vyhodnocování nejistot zohlednit, čímž je celý proces výrazně komplikován.

Nejistoty přímých měření

Nejistoty přímých měření, které odpovídají nejistotě typu B, byly stanoveny na základě podkladů od výrobce či kalibračních protokolů. Hodnoty standardních nejistot typu B pro použitá měřidla při přímých měřeních, jsou uvedeny v tab. 23.

Jelikož byly naměřené hodnoty odečítány experimentátorem z analogových a digitálních měřidel, je potřeba se zabývat potenciální chybou měření vzniklou při odečtu ze stupnice.

Cílem experimentátora (popř. zapisovatele) je při odečtu hodnot měření z analogových měřidel co nejpřesnější výsledek. Ukazatel měřené veličiny se na stupnici často nekryje s žádným dílkem, ale leží např. mezi určitými dělicími čárkami. Velikost čtené hodnoty ležící mezi dělicími čárkami je často odhadována v desetinách dílku. Při odečítání hodnot se vychází z následujících empirických zásad [94]:

- je-li dělení stupnice husté a má-li dělicí čárky (rysky) tlusté (široké), jsou odhadovány poloviny dílků a chyba odhadu je $\pm 0,5$ velikosti dílku.
- jsou-li dělicí čárky dostatečně tenké proti jejich vzdálenostem, lze odhadovat desetiny nejmenších dílků stupnice a chyba je $\pm 0,1$ až $0,2$ dílku.

Další chyba může vzniknout při odečtu hodnoty vlivem paralaxy. Pokud ručka neleží v rovině stupnice a experimentátor ji nepozoruje kolmo, promítá se do nesprávné polohy. Přesnější přístroje jsou vybaveny zrcátkem pod ručičkou (při správném úhlu pohledu musí ručka zastíňovat svůj obraz).

U analogových přístrojů jsou udávány jejich třídy přesnosti T . Další z jejich specifikací je měřicí rozsah M a maximální absolutní chyba Δu , kterou lze vypočítat:

$$\Delta u = \frac{M \cdot T}{100} \quad (24)$$

Z maximální absolutní chyby Δu lze určit relativní chybu měření δx následujícím vztahem:

$$\delta x = \frac{\Delta u}{x} \quad (25)$$

Výsledné nejistoty měření vzniklé odečtem z analogových přístrojů lze tedy vypočítat následovně:

$$\Delta u_B = \sqrt{\Delta u_{B,rozsahu}^2 + \Delta u_{B,\text{čtení}}^2} \quad (26)$$

U měřidel s digitálním zobrazením odpadají chyby pozorovatele spojené s odečítáním ze stupnice, přepočítáváním údajů dle rozsahu atd.

Nejistoty nepřímých měření

Při prováděných experimentech bylo provedeno nepřímým měřením měření průtoku. To bylo měřeno na průmyslových vodoměrech a přesných stopkách. Průtok byl následně vypočítán na základě daných údajů z vodoměru za konkrétní časový úsek. Při tomto měření se mohly kumulovat chyby vodoměru, stopek času a odečítání hodnot.

5.4.2 Nejistoty měření proběhlých experimentů

U experimentálních měření, která byla součástí této práce, se předpokládá jejich zatížení nejistotami měření. Nejistoty proběhlých měření jsou zapříčiněné použitou měřicí aparaturou a způsobem odečtu naměřených hodnot. Očekávané nejistoty měření jsou vyčísleny v tab. 23.

Následující kapitola se věnuje porovnání naměřených dat z experimentálních měření s daty získanými z provedených simulací za pomoci různých komerčních softwarů.

Tab. 23 Nejistoty měření proběhlých experimentů

Měřená veličina	Měřidlo	Jednotka	Měřicí rozsah	Třída přesnosti	Nejistota typu $u_B(x_i)$	Typ rozdělení	Koeficient citlivosti A_i	Příspěvek k nejistotě $u_{B,i}(T)$
Teplota vč. odečtu	TR 60	°C	-20 ÷ 40	2	0,000	normální	1	0,902
Teplota vč. odečtu	TR 60	°C	20 ÷ 100	2	0,000	normální	1	1,089
Teplota vč. digitalizace	T352	°C	-50 ÷ 70	-	0,500	normální	1	0,500
Teplota vč. digitalizace	T410	°C	-100 ÷ 1300	-	0,500	normální	1	0,500
Teplota vč. digitalizace	T026	°C	-50 ÷ 900	-	2,000	normální	1	2,000
Tlak vč. odečtu	3402	kPa	-100 ÷ 0	0,6	0,000	normální	1	1,206
Tlak vč. odečtu	03358-AZ	kPa	-100 ÷ 0	2	0,000	normální	1	1,291
Průtok vč. odečtu	TT-WHHY	m ³	1 ÷ 30	-	0,030	-	2	0,060
Průtok vč. odečtu	TT-KDSHY	m ³	0,5 ÷ 20	-	0,030	-	2	0,060
Průtok vč. odečtu	WFW20.D	m ³	0,03 ÷ 3	-	0,030	-	2	0,060
Čas	CBC310-1	s		1	1,00	-	1	1,000

6 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ S VÝPOČTY

Naměřená data z experimentálních měření byla porovnána s návrhovými daty jednotky, které byly vypočteny pomocí vytvořeného návrhového programu v prostředí MS Excel. Za účelem ověření naměřených dat byly také provedeny simulace vybraných provozů MSF jednotky za pomoci komerčních softwarů Aspen Plus a ChemCad. Tyto simulace byly založeny na bilančním přístupu modelování procesů, které pracují v ustáleném stavu.

6.1 Porovnání výsledků měření s návrhovým výpočtem XLS

Porovnání naměřených dat z měření na experimentální jednotce MSF s jejími vybranými návrhovými daty je provedeno v kap. 5.3.1. Z dat získaných při uskutečněném měření je patrné, že skutečné provozní hodnoty se od návrhových hodnot liší max. v rozptylu $\pm 5\%$, což lze považovat za uspokojivý výsledek. Důvodem těchto nepřesností je zavedení určitého stupně zjednodušení v návrhovém výpočtu. Kompletní naměřená data proběhlých experimentálních měření jsou uvedena v příloze č. 1.

6.2 Modelování a simulace procesů

Obecně jsou při modelování procesů formulovány rovnice, které matematicky popisují daný průmyslový proces. Ve fázi simulace je formulovaný model řešen za použití vhodných postupů řešení, jakož i zadáním hodnot nezávislých vstupních proměnných, které do procesu vstupují. V dnešní době se k modelování a simulacím využívají různé druhy komerčních i speciálních softwarů, které pracují na výpočetní technice s odpovídajícím výkonem.

V průmyslové praxi je cílem modelování a simulací optimalizace návrhů, vytváření lepšího přehledu o celém procesu a v konečném důsledku vede modelování k optimálnímu provozu a řízení celého procesu [95].

Při simulaci celé jednotky jsou všechny jednotlivé zařízení procesu reprezentovány samostatně, jsou rozděleny na jednotkové operace a jsou spolu navzájem propojeny v souladu s fyzikálními zákony [59]. Základní přístup k modelování využívá matematické vztahy mezi jednotlivými procesními proměnnými. Tyto vztahy definují materiálové a energetické bilance, fyzikální zákony atd. ve formě soustavy obecných nelineárních, algebraických a diferenciálních rovnic. Model celé jednotky by měl obsahovat všechny důležité rysy kompletního procesu, a zároveň by neměl být příliš komplikovaný, aby se nestal obtížně řešitelný.

Pro předběžnou kontrolu materiálových a tepelných bilancí jednotky je dostatečný zjednodušený model. Pro detailní studie jsou nicméně požadovány velmi přesné modely.

Obecně existují dva typy procesních modelů dle časové závislosti. Jsou to:

- modely ustáleného stavu (časově nezávislé)
- dynamické modely (časově závislé).

Modely ustáleného stavu jsou časově nezávislé a jsou popsány řadou algebraických rovnic. Návrhové modely kontinuálních procesů jsou vždy v ustáleném stavu. Dynamické modely jsou časově závislé a obsahují diferenciální rovnice s podporou algebraických rovnic.

Různé varianty výpočtů procesů v ustáleném stavu jsou používány pro návrhové účely, pro parametrické studie stávajících zařízení, a také pro hodnocení výkonnosti a optimalizaci provozu [96]. Dynamické modely jsou používány pro simulace neustálených procesů a pro kontrolní účely [97].

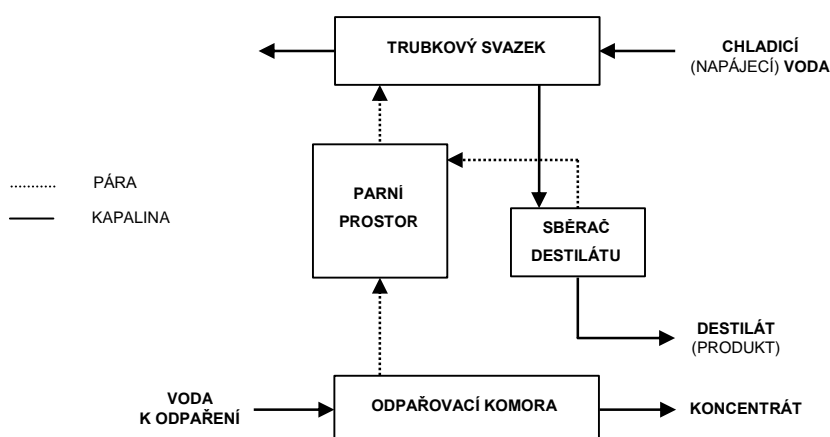
Při modelování procesů odsolování se část autorů [84], [98] zaměřovala na vývoj modelů, které jsou založeny na určitém stupni zjednodušení. Tito autoři předpokládají konstantní fyzikální vlastnosti, koeficient prostupu tepla a teplotní rozdíl ve všech stupních jednotky. Tyto zjednodušující předpoklady vedou k žádanému snížení počtu řešených rovnic, avšak na druhou stranu jsou zdrojem určitých nepřesností mezi skutečnými a návrhovými provozními daty.

Jiní autoři se zabývali vývojem sofistikovaných matematických modelů [99], [100], které berou v úvahu všechny nejdůležitější technické i ekonomické faktory ovlivňující cenu vyrobené sladké vody.

6.2.1 Model MSF jednotky

V této kapitole je analyzován princip destilační metody MSF pro účely modelování, a je zde provedeno rozdělení každého stupně jednotky na jednotkové operace. Tato kapitola rovněž popisuje modulární a rovnicový přístup, který lze využít k řešení simulací procesů v ustáleném stavu a také k řešení dynamických simulací.

Proces vícestupňového odpařování odpovídá vícesložkové destilaci bez výměny materiálu mezi jednotlivými proudy. K mžikové destilaci dochází v jednotlivých stupních jednotky za podtlaku, kde se podtlak mezi jednotlivými stupni (od prvního k poslednímu) zvyšuje, a teplota se snižuje. Z hlediska modelování je nejjednodušší popsat jeden stupeň jednotky, jenž lze dále rozdělit na čtyři dílčí části, které tvoří: odpařovací komora, parní prostor, svazek trubek a sběrač destilátu. Na obr. 70 je znázorněno blokové schéma zmíněného jednoho stupně jednotky.



