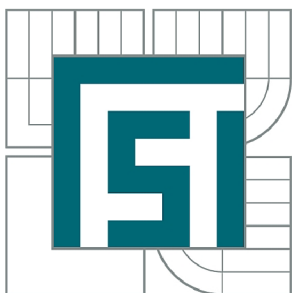


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO  
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF PROCESS AND ENVIRONMENTAL  
ENGINEERING

## ZVYŠOVÁNÍ ÚČINNOSTI VAKUOVÉHO ODPAŘOVÁNÍ

VACUUM EVAPORATION EFFICIENCY IMPROVEMENT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. MARTIN HAVLÁSEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Mgr. MAREK VONDRA

BRNO 2015



Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav procesního a ekologického inženýrství

Akademický rok: 2014/2015

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

student(ka): Bc. Martin Havlásek

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Procesní inženýrství (3909T003)**

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

### **Zvyšování účinnosti vakuového odpařování**

v anglickém jazyce:

### **Vacuum evaporation efficiency improvement**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vakuové odpařování je jedna z dobře známých destilačních metod, mimo jiné hojně využívaná při odsolování mořské vody. Funguje na principu snižování bodu varu odpařované kapaliny snižováním tlaku v nádobě. Na účinnost odpařování má vliv mnoho faktorů, jejichž pochopení může výrazně ovlivnit ekonomiku provozu. Práce shrnující současný stav poznání v této oblasti a experimentálně ověřující některé předpoklady bude využita při vývoji technologie, která pracuje právě na principu vakuového odpařování.

Cíle diplomové práce:

Rešerše a představení faktorů ovlivňujících účinnost vakuového odpařování.

Seznámení se s technologií víceetapňové mžikové destilace.

Návrh plánovaného experimentu sledujícího vliv dvou vybraných faktorů.

Provedení a zhodnocení experimentu, návrh optimálních provozních podmínek technologie.

Seznam odborné literatury:

HASAL, Pavel, Igor SCHREIBER a Dalimil ŠNITA. Chemické inženýrství I: teorie - projektování - stavba zařízení - příklady. 2. přeprac. vyd. Praha: VŠCHT, 2007, 350 s. ISBN 978-80-7080-002-7.

El-Dessouky H.T., Ettouney H.M., Al-Roumi Y., 1999. Multi-stage flash desalination: present and future outlook. Chemical Engineering Journal, 73, 173–190, DOI: 10.1016/S1385-8947(99)00035-2.

MONTGOMERY, Douglas C. Design and analysis of experiments. 5th ed. New York: Wiley, 2001, xii, 684 s. ISBN 04-713-1649-0.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Mgr. Marek Vondra

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 24.11.2014

L.S.

---

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

---

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

## **Abstrakt**

---

Tato práce je zaměřena na experimentální činnost v oblasti zvyšování účinnosti vakuového odpařování. V první části představuje teorii vypařování kapalin a její ovlivňující faktory, dále pak technologii vícestupňové mžikové destilace. Součástí teorie je i přehled dalších využívaných technologií pro odsolování mořské vody a úvod do plánování experimentů. V praktické části jsou zvoleny faktory ovlivňující účinnost zařízení a je pro ně navržen plán experimentu. Po provedení experimentu jsou na základě analýzy navrženy optimální provozní podmínky technologie.

## **Klíčová slova**

---

Vakuové odpařování, destilace, vícestupňová mžiková destilace, plánovaný experiment, účinnost

## **Abstract**

---

This thesis is focused on experimental work in the domain of vacuum evaporation efficiency improvement. The first part introduces theory of liquids evaporation and its influencing factors, then multi-stage flash distillation technology. The next part of theory is an overview of other technologies used for desalination of sea water and introduction to the design of experiments. In the practical part are selected factors affecting efficiency of device and experiment plan is designed for them. When the experiment is done, optimal operating conditions of technology are designed on basis of analysis.

## **Key words**

---

Vacuum evaporation, distillation, multi-stage flash distillation, design of experiment, efficiency

## **Bibliografická citace**

HAVLÁSEK, M. *Zvyšování účinnosti vakuového odpařování*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 68 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Mgr. Marek Vondra.

## **Prohlášení o původnosti práce**

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Mgr. Marka Vondry, a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 25. května 2015

.....

Martin Havlásek

## **Poděkování**

Touto cestou bych rád poděkoval vedoucímu své diplomové práce Ing. Mgr. Marku Vondrovi za cenné rady a připomínky a především za trpělivost a odborné vedení. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Pavlu Kubovi za pomoc při realizaci zapojování měřící instrumentace. V neposlední řadě patří mé díky mojí rodině za podporu během studia.



## OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD .....</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>VYPAŘOVÁNÍ.....</b>	<b>13</b>
2.1	Destilace .....	15
2.2	Faktory ovlivňující vakuové odpařování.....	16
2.2.1	Tlak a teplota .....	16
2.2.2	Hustota .....	17
2.2.3	Plocha odpařovací hladiny .....	18
2.2.4	Koncentrace par nad kapalinou (vlhkost) .....	19
2.2.5	Koncentrace jiných látek nad kapalinou .....	19
2.2.6	Teplota nad kapalinou .....	19
2.2.7	Rychlost odvodu par .....	20
<b>3</b>	<b>ODSOLOVÁNÍ.....</b>	<b>21</b>
3.1	Dostupnost sladké vody ve světě.....	21
3.2	Mořská voda.....	22
3.3	Úpravy vody.....	23
3.3.1	Příprava.....	23
3.3.2	Konečná úprava.....	24
<b>4</b>	<b>METODY ODSOLOVÁNÍ .....</b>	<b>25</b>
4.1	Tepelné metody .....	26
4.1.1	Solární destilace .....	26
4.1.2	MSF – Vícestupňová mžiková destilace .....	27
4.1.3	MED – Vícestupňové odpařování.....	29
4.1.4	VC – Kompresie páry .....	30
4.2	Membránové metody .....	30
4.2.1	RO - Reverzní osmóza .....	31
4.2.2	ED - Elektrodialýza .....	31
4.3	Ostatní metody.....	32

---

<b>5</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ JEDNOTKA MSF .....</b>	<b>33</b>
5.1	Technologie a popis jednotky MSF.....	33
5.2	Měřicí instrumentace .....	35
5.2.1	Teplota .....	36
5.2.2	Tlak .....	37
5.2.3	Průtok.....	37
5.2.4	Salinita (konduktance) .....	38
5.2.5	Hmotnost .....	39
5.3	Měřicí ústředna a software .....	39
<b>6</b>	<b>TEORIE PLÁNOVANÉHO EXPERIMENTU .....</b>	<b>40</b>
6.1	Úvod do navrhování experimentů.....	40
6.2	Základní typy návrhů experimentu .....	41
6.2.1	Faktoriální návrh typu $2^k$ .....	42
6.2.2	Dílčí faktoriální experiment $2^{k-p}$ .....	42
<b>7</b>	<b>REALIZACE EXPERIMENTU .....</b>	<b>43</b>
7.1	Analýza procesu .....	43
7.1.1	Faktory ovlivňující odpařování v MSF .....	43
7.1.2	Výběr faktorů.....	45
7.2	Návrh plánu experimentu.....	46
7.3	Příprava na měření.....	48
7.4	Provedení experimentu.....	49
7.5	Analýza výsledků.....	53
7.6	Zhodnocení a návrh optimálních provozních podmínek.....	58
<b>8</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>60</b>
<b>9</b>	<b>BIBLIOGRAFIE.....</b>	<b>61</b>
<b>10</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK .....</b>	<b>65</b>
<b>11</b>	<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>67</b>

---

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

Symbol	Význam	Jednotka
$\eta$	Účinnost	%
$A$	Empirická konstanta, Plocha přestupu hmoty, Teplota nástřiku	-, $m^2$ , $^{\circ}C$
$B$	Empirická konstanta, Typ chladící vody	-, -
$C$	Empirická konstanta, Podtlak	-, $bar(g)$
$c_{1F}$	Koncentrace složky 1 na fázovém rozhraní	-
$c_{1I}$	Koncentrace složky 1 v jádře proudu	-
$D$	Průtok slané vody	$l/min$
$D_{12}$	Difuzní koeficient složek 1 a 2	$m/s^2$
$Dg$	Difuzní koeficient plynné fáze	$m/s^2$
$E$	Salinita	$\mu S/cm$
$K$	Vodivost	$\mu S/cm$
$Lv$	Skupenské teplo vypařování	$J$
$lv$	Měrné skupenské teplo vypařování	$J/kg$
$M$	Hmotnost kapaliny	$kg$
$m_D$	Hmotnost destilátu	$kg$
$m_K$	Hmotnost koncentrátu	$kg$
$\dot{n}_1$	Molový tok složky 1	$kmol/s.m^2$
$\dot{n}_2$	Molový tok složky 2	$kmol/s.m^2$
$\dot{N}_A$	Molový tok složky A	$kmol/s$
$P$	Tlak nasycených par	$kPa$
$p_A$	Parciální tlak složky A	$Pa$
$p_{1F}$	Parciální tlak složky 1 na fázovém rozhraní	$Pa$
$p_{1I}$	Parciální tlak složky 1 v jádře proudu	$Pa$
$R$	Univerzální plynová konstanta	$J/mol.K$
$S$	Vzdálenost od fázového rozhraní, Salinita	$m$ , $ppm$
$T$	Teplota	$^{\circ}C$ , $K$