Obr. 70 Jednotkové operace MSF jednotky

Každý proud je v jednotlivých stupních charakterizován těmito proměnnými: průtok, teplota, tlak a obsah rozpuštěných látek. Z těchto proměnných jsou při simulaci vypočítány následující fyzikální vlastnosti: hustota, entalpie a měrné teplo [102].

Na obr. 24 je schematicky znázorněna jednotka MSF skládající se z n stupňů, která je rozdělena, jak již bylo diskutováno v kap. 3.1.1, do tří hlavních částí: dodatkový ohřívák (BH), sekce s využitím kondenzačního tepla (HRS) a sekce bez využití kondenzačního tepla (HJS).

Před zahájením modelování MSF jednotky byly přijaty tyto základní předpoklady:

- destilát neobsahuje rozpuštěné soli
- nedochází ke strhávání kapiček slané vody do par destilátu
- systém je dokonale izolován (bez tepelných ztrát do okolí)
- teplota trubky kondenzátoru a páry je shodná
- nekondenzovatelné plyny nejsou přítomny, a tudíž nemají vliv na přestup tepla
- všechny kapalně a plynně fáze jsou dokonale promíseny
- parametry ohřívací vody jsou zadány.

MSF proces je nelineární proces, jehož vlastností je uzavřená smyčka toku informací. Dle kap. 3.1.1 může mít každá MSF jednotka různá zapojení. Pro řešení simulací musí být použity takové přístupy, které respektují tyto nelineární vlastnosti. Jedním z přístupů je současné (rovniceově založené) řešení, a druhým je postupné řešení stupeň po stupni (sekvenční nebo modulární).

Přístupy výpočtů podílejících se na jednotlivých procesních jednotkách spolu s výpočty různých fyzikálních a termodynamických vlastností, knihovna numerických rutin, konvergenčních algoritmů atd. mohou být společné pro různé výpočetní softwary. Díky tomu se pro modelování nebo simulaci jakékoli procesní jednotky o zadaných parametrech jeví použití komerčních softwarových nástrojů velmi vhodné.

Pro řešení jednoduchého modelu procesu s malým počtem rovnic lze použít např. program MS Excel, MathCad, Maple, apod. S vývojem výpočetní techniky a příslušných software, lze častěji řešit model struktury chemického procesu i s větším počtem rovnic. Nicméně se vzrůstající složitostí modelovaného procesu, do kterého může být integrováno velké množství procesních jednotek, vzrůstá i náročnost modelu. V této situaci se obvykle používají simulátory procesů (založené na procesních schématech) jako je Aspen Plus, ChemCAD, HYSYS a PRO/II. Nejrozšířenějším komerčním simulačním programem chemických procesů je dle [101] Aspen Plus.

6.3 Simulace MSF jednotky v SW Aspen Plus

Aspen Plus je moderní komerční software, který uživatelům umožňuje, mimo jiné, vytváření a spouštění simulačních modelů ustálených chemických procesů. Poskytuje flexibilní a uživatelsky přívětivé návrhové prostředí určené k dosažení maximálních inženýrských výsledků. Simulační proces v tomto software, umožňuje uživateli spouštět mnoho případů (simulací), provádět citlivostní analýzy a optimalizace. Aspen Plus zároveň také umožňuje uživateli provádět celou řadu dalších úkolů, jako je odhadování a výpočty fyzikálních vlastností, vytváření vlastních grafických a tabulkových výstupů výsledků, zadávání naměřených dat do simulačních modelů, odhad provozních nákladů, optimalizace procesu, a export výsledků do formátu XLS [102].

Proces celého systému jednotky MSF je složen z jednotkových operací, které termodynamicky ovlivňují všechny obsažené složky ve všech proudech. Složky se pohybují od jednotkových operací, přes procesní proudy do chemických složek, obsažených v každé z nich. Vývoj simulačního modelu pro chemický proces pomocí Aspen Plus zahrnuje následující kroky [103]:

- a. návrh procesního schématu (PFD) určením:
 - jednotkových operací
 - toku procesních proudů mezi jednotkovými operacemi
 - modelu každé jednotkové operace k jejímu popisu
- b. určení chemického složení složek
- c. volba termodynamického modelu, který odpovídá fyzikálním vlastnostem složek a směsí v procesu
- d. určení jednotlivých průtoků, složení a jejich termodynamických podmínek (např. teplota, tlak, fázový stav) každého vstupního proudu
- e. určení provozních podmínek.

V rámci provedených simulací MSF jednotky v SW Aspen Plus byly vytvořeny tyto modely zapojení:

- bez HJS sekce a recirkulace
- s HJS sekcí a recirkulací
- s HJS sekcí a recirkulací, se zavedením doplňovací vody do poslední odpařovací komory.

6.3.1 Popis modelu

Stejně jako jednotka, tak i její model se skládá ze čtyř hlavních částí: dodatkový ohřívák, odpařovací komora, sekce s využitím kondenzačního tepla a sekce bez využití kondenzačního tepla. V textu dále jsou popsány tyto hlavní části ve vztahu k procesním simulacím.

Dodatkový ohřívák

V dodatkovém ohříváku (BH) je dohřívána napájecí mořská voda, popř. její směs s recirkulovaným koncentrátem na požadovanou teplotu nástřiku. V tab. 24 je znázorněn BH dle aktuálního reálného procesního schématu zapojení jednotky a je

porovnán s jeho řešením v modelu pomocí SW Aspen Plus. V příloze č. 2 jsou podrobně znázorněny procesní schémata celé simulace.

Dodatkový ohřívák obsahuje dva vstupní a dva výstupní proudy. Jeden vstupní proud je tvořen směsí napájecí mořské vody a recirkulovaného koncentrátu, který je při průchodu BH ohřát na požadovanou teplotu nástřiku. Druhý vstupní proud je tvořen ohřívací vodou, která slouží pro ohřátí směsi. Uvedené proudy se vzájemně nemísí.

Při modelování v Aspen Plus je pro simulaci dodatkového ohříváku vhodný prvek *Heater* [102], tj. tepelný výměník. Ty jsou pro potřeby modelace použity dva.

Odpařovací komora

Odpařovací komora dle aktuálního procesního schématu je znázorněna v tab. 24 a rovněž je porovnána s jejím modelem pro SW Aspen Plus.

Jak je vidět na obrázku v příloze č. 2, tak odpařovací stupeň je modelován prvkem *Flash2* [102], který zajistí mžikové rovnovážné odpaření následovně: jakmile směs vstoupí do odpařovací komory, stane se přehřátou a okamžitě se její část rovnovážně odpaří jako důsledek vyrovnávání tlaků. Ve skutečném procesu jsou s párou unášeny kapky slané vody, které jsou odlučovány na odlučovači kapek. Zároveň při průchodu páry odlučovačem dochází k mírnému poklesu teploty páry v důsledku tlakové ztráty, a také v důsledku zvyšování bodu varu, který se zvyšuje postupně se zahušťováním odpařované směsi skrz jednotlivé stupně jednotky. Odlučovač vč. jeho důsledků není vzhledem k jeho komplikovanosti do modelu jednotky zahrnut.

Po průchodu odlučovačem kondenzuje pára na teplosměnných plochách trubek kondenzátoru a shromažďuje se ve sběrači destilátu. Trubkovým prostorem kondenzátoru prochází směs recirkulovaného koncentrátu a napájecí mořské vody. Této směsi je předáváno teplo uvolněné parou při její kondenzaci na vnější straně trubek.

Aby bylo možné modelovat tento proces předání tepla, tak je v modelu zahrnut tepelný výměník *Heater 1*, který simuluje fázovou přeměnu páry na kapalinu. V tomto výměníku kondenzuje pára v mezitrubkovém prostoru za uvolnění latentního tepla kondenzace, které je předáváno uvnitř proudící směsi napájecí vody a recirkulovaného kondenzátu v trubkovém prostoru. Toto předání tepla do kapaliny je modelováno pomocí tepelného výměníku *Heater 2*.

Zkondenzované páry jsou shromažďovány ve sběrači destilátu, který se nachází v dolní části kondenzátoru. Sběrače jednotlivých stupňů jsou navzájem propojeny odváděcím potrubím destilátu. Destilát každého stupně je mísen s destilátem stupně následujícího, a po průchodu posledním stupněm n je odveden do čerpadla destilátu, které odvede destilát do zásobníku. Pro modelování mísení kondenzátu z jednotlivých stupňů je použit prvek mísič (*Mixer*).

Sekce s využitím kondenzačního tepla

Sekce s využitím kondenzačního tepla (HRS) je charakterizována využitím kondenzačního tepla, k jehož předání dojde při kondenzaci par destilátu, pro předehřev směsi napájecí vody, popř. její směsi s recirkulovaným koncentrátem. V modelované čtyřstupňové jednotce je tato sekce tvořena prvními dvěma stupni.

Obecně je tato sekce tvořena všemi stupni, s výjimkou posledních dvou až tří stupňů, které jsou nazývány jako sekce bez využití kondenzačního tepla.

Pro modelování HRS je použito několik za sebou řazených odpařovacích komor dle tab. 24.

Sekce bez využití kondenzačního tepla

Sekce bez využití kondenzačního tepla (HJS) je charakterizována tím, že teplo z par není využito pro předehřev směsi napájecí vody. Toto teplo je předáno do chladicí (mořské) vody, která prochází trubkovým prostorem kondenzátorů této sekce. Separátní chlazení v této sekci přináší lepší výtěžnost kondenzátu (lepší kondenzaci) a další provozní výhody, než je tomu při nepoužití této sekce.

Sekce HJS se skládá ze tří částí. Všechny stupně části HJS jsou modelovány stejně jako v sekci HRS, avšak poslední stupeň je odlišný. V tab. 24 je znázorněn poslední stupeň jednotky v sekci HJS dle aktuálního PFD schématu a je porovnán s jeho modelem pro SW Aspen Plus.

Dle zvoleného zapojení jednotky může být do poslední odpařovací komory zaveden jeden vstupující proud navíc, který představuje doplňovací mořskou vodu (tzv. *make-up*). Také z něj vystupuje jeden proud navíc, který je reprezentován koncentrátem určeným k recirkulaci. Doplňovací mořská voda a velké množství recirkulovaného koncentrátu z posledního stupně tvoří směs, která je přivedena do trubkového prostoru kondenzátorů sekce HRS. Část koncentrátu z posledního stupně je odvedena zpět do moře. Někdy bývá tento odváděný proud nazýván „odkal“.

Tab. 24 Porovnání jednotlivých bloků MSF jednotky z PFD diagramu a modelu v Aspen Plus

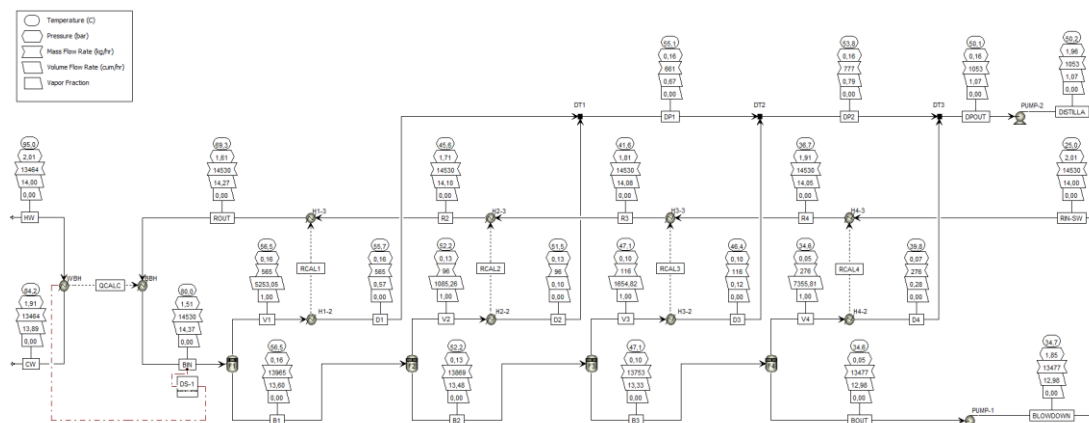
	Blok z procesního schématu	Blok v modelu
DODATKOVÝ OHŘÍVÁK		
ODPAŘOVACÍ KOMORA (1...n-1)		
POSLEDNÍ ODPÁŘOVACÍ KOMORA (n)		

6.3.1 Výstupy simulace

Po každé proběhlé simulaci průmyslového procesu a jeho procesního schématu umožňuje použitý software vytvořit souhrnnou tabulku s údaji jednotlivých procesních proudů a zařízení. Aspen Plus umožňuje zobrazení parametrů jednotlivých proudů přímo v procesním schématu a také případné provedení citlivostních analýz, při kterých jsou sledovány odezvy určených procesních proudů na změny určených faktorů.

Pro ověření vytvořeného modelu MSF jednotky byla jako vstupní data použita naměřená data při experimentálních měřeních. Následně byla výstupní data z modelu porovnána s daty získanými při měření. Ze srovnání vyplynula skutečnost, že velmi důležitými vstupními proměnnými simulovaného procesu jsou zadané hodnoty tlaků v odpařovacích komorách (tj. v prvcích *Flash2*). Po zadání naměřených hodnot tlaku do simulace byla simulací vypočítána vyšší kapacita jednotky, než je ve skutečnosti. Důvodem tohoto rozdílu je určité zjednodušení modelu, tzn., že v modelu nejsou zahrnuty teplotní ztráty, tlakové ztráty a také neobsahuje ztráty par destilátu, které jsou odvedeny vodoproudými ejektory společně s nekondenzovatelnými plyny. Při reálném provozu víceúrovňových destilačních jednotek pracujících za podtlaku není tlak v jednotlivých komorách nijak řízen. Tento tlak je dán parametry použitých evakuačních zařízení, těsností komponent, které jsou ve styku s podtlakem, a také teplotou nástřiku. Teplota nástřiku ovlivňuje tlak v odpařovacích komorách významně. Procesní schéma jednoho z modelů MSF jednotky je zobrazeno na obr. 71. Další PFD vytvořených modelů MSF jednotek v různých zapojeních za pomoci SW Aspen Plus jsou zobrazeny v příloze č. 2.

Při jedné ze simulací byla zavedena doplňovací voda (tzv. make-up) do poslední odpařovací komory. Důsledkem tohoto zapojení bylo částečné odpaření doplňovací vody v komoře a tím i zvýšená produkce destilátu. Na druhou stranu při tomto zapojení dochází ke zvýšenému průtoku páry přes odlučovač kapek. Pokud není velikost odlučovače i odpařovací komory na tento zvýšený průtok dimenzována, může tak dojít ke zhoršení slanosti destilátu. Při případném přivedení doplňovací vody do poslední odpařovací komory musí být tomuto zapojení přizpůsobena velikost této komory.



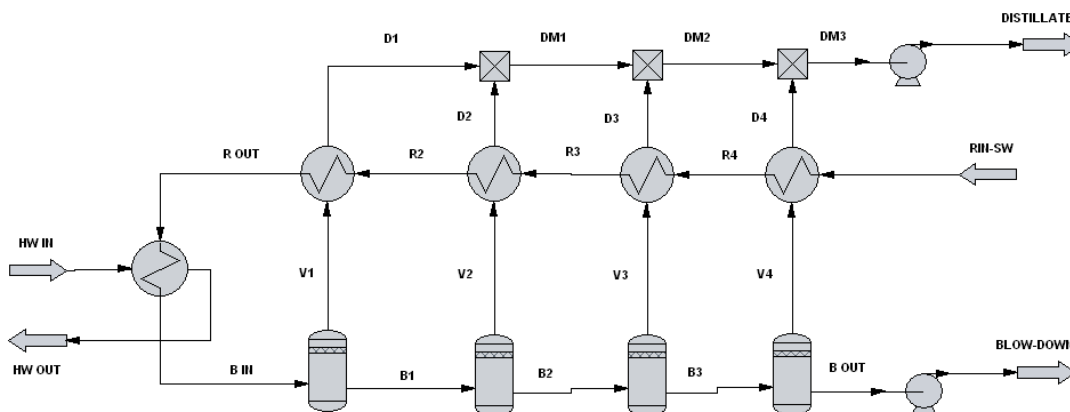
Obr. 71 PFD zapojení experimentální MSF jednotky v SW Aspen Plus

6.4 Simulace MSF jednotky v SW ChemCad

ChemCad je jedním z nejpoužívanějších softwarů pro simulaci chemických procesů a návrh vybraných aparátů.

Vytvoření modelu MSF jednotky v SW ChemCad je obdobné jako v SW Aspen Plus. Hlavním rozdílem je použití jen jednoho výměníku, který zajistí kondenzaci par sladké vody a následné převedení latentního tepla kondenzace do směsi napájecí vody proudící uvnitř teplosměnných trubek kondenzátoru.

V rámci této práce bylo vytvořeno v SW ChemCad jednodručné (OT) zapojení jednotky MSF, tj. bez recirkulace a HJS sekce (viz obr. 72 a příloha č. 3). Do modelu byla zahrnuta stejná zjednodušení jako do modelu vytvořeného v SW Aspen Plus. Výsledky simulace byly porovnány s výsledky experimentálního měření i výsledky simulace provedené v SW Aspen Plus. V případě zadání stejných vstupních proměnných vstupujících do obou simulací jsou výsledky téměř shodné. Při porovnání výsledků simulace, jejíž vstupní data vycházela z experimentálních měření, dochází ke stejnému efektu jako při simulaci v SW Aspen Plus, tj. kapacita jednotky významně závisí na zadaném tlaku v jednotlivých odpařovacích komorách. Závislost kapacity jednotky i množství vody odpařené v jednotlivých stupních jednotky, na zadaném podtlaku, je patrné z výstupních dat provedených simulací v příloze č. 3.



Obr. 72 PFD zapojení experimentální MSF jednotky v SW ChemCad

Výsledky provedených simulací v SW Aspen Plus a ChemCad verifikovaly správnost naměřených dat a potvrzují shodu a platnost provedených experimentů. Provedené simulace poskytly informace o hlavních provozních parametrech v jednotlivých částech experimentální jednotky i tam, kde nebyly instalovány měřicí přístroje.

Následující (závěrečná) kapitola pojednává o možnostech využití vyvíjených MSF jednotek a také o ekonomických aspektech vybraných metod odsolování.

7 MOŽNOSTI VYUŽITÍ VYVÍJENÝCH ZAŘÍZENÍ

Využití zařízení pro úpravu mořské vody je velmi široké. Kromě primárního účelu použití destilačních jednotek k odsolování mořské vody je lze také použít na čištění jiných vod (než mořských) od znečištění. Jako velmi zajímavé se jeví použití těchto destilačních jednotek k zahušťování specifických roztoků, kde dosud tyto způsoby realizace zahušťování nebyly z různých důvodů použity.

Součástí rozhodování o využití různých odsolovacích jednotek jsou ekonomické aspekty.

7.1 Možnosti využití

Přehled očekávaných možností využití vyvíjených jednotek je uveden v následných odstavcích této kapitoly.

7.1.1 Odsolovací jednotky

V oblasti odsolování mořské vody se očekává nejširší okruh potenciálních zákazníků. Spousta zákazníků v tzv. suchých státech má k dispozici velké množství odpadního tepla. Výčet potenciálních zákazníků potřebujících odsolovací zařízení je:

- zákazník s dostatkem odpadního tepla
 - lodě
 - vrtné plošiny
 - podobné další pozemní aplikace
- zákazník z míst, kde jsou levné primární energie (zemní plyn, nafta)
- zákazník, kterému dodává tepelnou energii sluneční záření.

7.1.2 Jednotky pro čištění vody

Druhou oblastí jsou aplikace pro čištění různě znečištěných vod. Nežádoucí látky zůstávají v koncentrátu, produkovaný destilát je bez těchto složek a lze ho opětovně použít v technologii. Oblasti, kde lze využít destilace pro čištění různých druhů kapalin jsou [104]:

- čištění oplachových vod (strojní průmysl, galvanické pokovování)
- čištění průsakových vod na skládkách odpadu
- čištění mazacích a olejových směsí
- čištění vývojek a ustalovačů ve fotografickém průmyslu
- čištění odmašťovacích, mořicích a omílacích vod v oblasti povrchových úprav.

7.1.3 Zahušťovací jednotky

Další velmi zajímavou oblastí použití vyvíjených jednotek je redukce objemu odpadních vod z různých technologií. Použitím vyvíjených jednotek lze zajistit odpaření značné části rozpouštědla (vody) a objem znečištěných odpadních vod se tak značně sníží. Toto snížení objemu odpadních vod přináší finanční úspory výdajů za jejich likvidaci. Oblasti, kde lze využít zahušťování jsou [104]:

- zahušťování kejdy v agroprůmyslu
- zahušťování zbytkového fugátu z bioplynových stanic
- apod.

Zahušťování zbytkového fugátu z BPS

Jednou z možných aplikací vyvíjených destilačních jednotek se jeví jejich použití pro zahušťování zbytkového fugátu z bioplynových stanic. Většina BPS při své činnosti zpracovává materiály rostlinného původu a statková hnojiva. Zároveň produkují bioplyn, digestát a fugát. Bioplyn je žádaným produktem, avšak digestát a fugát není žádoucí.

Digestát je tuhý zbytek po fermentačním procesu při výrobě bioplynu se sníženým obsahem biologicky rozložitelných látek. Tento materiál, pokud vyhovuje všem parametrům stanoveným vyhláškou Ministerstva životního prostředí, lze využít jako hnojivo, přídatek do kompostu nebo k úpravě povrchu terénu [105].

Fugát je oddělená kapalná část z digestátu (neboli procesní voda), která se používá jako organické hnojivo ke hnojení zemědělské půdy [105]. Obsah sušiny ve fugátu se obvykle pohybuje v rozmezí 2 až 12 %, v závislosti na typu a provozu BPS.

V zavedené praxi jsou uvedené odpadní materiály využívány jako organické hnojivo a jsou vyváženy na pole. Mimo vegetační období (v zimních měsících) není vyvážení z legislativních důvodů dovoleno, a tudíž každá BPS musí být vybavena velkými zásobníky na tyto produkty. Zbytkový fugát není možné z hygienických důvodů vypouštět do veřejné kanalizace.

Cílem aplikace technologie MSF pro zahušťování fugátu je oddělení rozpouštědla (tj. vody) z jeho roztoku se sušinou. Zahuštěný fugát přinese provozovatelům BPS ekonomický efekt v úspoře za vývoz fugátu o původní koncentraci sušiny do pole. Zahuštěný fugát bude mít cca poloviční až třetinový objem proti původnímu objemu a bude opět vyvážen jako organické hnojivo na pole. Dalším ekonomickým efektem aplikace zahušťování odpadních produktů z BPS je možnost úspory za potřebné skladovací nádrže.

Proces zahušťování fugátu s obsahem sušiny cca 6 % bude prováděn do úrovně obsahu sušiny cca 12 % a vyšší podle toho, co technologie při zkoušce umožní a současně dle požadavku uživatele a vzhledem k technickým možnostem dalšího zpracování fugátu. Separovaná voda se zbytky rozpuštěného amoniaku se bude neutralizovat vhodným způsobem tak, aby neměla statut nebezpečného odpadu. Chemický rozbor vybraného vzorku fugátu je uveden v tab. 25.

Na aplikaci technologie MSF pro zahušťování fugátu má velmi výrazný vliv náchylnost daného fugátu k pění při jeho zahušťování a případné použití metod pro potlačení pění účinků fugátu.

Tab. 25 Chemický rozbor vzorku fugátu [106]

Parametr	Jednotka	Hodnota	Nejistota měření
Sušina vzorku (105 °C)	%	6,98	10 %
Dusík celkový	mg/kg suš.	103 000	10 %
Síra celková	% suš.	1	10 %
Vápník	mg/kg suš.	22 800	20 %
CaO	% suš.	3,19	20 %
Hořčík	mg/kg suš.	9 000	20 %
MgO	% suš.	1,49	20 %
Draslík	mg/kg suš.	69 700	20 %
K ₂ O	% suš.	8,4	20 %
Fosfor celkový	mg/kg suš.	suš.	20 %
P ₂ O ₅	% suš.	3,61	20 %
Arsen	mg/kg suš.	<0,70	20 %
Kadmium	mg/kg suš.	0,36	20 %
Chrom	mg/kg suš.	7,12	20 %
Měď	mg/kg suš.	109	20 %
Molybden	mg/kg suš.	13,5	20 %
Nikl	mg/kg suš.	10,2	20 %
Olovo	mg/kg suš.	1,49	20 %
Zinek	mg/kg suš.	635	20 %
Rtuť	mg/kg suš.	0,029	20 %

7.2 Ekonomické aspekty

Významným parametrem hodnocení každého zařízení na trhu je jeho ekonomická výhodnost. Ta se převážně posuzuje z velikosti investičních a provozních nákladů. V drtivé většině průmyslových odvětví existuje celá řada aplikací, ve kterých vzniká odpadní teplo. V těchto aplikacích je často využití destilačních metod velmi výhodné.

Jak již bylo zmíněno, tak velmi významnou oblastí jsou aplikace pro čištění různě znečištěných vod. Nežádoucí látky zůstávají v koncentrátu, produkovaný destilát je bez těchto složek a lze ho opětovně použít. V těchto aplikacích je největším ekonomickým přínosem finanční úspora výdajů za likvidaci menších objemů znečištěných vod.

7.2.1 Ekonomické porovnání tepelných membránových metod

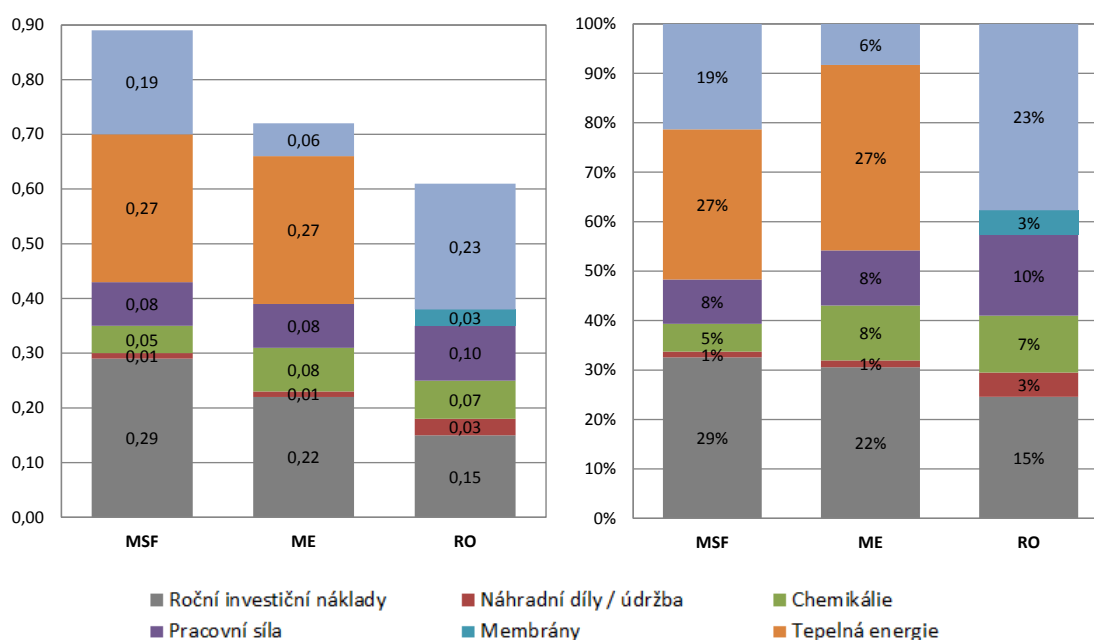
Provedení ekonomického porovnání dostupných metod odsolování není snadné, jelikož jsou v různých částech světa odlišné veškeré vstupní náklady, jako jsou např. ceny energií a technického personálu.

V tab. 26 jsou přehledně porovnány spotřeby energií, náklady na energie i kvalita výsledné sladké vody pro různé metody odsolování. Data v tabulce jsou čerpána z široké škály dostupné literatury a jsou platná při použití zdrojové mořské

vody o slanosti cca 35 000 ppm. Na obr. 73a a obr. 73b jsou souhrnně znázorněny finanční náklady spojené s vybranými metodami (data jsou platná pro jednotky s velkými kapacitami cca. 100 tis. m³/den).

Tab. 26 Porovnání nákladů na výsledný produkt i spotřeby tepla vybraných metod odsolování [47]

Metoda	Spotřeba tepla [MJ/m ³]	Ekvivalent tepelné spotřeby v elektrické [kWh/m ³]	Spotřeba elektriny [kWh/m ³]	Celková spotřeba [kWh/m ³]	Kvalita produktu [mg/l]	Náklady na produkt [USD/m ³]
MSF	190 ÷ 282	15,8 ÷ 23,5	2,5 ÷ 5	19,6 ÷ 27,2	< 10	0,6 ÷ 1,7
ME	145 ÷ 230	12,2 ÷ 19,1	2 ÷ 2,5	14,5 ÷ 21,4	< 10	0,5 ÷ 1,5
MVC	-	-	7 ÷ 12	7 ÷ 12	< 10	2,0 ÷ 2,6
TVC	227	14,5	1,6 ÷ 1,8	16,3	< 10	0,9 ÷ 1,0
RO	-	-	4 ÷ 6	4 ÷ 6	400 ÷ 500	0,5 ÷ 1,7
ED	-	-	1,5 ÷ 4	1,5 ÷ 4	150 ÷ 500	0,6 ÷ 1,0
Solární CSP/ME	145 ÷ 230	12,2 ÷ 19,1	2 ÷ 2,5	14,5 ÷ 21,4	< 10	2,4 ÷ 2,8
Solární FV/RO	-	-	4 ÷ 6	4 ÷ 6	400 ÷ 500	11,7 ÷ 15,6
Solární FV/ED	-	-	1,5 ÷ 4	1,5 ÷ 4	150 ÷ 500	10,4 ÷ 11,7
Větrný/RO	-	-	4 ÷ 6	4 ÷ 6	400 ÷ 500	1,9 ÷ 9,0
Větrný/MVC	-	-	7 ÷ 12	7 ÷ 12	< 10	5,2 ÷ 7,8
Geotermální/ME	145 ÷ 230	12,2 ÷ 19,1	2 ÷ 2,5	14,5 ÷ 21,4	< 10	2,0 ÷ 2,8



a) celkové náklady na jednotku odsolené vody (USD/1 m³)

b) zastoupení jednotlivých nákladových položek

Obr. 73 Finanční náklady vybraných metod odsolování [19]

Přístupy pro výpočty nákladů na jednotku sladké vody jsou velmi různé a liší se v závislosti na konkrétní aplikaci. Tato variabilita je dána mnoha faktory, které jsou jedinečné pro každou konkrétní aplikaci. Nejdůležitějšími faktory mající vliv na cenu sladké vody jsou [4]:

- použitá metoda odsolování
- salinita zdrojové napájecí vody
- použitý zdroj energie (konvekční nebo obnovitelný).

Celková cena sladké vody dle [107] respektující všechny ovlivňující faktory je dána:

- investičními náklady
- úrokovými sazbami
- cenami energií
- cenou obslužného personálu
- servisními náklady
- náklady na náhradní díly
- disponibilitou jednotky.

V odborné literatuře bývají výpočty nákladů na odsolování založeny na různých přístupech, které se odlišují dle různých autorů. Rozdíly v přístupech autorů spočívají zejména v zahrnutí či nezahrnutí investičních nákladů, nákladů na obslužný personál, úrokových sazeb a také bývá uvažována různá délka životnosti zařízení [4]. V posledních letech dochází k výraznému snižování nákladů na odsolování díky efektivnějším metodám i příznivějším pořizovacím cenám použitých technologií [108].

Pro odsolování brakické vody je nejpoužívanější i nejvíce ekonomická metoda RO. Při odsolování mořské vody se v posledních letech stává nejpoužívanější také metoda RO, a to hlavně z důvodu snížení ceny používaných membrán. Z pohledu velikosti odsolovacích jednotek jsou nejvíce efektivní ty, které mají vyšší kapacitu (viz tab. 27).

Z pohledu použitého zdroje energie lze jednotky pro odsolování mořské vody rozdělit na ty, které využívají konvekční zdroje (běžné primární zdroje energie), a ty které využívají zdroje obnovitelné. Jak je známo, a lze vidět z porovnání nákladů v tab. 28, tak náklady na výrobu sladké vody při použití konvekčních zdrojů energie jsou nižší než při použití OZE. Použití obnovitelných zdrojů energie, jako energetického zdroje pro odsolovací jednotky, přináší atraktivní řešení z hlediska příznivých dopadů na životní prostředí, které jsou vyvolané v důsledku nižší spotřeby konvekčních zdrojů energie a nižší produkcí emisí (na rozdíl od konvenčních zdrojů).

Z hlediska použité metody lze odsolovací procesy rozdělit na tepelné (s fázovou přeměnou) a membránové (bez fázové přeměny). Porovnání nákladů odsolování při použití tepelných metod je znázorněno v tab. 29 a pro membránové metody (RO) v tab. 30. Tepelné metody jsou efektivnější při odsolování velmi slané vody (než membránové metody) [109]. Mají (v porovnání s membránovými) vyšší provozní náklady z důvodu značné spotřeby tepelné energie pro probíhající destilační proces. V oblasti odsolování brakické vody nahradily membránové metody tepelné metody, protože přinášejí nižší provozní náklady. Na druhou stranu jsou membránové metody méně vhodné pro odsolování velmi slané mořské vody

z důvodu poměrně vysokých cen membrán a potřeby jejich časté výměny. V praxi se rovněž využívají hybridní metody nebo kogenerační zapojení jednotek, které přináší vyšší efektivitu, a tudíž i nižší provozní náklady. Reverzní osmóza, jako hlavní představitel membránových metod, se v posledním desetiletí značně rozšířila a překonala tepelné metody v počtu nových aplikací [4].

Tab. 27 Cena sladké vody v závislosti na kapacitě jednotky [109]

Zdrojová voda	Velikost jednotky [m ³ /den]	Cena [EUR/m ³]
Brakická	< 1000	0,63 ÷ 1,06
	5 000 ÷ 60 000	0,21 ÷ 0,43
Mořská	< 1000	1,78 ÷ 9,00
	1 000 ÷ 5 000	0,56 ÷ 3,15
	12 000 ÷ 60 000	0,35 ÷ 1,30
	> 60 000	0,40 ÷ 0,80

Tab. 28 Cena sladké vody v závislosti na použitém zdroji energie [109]

Zdrojová voda	Použitý zdroj energie	Cena [EUR/m ³]
Brakická	konvekční	0,21 ÷ 1,06
	fotovoltaická	4,50 ÷ 10,32
	geotermální	2,00
Mořská	konvekční	0,35 ÷ 2,70
	větrná	1,00 ÷ 5,00
	fotovoltaická	3,14 ÷ 9,00
	solární tepelná	3,50 ÷ 8,00

Tab. 29 Cena sladké vody při použití tepelných metod odsolování [109]

Metoda	Velikost jednotky [m ³ /den]	Cena [EUR/m ³]
ME	< 100	2,00 ÷ 8,00
	12 000 ÷ 55 000	0,76 ÷ 1,56
	> 90 000	0,42 ÷ 0,81
	MSF	23 000 ÷ 528 000
VC	1 000 ÷ 1 200	1,61 ÷ 2,13

Tab. 30 Cena sladké vody při použití RO [109]

Zdrojová voda	Velikost jednotky [m ³ /den]	Cena [EUR/m ³]
Brakická	< 20	4,50 ÷ 10,32
	20 ÷ 1 200	0,62 ÷ 1,06
	40 000 ÷ 46 000	0,21 ÷ 0,43
Mořská	< 100	1,20 ÷ 15,00
	250 ÷ 1 000	1,00 ÷ 3,14
	1 000 ÷ 4 800	0,56 ÷ 1,38
	15 000 ÷ 60 000	0,38 ÷ 1,30
	100 000 ÷ 320 000	0,36 ÷ 0,53

7.2.2 Pořizovací ceny

Za účelem získání povědomí o prodejních cenách odsolovacích jednotek bylo poptáno několik výrobců na jednotky s kapacitou 50 a 500 m³/den. Ceny jednotek různých výrobců a vybrané jejich parametry jsou uvedeny v tab. 31.

Tab. 31 Pořizovací ceny jednotek s kapacitou 50 a 500 m³ a vybrané jejich parametry

Výrobce	Kapacita [m ³ /den]	Princip [-]	Počet stupňů [-]	Cena jednotky [EUR]	Cena/m ³ [EUR]	Spotřeba tepla [kW _t]	El. spotřeba [kW _e]	Ohřívací voda [m ³ /h]	Ohřívací voda [°C]	Příslušenství [-]
APV	50	MSF (PHE)	-	53 530	1 071	1 630	-	100	80	FP, SP, CDU
Sondex	45	MSF (PHE)	-	41 000	911	1 500	23-30	92	85	FP, SP, CDU
Peter Taboada	45	MSF (PHE)	-	52 650	1 170	1 500	26	72	90	FP, SP, CDU
Sasakura	50	ME	1	50 400	1 008	1 400	13	93	80	FP, SP
Sasakura	500	-	-	1 680 000	3 360	-	-	-	-	-
Hamworthy	45	MSF	2	80 000	1 778	771	-	70	80	-
Hamworthy	500	MSF	12	1 000 000	2 000	2 000	-	-	-	-
PBS	50	MSF	4	45 000	900	800	3	55	90	FP, SP, CDU
PBS	500	MSF	16	500 000	1 000	2 000	10	350	90	FP, SP, CDU
Peter Taboada	50	RO	-	33 000	660	0	20	-	-	-
Peter Taboada	500	RO	-	230 200	460	0	70	-	-	-

8 ZÁVĚR

Účelem předložené dizertační práce je informovat o provedených činnostech souvisejících s výzkumem jednotek pro úpravu mořské vody, které mají široké spektrum uplatnění. Průmysl zabývající se získáváním sladké vody odsolováním mořské vody je již dlouhou dobu na vzestupu. Světové odsolovací kapacity rostou geometrickou řadou.

Cílem práce byl výzkum a vývoj jednotek pro malé a středně velké aplikace s kapacitou do 1500 m³/den. Produkt je mířen k zákazníkům s potřebou odsolené vody, kteří mají levný přístup k primárním energiím nebo mají dostatek odpadního tepla.

Hlavními cíli dizertační práce bylo provedení jednotlivých vývojových fází, jako je návrh, výroba, testování a komplexní vyhodnocení modulových jednotek pracujících na principu destilace pro úpravu mořské vody metodami MSF a ME, přičemž největší důraz byl kladen na výzkum a vývoj jednotky na principu MSF.

Stěžejním bodem práce je konstrukce odsolovacích jednotek MSF se zahrnutím řady inovativních prvků s cílem zvýšení účinnosti procesu a snížení ceny pro vyšší konkurenceschopnost.

Práce obsahuje řešení všech stanovených cílů. Hlavní body řešené problematiky jsou graficky znázorněny na obr. 74.

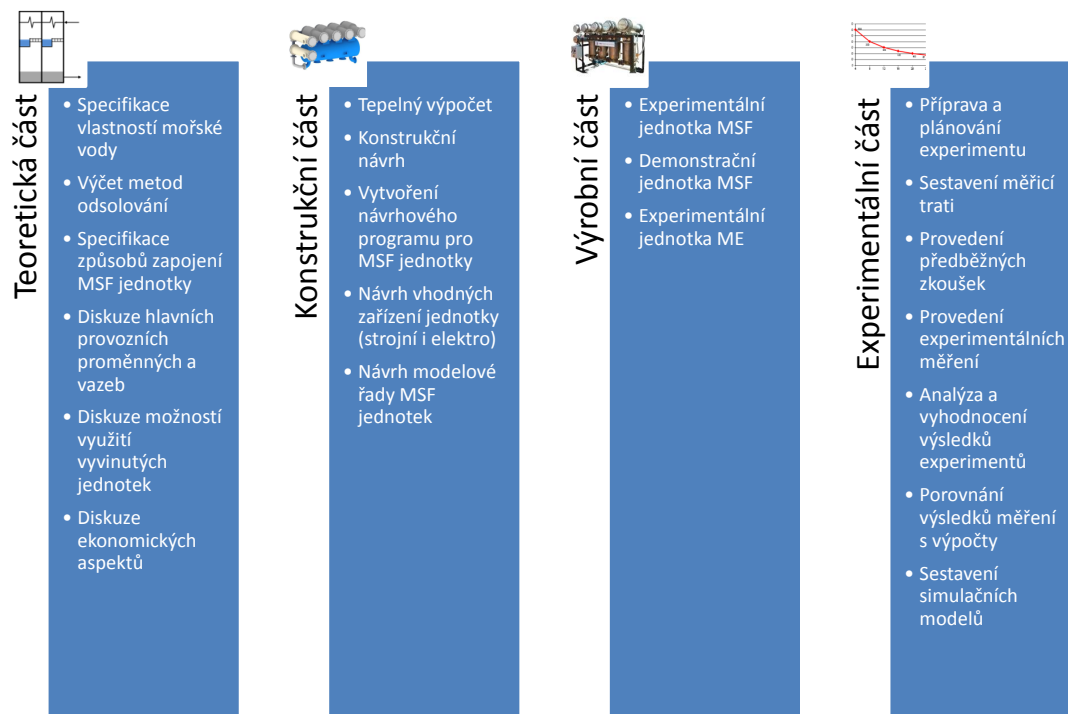
Úvodní část práce seznamuje s vlastnostmi mořské vody a používanými metodami odsolování. V další části práce je proveden návrh jednotky na principu MSF, který se skládá z tepelného a konstrukčního návrhu. Pro zefektivnění fáze návrhu modulových MSF jednotek byl vytvořen návrhový program, který pracuje v prostředí MS Excel.

Na základě výchozích návrhů byla vyrobena experimentální jednotka MSF, na kterou byl kladen největší důraz. Na tomto experimentálním prototypu byl proveden základní experimentální výzkum. Na základě zkušeností s experimentální jednotkou MSF byl vyroben 1 ks optimalizovaného prototypu (demonstrační jednotka), jehož účelem byl demonstrační provoz na egyptském pobřeží (ve městě El Quseir) u potenciálního zákazníka v časovém horizontu jednoho roku.

Práce se rovněž zabývá plánováním experimentů, jelikož jejich pečlivé naplánování představuje stěžejní část pro následné úspěšné a efektivní provedení experimentálních měření. Pro provedení experimentálních měření byla navržena a sestavena měřicí trať odsolovacích jednotek. Detailním experimentálním měřením předcházely předběžné zkoušky pro ověření konstrukčního návrhu MSF jednotky a jejich jednotlivých základních komponent. Po provedení předběžných zkoušek bylo přistoupeno k detailním experimentálním měřením, které probíhaly dle stanoveného plánu experimentu. Výsledky předběžných zkoušek i experimentálních měření jsou v práci představeny a diskutovány. Výsledky měření jsou porovnány s výpočty. Vybrané výpočty byly provedeny pomocí simulací v komerčních SW Aspen Plus a ChemCad. Rovněž jsou diskutovány poznatky z provozu demonstrační jednotky MSF.

Na základě výchozích návrhů byla rovněž vyrobena experimentální jednotka ME, o které tato práce pojednává jen okrajově. Na této jednotce byl proveden experimentální výzkum pro aplikaci odsolování mořské vody a pro aplikaci zahušťování.

V závěru práce jsou diskutovány možnosti využití vyvíjených jednotek, které umožňují širokou škálu možností využití v různých odvětvích průmyslu.



Obr. 74 Grafické shrnutí provedených činností v rámci řešené dizertační práce

Práce pojednává i o nákladech na odsolování, které se v posledních několika letech snížily díky efektivnějším řešením odsolovacích jednotek. Zdrojem snah pro snižování cen byly hlavně rostoucí ceny fosilních paliv. U metod využívajících konvekční zdroje energie se náklady na odsolování mořské vody pohybují v rozmezí $0,3 \div 3 \text{ EUR/m}^3$ (v závislosti na použité metodě a velikosti jednotky). Při odsolování brakické vody jsou tyto náklady přibližně poloviční. V aplikacích, které využívají obnovitelné zdroje energie, se mohou náklady dostat až na 15 EUR/m^3 . Na druhou stranu jsou tyto náklady vykompenzované environmentálními výhodami. Tepelné metody jsou obecně využívány pro střední až velké aplikace a membránové metody (hlavně RO) pro menší aplikace.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KHAWAJI, Akili D., Ibrahim K. KUTUBKHANAH a Jong-Mihn WIE. Advances in seawater desalination technologies. *Desalination*. 2008, č. 221, s. 47-69. ISSN 00119164.
- [2] VEDACHALAM, Sridhar a Susan J. RIHA. Desalination in northeastern U.S: Lessons from four case studies. *Desalination*. 2012, č. 297, s. 104-110. ISSN 00119164.
- [3] ETTOUNEY, Hisham a Hisham EL-DESSOUKY. Teaching desalination. *Desalination*. 2001, č. 141, s. 109-127. ISSN 00119164.
- [4] KARAGIANNIS, Ioannis C. a Petros G. SOLDATOS. Water desalination cost literature: review and assessment. *Desalination*. 2008, č. 223, s. 448-456. ISSN 00119164.
- [5] *Role of desalination in addressing water scarcity*. New York: United Nations, 2009, 46 s. ESCWA water development report. ISBN 978-92-1-128329-7.
- [6] BUROS, O.K. *The ABC's of Desalting*. Topsfield (Massachusetts, USA), 1990.
- [7] U.S. CONGRESS, Office of Technology Assessment. *Using Desalination Technologies for Water Treatment*. Washington, DC: U.S. Government Printing Office, 1988.
- [8] Global Water Intelligence: Desalination industry enjoys growth spurt as scarcity starts to bite. [online]. [cit. 2013-03-30]. Dostupné z: <http://www.globalwaterintel.com/desalination-industry-enjoys-growth-spurt-scarcity-starts-bite/>
- [9] SCHIFFLER, Manuel. Perspectives and challenges for desalination in the 21st century. *Desalination*. roč. 165, s. 1-9. ISSN 00119164.
- [10] *Desalination: A National Perspective*. Washington, D.C.: National Academies Press, 2008, 298 s. ISBN 03-091-1924-3.
- [11] MORRISSEY, John F. a James L. SUMICH. *Introduction to the biology of marine life*. 10. vyd. Sudbury, MA: Jones, 2012, 467 s. ISBN 07-637-8160-6.
- [12] TZEN, Eftihia. CENTRE FOR RENEWABLE ENERGY SOURCES AND SAVING. *Promotion of Renewable Energy for Water production through Desalination: Desalination Technologies (I)*.
- [13] TEAM, Prepared by an Open University Course. *Seawater: its composition, properties, and behaviour*. 2. vyd. Oxford, UK: Butterworth Heinemann, 2004. ISBN 07-506-3715-3.
- [14] WORLD HEALTH ORGANIZATION. *Guidelines for drinking-water quality: incorporating 1st and 2nd addenda, Vol.1, Recommendations*. [online]. Geneva, 2008 [cit. 2014-01-19]. 3. vyd. Dostupné z: http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/fulltext.pdf

- [15] MALIK, U. a Mayan KUTTY. Corrosion and Material Selection in Desalination Plants. *Seminar of Saline Water Conversion Corporation*. 1992, s. 653-684.
- [16] HAARHOFF, Johannes a James K. EDZWALD. Adapting dissolved air flotation for the clarification of seawater. *Desalination*. 2013, roč. 311, s. 90-94.
- [17] KUKAL, Z. *Základy oceánografie*. Academia, 1977.
- [18] HERBER, Vladimír. GEOGRAFICKÝ ÚSTAV PŘÍRODOVĚDECKÉ FAKULTY MASARYKOVY UNIVERZITY BRNO. *Geografie Světového oceánu*. 2005.
- [19] THYE, John Frederick. YALE SCHOOL OF FORESTRY AND ENVIRONMENTAL STUDIES. *Desalination: Can it be greenhouse gas free and cost Competitive?* 2010.
- [20] UCLA MARINE SCIENCE CENTER. *Ocean Globe: Seawater Density & Salinity*. 2000.
- [21] HARQAWY, Mostafa H., John H. LIENHARD a Syed M. ZUBAIR. Thermophysical properties of seawater: a review of existing correlations and data. *Desalination and Water Treatment*. 2010, roč. 16, s. 354-380. ISSN 1944-3994.
- [22] BANAT, Fawzi. Economic and technical assessment of desalination technologies. [online]. 2007 [cit. 2013-04-04]. Dostupné z: <http://www.desline.com/Geneva/Banat.pdf>
- [23] GLOBAL WATER INTELLIGENCE. *IDA Desalination Yearbook 2010-2011: DesalData Database*. 2011.
- [24] HAMED, Osman A. Overview of hybrid desalination systems - current status and future prospects. *Desalination*. 2005, č. 186, s. 207-214. ISSN 00119164.
- [25] AMERICAN MEMBRANE TECHNOLOGY ASSOCIATION. *Water Desalination Process*. 2007. Dostupné z: http://www.amtaorg.com/wp-content/uploads/8_WaterDesalinationProcesses.pdf
- [26] QIBLAWEY, Hazim Mohameed a Fawzi BANAT. Solar thermal desalination technologies. *Desalination*. 2008, č. 220, s. 633-644. ISSN 00119164.
- [27] MILLER, James E. Review of Water Resources and Desalination Technologies. In: Albuquerque: Sandia National Laboratories, 2003.
- [28] YOUNOS, Tamim a Kimberly E. TULOOU. Overview of Desalination Techniques. In: *Journal of Contemporary Water Research & Education: Universities Council on Water Resources*. Virginia Polytechnic Institute and State University, 2005, s. 3-10.
- [29] HÁJEK, Zdeněk a Zdeněk JEGLA. Recentsituation and actual possibilities in development of seawater desalination equipment. *Chemical Engineering Transactions*, 2012, č. 29, s. 1381-1386. ISSN 1974-9791, AIDIC ServiziS.r.l.

- [30] MEZHER, Toufic, Hassan FATH, Zeina ABBAS a Arslan KHALED. Techno-economic assessment and environmental impacts of desalination technologies. *Desalination*. 2010, č. 266, s. 263-273. ISSN 00119164.
- [31] KISS, Anton Alexandru. *Advanced Distillation Technologies: Design, Control and Applications*. I. West Sussex: John Wiley and Sons Ltd., 2013, 413 s. ISBN 9781119993612.
- [32] WAGNER, Wolfgang, Hans-Joachim KRETZSCHMAR. *International steam tables: properties of water and steam based on the industrial formulation IAPWS-IF97* : 2. vyd. Berlin: Springer, 2008, 388 s. ISBN 978-354-0742-340.
- [33] JELÍNEK, Luděk. *Desalinační a separační metody v úpravě vody*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2008, 171 s. ISBN 978-80-7080-705-7.
- [34] PBS POWER EQUIPMENT, s.r.o. *MULTI-STAGE FLASH (MSF) FRESH WATER GENERATOR* [prospekt]. 4 s.
- [35] KADLEC, Pavel, Karel MELZUCH a Michal VOLDŘICH. *Procesy a zařízení potravinářských a biotechnologických výroby*. Vyd. 1. Ostrava: Key Publishing, 2012, 494 s. ISBN 978-80-7418-086-6.
- [36] DUTTA, Binay K. *Principles of Mass Transfer and Separation Processes*. 3. vyd. New Delhi: Prentice Hall of India, 2009. ISBN 978-812-0329-904.
- [37] WATSON, Ian C., O. J., Jr. MORIN a Lisa HENTHORNE. ROSTEK ASSOCIATES, Inc. *Desalting Handbook for Planners*. 2003. 3.
- [38] Odsolování vody: Destilace, vymrazování, komprese a další. MURTINGER, Karel. *Nazeleno.cz* [online]. [cit. 2013-04-14]. Dostupné z: <http://www.nazeleno.cz/technologie-1/odsolovani-vody-destilace-vymrazovani-komprese-a-dalsi.aspx>
- [39] TIEN, Chi. *Transport Mechanisms in Membrane Separation Processes*. New York: Springer, 1991, 219 s. ISBN 978-1-4613-6636-2.
- [40] PALATÝ, Zdeněk a Bohumil BERNAUER. *Membránové procesy*. Vyd. 1. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2012, 282 s. ISBN 978-80-7080-808-5.
- [41] HÜBNER, Pavel. *Úprava vody v energetice*. Vyd. 1. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2010, 296 s. ISBN 978-80-7080-746-0.
- [42] Seawater Desalination Unit/Plant - Made in Japan: Standard Seawater Desalination Process for Our Units. [online]. 2013 [cit. 2014-01-29]. Dostupné z: <http://www.desalination.jp/whats-new/113/>
- [43] Membrane System. GENERAL ELECTRIC COMPANY. [online]. 2012 [cit. 2014-01-28]. Dostupné z: http://www.gewater.com/handbook/ext_treatment/ch_9_membrane.jsp
- [44] MECHELL, Justin K. a Bruce LESIKAR. TEXAS WATER RESOURCES INSTITUTE. *Desalination Methods for Producing Drinking Water*. Texas (USA), 2010.
- [45] WATER SECURE. Glossary [online]. [cit. 2014-01-28]. Dostupné z: <http://www.watersecure.com.au/pub/resources/glossary>

- [46] GENERALIC, Eni. *Electrodialysis: Croatian-English Chemistry Dictionary & Glossary* [online]. 2013. vyd. Split: KTF [cit. 2014-01-28]. Dostupné z: <http://glossary.periodni.com>
- [47] AL-KARAGHOULI a Lawrence L. KAZMERSKI. NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY. Comparisons of Technical and Economic Performance of the Main Desalination Processes with and without Renewable Energy Coupling. Golden, Colorado, 2011.
- [48] PURE AQUA, Inc. *Pure Aqua: Global Leader in Water Treatment and Reverse Osmosis* [online]. [cit. 2014-01-05]. Dostupné z: <http://www.pureaqua.com/>
- [49] TCHOBANOGLOUS, George, Franklin L BURTON a H STENSEL. *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. 4. vyd. Boston: McGraw-Hill, 2003, 1819 s. ISBN 00-711-2250-8.
- [50] VOUTCHKOV, Nikolay. SUNCAM. *Re-mineralization of Desalinated Water*. SunCam, 2011.
- [51] EL-DESSOUKY, Hisham T a Hisham Mohamed ETTOUNEY. *Fundamentals of salt water desalination*. 1. vyd. New York: Elsevier, 2002, 670 s. ISBN 04-445-0810-4.
- [52] EL-DESSOUKY, Hisham, Imad ALATIQUI a Hisham ETTOUNEY. Process Synthesis: The Multi-stage Flash Desalination System. *Desalination*. 1998, roč. 115, č. 2, s. 155-179.
- [53] ETTOUNEY, H.M., N. ABDEL-JABBAR, F.S. MJALLI a H. QIBLAWY. Development of Web Based Computer Package for the Simulation of Thermal Desalination Processes. *Chemical Product and Process Modeling*. 2007.
- [54] ETTOUNEY, H, H EL-DESSOUKY a F AL-JUWAYHEL. Performance of the Once-through Multistage Flash Desalination Process. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*. 2002, roč. 216, č. 3, s. 229-241.
- [55] ABDEL-JABBAR, Nabil M., Hazim Mohameed QIBLAWEY, Farouq S. MJALLI a Hisham ETTOUNEY. Simulation of Large Capacity MSF Brine Circulation Plants. *Desalination*. 2007, roč. 204, 1-3, s. 501-514.
- [56] FIORINI, P. a E. SCIUBBA. Thermo-economic Analysis of a MSF Desalination Plant. *Desalination*. 2005, roč. 182, 1-3, s. 39-51.
- [57] TARIFA, E. E., S. Franco DOMÍNGUEZ, D. HUMANA, S.L. MARTÍNEZ, A. F. NÚÑEZ a N. J. SCENNA. Faults Analysis for MSF Plants. *Desalination*. 2005, roč. 182, č. 1-3, s. 131-142.
- [58] KOCIÁN, Jiří, P. RUDASOVÁ a J. VOSEJPKA. Poškození teplosměnných trubek z materiálu CuNi 90/10 v mořské vodě. *Koroze a ochrana materiálu*. 2008, roč. 52, č. 3.
- [59] ABDULJAWAD, Mohamed a Abdulnaser ALSADAWI. Steady State Simulation of MSF Desalination Plant. *ISESCO Science and Technology Vision*. 2008, roč. 4, č. 5, s. 30-33.

- [60] HAMED, Osman Ahmed et al. SALINE WATER CONVERSION CORPORATION. Modeling and Simulation of Multistage Flash Distillation Process. 1999, 44 s.
- [61] LIAN-YING, Wu, Xiao SHENG-NAN a Gao CONG-JIE. Simulation of Multi-stage Flash (MSF) Desalination Process. *Advances in Materials Physics and Chemistry*. 2012, roč. 2, č. 4, s. 200-205.
- [62] ONDRUŠ, Jan. *Studium mechanických vlastností kvaziizotropních sklolaminátů*. Zlín, 2011. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce doc. Ing. Oldřich Šuba, CSc.
- [63] JANČÁŘ, Josef. Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2003. 193 s. ISBN 8021424435.
- [64] LAŠ, Vladislav. Mechanika kompozitních materiálů. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2004. 154 s. ISBN 80-7043-273-X.
- [65] LOUTHAN, Jindřich. ŠKODA POWER S.R.O. *Příručka oddělení kondenzace a regenerace*. 30. vyd. Plzeň, 2013.
- [66] BLÁHA, Jaroslav a Karel BRADA. *Příručka čerpací techniky*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1997, 289 s. ISBN 80-010-1626-9.
- [67] GRUNDFOS MANAGEMENT A/S. *Příručka čerpací techniky* [online]. Dostupné z: http://net.grundfos.com/doc/webnet/waterutility/_assets/downloads/gcz/pumphandbook_gcz.pdf
- [68] Production: Pump. FLUID BUSINESS GROUP. [online]. [cit. 2014-01-29]. Dostupné z: <http://www.fluidbusiness.ru/production/pumps/27/>
- [69] HUSAIN, Asghar. Steady-State Model. *Encyclopedia of Desalination and Water Resources: DESWARE*. 2006.
- [70] KALČÍK, Josef a Karel SÝKORA. *Technická termomechanika*. 1. vyd. Brno: Academia, 1973.
- [71] STERLING SIHI. *Vacuum Technology Solutions* [prospekt]. 13 s.
- [72] Steam jet vacuum pumps. GEA WIEGAND GMBH. [online]. [cit. 2014-03-02]. Dostupné z: <http://www.gea-wiegand.com/geawiegand/cmsdoc.nsf/WebDoc/webb8ypgxd>
- [73] STRMISKA, Michal. *Experimentální ověření ejektoru a vytvoření matematického modelu*. Brno, 2009. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce doc. Ing. Vladimír Habán, Ph.D.
- [74] MUNTERS EUROFORM GMBH. *DV270 Droplet Separator* [prospekt]. 2 s.
- [75] Demister. *PetroWiki* [online]. [cit. 2014-03-01]. Dostupné z: <http://petrowiki.org/Demister>
- [76] AMISTCO. *Mesh & Vane Mist Eliminators: For optimal removal of a wide range*. 2004, 16 s.
- [77] Eliminátor B. CHLADICÍ VĚŽE PRAHA A.S. [online]. [cit. 2014-02-02]. Dostupné z: <http://www.chv-praha.cz/?q=stranka/18>

- [78] Rohrreinigungsanlagen, Reinigungskugeln, Kühlwasserfilter. KLUMP & KOLLER GMBH. [online]. [cit. 2014-10-02]. Dostupné z: <http://www.klump-koller.com/kk-gb.html>
- [79] Gumové kompenzátory. MACROFLEX S.R.O. *MACROFLEX* [online]. [cit. 2014-03-07]. Dostupné z: <http://www.macroflex.cz/temp.aspx?u=/static/katalog/gumove/index.htm>
- [80] ISO-KF Flanges. SYNERGY VACUUM, Inc. [online]. [cit. 2013-10-05]. Dostupné z: <http://www.synergyvacuum.com/componentsfittings/isokfflanges.cfm>
- [81] JUMO GMBH & CO. KG. *JUMO AQUIS 500 pH* [Návod k obsluze]. 2012.
- [82] UNI-SAFE ELECTRONICS A/S. *Freshwater Salinometer: SL6005* [prospekt].
- [83] AMOT. *Thermostatic Control Valve: Model B* [prospekt].
- [84] CIPOLLINA, Andrea, Giorgio MICALÈ a Lucio RIZZUTI. *Seawater Desalination: Conventional and Renewable Energy Processes*. New York: Springer, 2009, 306 s. Green energy and technology. ISBN 978-364-2011-504.
- [85] HORNBERG, C. D., B. M. WATSON a Gilles CORMIER. Operational Optimization of MSF Systems. *Desalination*. 1993, roč. 92, č. 1-3, s. 93-122.
- [86] KLIMEŠOVÁ, Eva a Josef TOŠENOSVSKÝ. Využití metody plánování experimentů při optimalizaci analytické metody stanovení adsorbovatelných organicky vázaných halogenů coulometricky. *Chemagazín*. roč. 2011, č. 6.
- [87] TOŠENOSVSKÝ, Josef. *Plánování experimentů*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012, 1 CD-ROM. ISBN 978-80-248-2592-2.
- [88] MASON, Robert L., Richard F. GUNST a James L. HESS. *Statistical Design and Analysis of Experiments: With Applications to Engineering and Science*. 2. vyd. Hoboken: John Wiley & Sons, 2003, 728 s. ISBN 04-713-7216-1.
- [89] WU, C.F. Jeff a Michael HAMADA. *Experiments: Planning, Analysis, and Parameter Design Optimization*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2000, 630 s. ISBN 04-712-5511-4.
- [90] MILLER, Ivan. *DOE: návrh a analýza experimentu s pomocí MINITAB®*. 1. vyd. Praha: Interquality, 2010, 122 s. ISBN 978-80-902770-5-2.
- [91] PALENČÁR, Rudolf. *Štatistické metódy v metrologických a skúšobných laboratóriach*. Bratislava: Grafické štúdio Ing. Peter Juriga, 2001, 366 s. ISBN 80-968-4493-8.
- [92] BELL, Stephanie. *Measurement Good Practice Guide: A Beginner's Guide to Uncertainty of Measurement*. 2. vyd. Middlesex: NPL, 2001, č. 11.
- [93] ČERVENKA, Milan. *Zpracování fyzikálních měření: Studijní text pro fyzikální praktikum* [online]. Praha: České vysoké učení technické, Fakulta elektrotechnická, 2013 [cit. 2014-02-08]. Dostupné z: <http://herodes.feld.cvut.cz/mereni/downloads/navody/zpracdat.pdf>
- [94] SCHOVÁNEK, Petr a Vítězslav HAVRÁNEK. *Chyby a nejistoty měření*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2007.

- [95] THOMAS, P.J., Souvik BHATTACHARYYA, A. PATRA a G.P. RAO. Steady state and dynamic simulation of multi-stage flash desalination plants: A case study. *Computers & Chemical Engineering*. 1998, roč. 22, č. 10, s. 1515-1529.
- [96] HELAL, Ahmed M. Uprating of Umm Al Nar East 4–6 MSF desalination plants. *Desalination*. 2003, roč. 159, č. 1, s. 43-60.
- [97] A.S. Hanafi and M.S. Shousha, Dynamic modeling of MSF desalination plants: I. Governing equations, Proc. *IDA World Congress*, Bahamas, 2003, s. 1–31.
- [98] HAWAIDI, E.A.M. a I.M. MUJTABA. Simulation and optimization of MSF desalination process for fixed freshwater demand: Impact of brine heater fouling. *Chemical Engineering Journal*. 2010-12-01, roč. 165, č. 2, s. 545-553.
- [99] EL-DESSOUKY, Hisham, Habib I. SHABAN a Hamida AL-RAMADAN. Steady-state analysis of multi-stage flash desalination process. *Desalination*. 1995, roč. 103, č. 3, s. 271-287.
- [100] ALASFOUR, Fuad N. a Hassan K. ABDULRAHIM. Rigorous steady state modeling of MSF-BR desalination system. *Desalination and Water Treatment*. 2009, roč. 1, č. 1, s. 259-276.
- [101] JANA, Amiya K. *Process simulation and control using Aspen*. Eastern economy ed. New Delhi: PHI Learning, 2009. ISBN 978-812-0336-599.
- [102] SCHEFFLAN, Ralph. *Teach yourself the basics of Aspen plus*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2011, 216 s. ISBN 978-047-0567-951.
- [103] BANKE, Joshua a Meghan CUDDIHY. *AspenTech Handbook: A Technical Aid for Chemical Engineering Process Design Students*. 2003.
- [104] ALTI CONSULTING S.R.O. Čištění průmyslových odpadních vod: Vakuové odparky [online]. 2011 [cit. 2013-03-30].
- [105] MARADA, Petr a kol. MENDELOVA ZEMĚDĚLSKÁ A LESNICKÁ UNIVERZITA V BRNĚ. *Příručka pro nakládání s digestátem a fugátem*. Brno, 2008, 30 s.
- [106] LABTECH, s.r.o. *Protokol o zkoušce B6322*. 2012.
- [107] BLANK, J.E., G.F. TUSEL a S. NISANC. The real cost of desalted water and how to reduce it further. *Desalination*. 2007, roč. 205, č. 1-3, s. 298-311.
- [108] REDDY, K.V. a N. GHAF FOUR. Overview of the cost of desalinated water and costing methodologies. *Desalination*. 2007, vol. 205, 1-3, s. 340-353.
- [109] BERNAT, Xavier, Oriol GIBERT, Roger GUIU, Joana TOBELLA a Carlos CAMPOS. The economics of desalination for various uses. *Re-thinking Water and Food Security*. CRC Press, 2010, s. 329-347.
- [110] VERLAG DASHÖFER, nakladatelství, spol. s r. o. *Lexikon kovů se zahraničními ekvivalenty* [CD]. 2002.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Význam anglicky	Význam česky
BH	Brine heater	Dodatkový ohřívák
BPS	-	Bioplynová stanice
CA	Cellulose acetate	Acetát celulózy
CDI	Capacitive deionisation	Kapacitní deionizace
CDU	Chemical dosing unit	Dávkovací jednotka chemikálií
DOE	Design of experiments	Metoda plánování experimentů
ED	Electrodialysis	Elektrodialýza
FO	Forward osmosis	Dopředná osmóza
FP	Fresh water pump	Čerpadlo destilátu
HJS	Heat rejection section	Sekce bez využití kondenzačního tepla
HRS	Heat recovery section	Sekce s využitím kondenzačního tepla
HWF	Hot water flowrate	Průtok ohřívací vody
HWT	Hot water temperature	Teplota ohřívací vody
IO	Ion Exchange	Iontová výměna
MaR	-	Měření a regulace
MD	Membrane distillation	Membránová destilace
ME	Multiple Effect	Vícestupňová destilace
MF	Make-up flowrate	Průtok doplňovací vody
MSF	Multi-stage flash	Vícestupňová mžiková destilace
MVC	Mechanical vapor compression	Mechanická komprese
NaCl	-	Chlorid sodný
OT	Once through	Jednoprůtočný
OZE	-	Obnovitelné zdroje energie
PA	Polyamide	Polyamid
ppm	Parts per million	Jedna miliontina (celku)
PR	Performance ratio	Výkonový poměr
PZE	-	Primární zdroje energie
RBF	Recirculating brine flowrate	Průtok recirkulovaného koncentrátu
RO	Reverse Osmosis	Reverzní osmóza
RSE	Rapid spray evaporation	Rychlé odpaření rozprašováním
SD	Solar distillation	Solární destilace
SP	Sea water pump	Čerpadlo koncentrátu
SW	Software	
SWIT	Seawater in temperature	Teplota vstupní mořské vody
SWOT	Seawater out temperature	Teplota výstupní mořské vody
TBT	Top brine temperature	Teplota nástřiku
TSS	Total suspended solids	Celkové nerozpuštěné látky
TVC	Thermo vapor compression	Tepelná komprese
VC	Vapor compression	Komprese páry
WHO	World health organization	Světová zdravotnická organizace

Symbols

A	[m ²]	teplosměnná plocha
c _p	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	měrná tepelná kapacita
d	[m]	průměr
k	[-]	koeficient
l	[J·kg ⁻¹]	měrné skupenské teplo varu
M	[kg·s ⁻¹]	hmotnostní průtok
n	[-]	n-tý stupeň (jednotky)
p	[Pa]	tlak
S	[ppm]	salinita
T	[K, °C]	teplota média
ΔT	[K, °C]	teplotní spád
ΔT _{LMTD}	[K, °C]	střední logaritmický teplotní spád
u	[-]	nejistota měření
U	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]	součinitel prostupu tepla
v	[m·s ⁻¹]	rychlost
δ	[-]	relativní chyba měření
ρ	[kg·m ⁻³]	hustota

Dolní indexy

A	nejistota typu A
B	nejistota typu B
C	kondenzátor, nejistota typu C
D	destilát
DO	dodatkový ohřívák
F	nástřik
HW	horká voda
K	koncentrát
x	měřená veličina

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Zdrojové vody pro odsolování	11
Obr. 2 Státy s největší odsolovací kapacitou	11
Obr. 3 Rozpuštěné soli v mořské vodě	13
Obr. 4 Znázornění salinity v různých oceánech v g/kg	13
Obr. 5 Zastoupení odsolovacích kapacit ve světě	15
Obr. 6 Světový trend vývoje podepsaných objednávek odsolovacích jednotek.....	15
Obr. 7 Princip odsolovací jednotky	16
Obr. 8 Rozdělení metod odsolování	17
Obr. 9 Schéma jednotky MSF s recirkulací koncentrátu.....	20
Obr. 10 Schéma jednotky ME (3 stupně)	21
Obr. 11 Princip komprese páry.....	23
Obr. 12 Princip solární destilace	23
Obr. 13 Znázornění principu membránové separace.....	24
Obr. 14 Proces reverzní osmózy.....	25
Obr. 15 Řez vinuté trubice RO	26
Obr. 16 Princip elektrodiálýzy	26
Obr. 17 Jednotka RO menšího výkonu.....	28
Obr. 18 Obecné schéma MSF jednotky s recirkulací a HJS.....	35
Obr. 19 Obecné schéma MSF jednotky bez recirkulace a HJS.....	35
Obr. 20 Obecné schéma MSF jednotky s recirkulací a bez HJS	36
Obr. 21 Grafické shrnutí různých zapojení jednotek MSF [51].....	37
Obr. 22 Rozdělení jednotky pro potřeby základního tepelného návrhu	38
Obr. 23 Bilanční znázornění jednostupňové MSF jednotky.....	39
Obr. 24 Bilanční znázornění vícestupňové MSF jednotky.....	41
Obr. 25 Výpočtový program v MS Excel – list výstupních dat	44
Obr. 26 Výpočtový program v MS Excel – list výpočtů.....	45
Obr. 27 Závislost výstupních proměnných jednotky na počtu stupňů jednotky	46
Obr. 28 Prostorové uspořádání výztužných vláken	50
Obr. 29 Nákres umístění induceru	56
Obr. 30 Experimentální inducer – 3D model	56
Obr. 31 Princip vodokružné vývěvy.....	58
Obr. 32 Princip ejektoru	59
Obr. 33 Princip odlučovačů kapek	61
Obr. 34 Vzhled odlučovačů kapek	62
Obr. 35 Princip systému kontinuálního čištění kondenzátoru.....	63
Obr. 36 Gumové kompenzátory	64
Obr. 37 Unifikované ISO KF spojovací prvky.....	64

Obr. 38 Sofistikovaný přístroj k měření vodivosti (Jumo).....	66
Obr. 39 Jednouúčelový přístroj k měření	66
Obr. 40 Samočinný ventil AMOT	67
Obr. 41 Zapojení ventilu AMOT pro směšování.....	67
Obr. 42 Model jednotky SA12	68
Obr. 43 Schéma MSF jednotky označením důležitých proměnných	70
Obr. 44 Model experimentální jednotky MSF	75
Obr. 45 Výpočtové parametry experimentální jednotky v závislosti na počtu stupňů	76
Obr. 46 Trubkovnice a způsob válcování trubek.....	78
Obr. 47 Experimentální jednotka MSF	79
Obr. 48 Demonstrační jednotka MSF	80
Obr. 49 Experimentální jednotka ME	82
Obr. 50 Měřicí trat experimentální jednotky MSF	86
Obr. 51 Schéma zapojení měřicí trati experimentální jednotky MSF	86
Obr. 52 Schéma zapojení měřicí trati experimentální jednotky ME	87
Obr. 53 Vývojový diagram experimentování	89
Obr. 54 Diagram strategie efektivního experimentování	90
Obr. 55 Vodokružná vývěva MEX.....	100
Obr. 56 Vodoproudý ejektor a tryska	100
Obr. 57 Čerpadlo Sigmet CRX 200.....	101
Obr. 58 Čerpadlo Sigmet CX 50	101
Obr. 59 Čerpadlo Pedrollo PK 70.....	102
Obr. 60 Čerpadlo Merser EP-20	102
Obr. 61 Oběžné (kanálkové) kolo čerpadla Merser EP-20.....	102
Obr. 62 Odlučovače kapek při předběžné zkoušce MSF jednotky.....	103
Obr. 63 Experimentální měření – závislost kapacity jednotky na teplotě ohřívací vody	104
Obr. 64 Závislost kapacity jednotky	105
Obr. 65 Závislost teploty koncentráту	105
Obr. 66 Závislost slanosti destilátu na rychlosti páry přes separátor	105
Obr. 67 Schéma zapojení demonstrační jednotky MSF v Egyptě.....	108
Obr. 68 Demonstrační jednotka MSF v Egyptě	109
Obr. 69 Experimentální jednotka ME na zkušebně	111
Obr. 70 Jednotkové operace MSF jednotky	118
Obr. 71 PFD zapojení experimentální MSF jednotky v SW Aspen Plus	124
Obr. 72 PFD zapojení experimentální MSF jednotky v SW ChemCad	125
Obr. 73 Finanční náklady vybraných metod odsolování	129
Obr. 74 Grafické shrnutí provedených činností v rámci řešené dizertační práce.....	134

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Složení mořské vody	12
Tab. 2 Parametry pitné vody.....	12
Tab. 3 Plyny rozpuštěné v atmosféře a mořské vodě	12
Tab. 4 Kategorie vody podle obsahu rozpuštěných solí.....	14
Tab. 5 Označení vody podle obsahu rozpuštěných solí.....	14
Tab. 6 Hodnocení vody pro účely obyvatelstva	14
Tab. 7 Bod varu vody při různých tlacích	18
Tab. 8 Porovnání charakteristických vlastností jednotlivých procesů odsolování.....	29
Tab. 9 Vlastnosti membránových procesů úpravy vody	30
Tab. 10 Předpoklady pro návrh zařízení.....	42
Tab. 11 Vybrané parametry mořské vody a přenosu tepla	43
Tab. 12 Materiály používané v praxi pro konstrukci kondenzátorů.....	54
Tab. 13 Tabulka produktové řady vytvořených MSF jednotek.....	69
Tab. 14 Vhodné vs. použité materiály v experimentální jednotce MSF	77
Tab. 15 Vhodné vs. použité materiály v experimentální jednotce ME	81
Tab. 16 Přehled plánovaných faktorů pro předběžné zkoušky.....	93
Tab. 17 Přehled plánovaných faktorů pro experimentální měření	94
Tab. 18 Přehled odezev předběžných zkoušek.....	95
Tab. 19 Přehled odezev při experimentálním měření.....	96
Tab. 20 Parametry dieselgenerátoru CAT	107
Tab. 21 Parametry ventilu AMOT.....	108
Tab. 22 Vybraná návrhová data experimentální jednotky ME.....	110
Tab. 23 Nejistoty měření proběhlých experimentů	116
Tab. 24 Porovnání jednotlivých bloků MSF jednotky z PFD diagramu a modelu v Aspen Plus	123
Tab. 25 Chemický rozbor vzorku fugátu.....	128
Tab. 26 Porovnání nákladů na výsledný produkt i spotřeby tepla vybraných metod odsolování.....	129
Tab. 27 Cena sladké vody v závislosti na kapacitě jednotky	131
Tab. 28 Cena sladké vody v závislosti na použitém zdroji energie.....	131
Tab. 29 Cena sladké vody při použití tepelných metod odsolování.....	131
Tab. 30 Cena sladké vody při použití RO	131
Tab. 31 Pořizovací ceny jednotek s kapacitou 50 a 500 m ³ a vybrané jejich parametry	132

PUBLIKACE AUTORA

- [1] HÁJEK, Zdeněk a Zdeněk JEGLA. Recentsituation and actual possibilities in development of seawater desalination equipment. *Chemical Engineering Transactions*, 2012, č. 29, s. 1381-1386. ISSN 1974-9791, AIDIC Servizi S.r.l.

- [2] HÁJEK, Zdeněk, Zdeněk JEGLA a Tomáš PAČÍSKA. Actual results from research and development of modern small MSF sea water desalination equipment. *Chemical Engineering Transactions*. 2014, č. 39, ISSN 2283-9216, AIDIC Servizi S.r.l. (přijato k publikování)

PŘÍLOHY

Seznam příloh:

- Příloha č. 1 Naměřená data při měření na experimentální jednotce MSF
- Příloha č. 2 Simulace jednotky MSF v SW Aspen Plus
- Příloha č. 3 Simulace jednotky MSF v SW ChemCad
- Příloha č. 4 Výkres zkoušeného induceru
- Příloha č. 5 Termo-fyzikální vlastnosti mořské vody
- Příloha č. 6 Materiálový list nerezové oceli AISI 316L (ekv. 17 349)
- Příloha č. 7 Materiálový list mosazi CuZn40
- Příloha č. 8 Materiálový list hliníkové mosazi CuZn20Al2As
- Příloha č. 9 CD, které obsahuje:
 - elektronickou verzi dizertační práce ve formátu PDF