# 1 ÚVOD

Se zvyšující se populací lidstva se zvyšuje i poptávka po sladké vodě. Jedná se jak o využití pro průmyslové a zemědělské účely, tak o pitnou vodu. Do roku 2050 by se dle OSN měla zvýšit poptávka po sladké vodě o 55 %. Zároveň již v roce 2025 by mohly dvě třetiny lidské populace žít v oblastech s nedostatkem pitné vody, pokud bude aktuální spotřeba vody pokračovat [1]. V tuto chvíli žije na světě 748 miliónů lidí, kteří nemají přístup k lepšímu zdroji pitné vody, a 2,5 miliardy lidí nevyužívá hygienických zařízení. Na to, aby měl každý člověk na světě přístup k pitné vodě a dobré hygieně je potřeba vynaložit 107 miliard amerických dolarů ročně po dobu pěti let [2]. Jednou z možností, jak dodávat do těchto oblastí více pitné vody, je odsolování. V dnešní době je již vynalezeno mnoho zařízení, které odsolováním mořské vody produkují sladkou vodu. Po dalších úpravách může odsolená voda sloužit ke konzumaci. Mezi tyto technologie patří i tepelné metody využívající proces destilace. Jedna z těchto technologií se nazývá „Multi-stage flash distillation“ (MSF), neboli vícestupňová mžiková destilace a je známá již mnoho let. Pracuje na principu vakuového odpařování, kdy snižujeme bod varu kapaliny snižováním tlaku v komoře. Existuje mnoho faktorů ovlivňujících její účinnost, jejichž znalost může výrazně ovlivnit ekonomiku provozu stávajících i nových zařízení. Jedním z vhodných řešení, jak vlivy těchto faktorů určit, je pomocí plánovaného experimentu. Ten má v posledních letech stále větší význam. Umožňuje nám efektivní cestou získat poznatky o procesu, abychom byly schopni dále zlepšovat technologii za účelem zvýšení účinnosti či snížení energetické náročnosti.

V teoretické části práce bude přiblížen pojem vypařování kapalin, jenž je základem destilování. Po seznámení se s tímto procesem budou uvedeny faktory ovlivňující vypařování, které se podílejí na výsledné účinnosti. Dále bude provedena rešerše světově využívaných technologií pro odsolování mořské vody s důrazem na vícestupňovou mžikovou destilaci, na které pracuje zkoumané experimentální zařízení. V kapitole 5 bude toto zařízení detailněji popsáno i s měřícím okruhem a jeho instrumentací. Dalším bodem je úvod do teorie plánovaného experimentu, kde bude vysvětlena teorie potřebná pro dále navrhovaný experiment. Praktická část práce je členěna do dvou bodů. Pomocí zvolených faktorů navrhnout a provést experiment. Na základě analýzy následně navrhnout optimální provozní podmínky tak, aby jednotka pracovala s nejvyšší možnou účinností.

## 2 VYPAŘOVÁNÍ

Vypařování je fyzikální jev, při kterém se z kapaliny vlivem tepla uvolňují do ovzduší molekuly její nejtěkavější složky ve formě páry. Jedná se tedy o fázovou přeměnu části kapaliny. Jedna z nejznámějších metod pracující na principu odpařování je destilace, která je pro všechny známá především díky výrobě alkoholu.

Při vypařování se nad hladinou kapaliny vytvoří tenká vrstva nasycených par. Ty postupně přecházejí do okolního prostoru (difundují), za současného vzniku nových nasycených par. Kapalina se vypařuje pouze z volného povrchu, což je rozdíl mezi vypařováním a varem. Při varu se kapalina vypařuje z celého jejího objemu. Var začíná ve chvíli, kdy tlak par nad kapalinou dosáhne tlaku okolí [3], [4].

Při difuzi dochází k ochlazení vypařující se kapaliny, jelikož kapalinu opouštějící molekuly snižují její celkovou vnitřní energii a tím i její teplotu. Rychlejší molekuly opouštějí kapalinu a pomalejší zůstávají, přičemž rychlejší molekuly s sebou nesou více tepla než pomalejší a tudíž dochází ke zmiňovanému ochlazení kapaliny. Pokud chceme teplotu kapaliny udržet, aby stále docházelo k vypařování či varu, je potřeba jí dodat teplo nazývané skupenské teplo vypařování (rov. 2-1). Měrné skupenské teplo při rostoucí teplotě kapaliny klesá [3].

$$Lv = lv \cdot m \quad \text{rov. (2-1)}$$

kde  $L_v$  - skupenské teplo vypařování [J],  
 $l_v$  - měrné skupenské teplo vypařování [J/kg],  
 $m$  - hmotnost kapaliny [kg].

Rychlost difuze do okolního prostoru lze ovlivnit, a to oběma směry, zrychlit i zpomalit. Například každá kapalina se vypařuje jinou rychlostí při stejné teplotě z důvodu různých fyzikálních vlastností [3]. V kapitole 2.2 budou uvedeny faktory tuto rychlost ovlivňující.

Za jakých podmínek dojde k fázové přeměně lze pozorovat na fázovém diagramu vypařované kapaliny. Na obr. 2.1 je vyobrazen fázový diagram vody. Vypařování či var probíhá z oblasti kapaliny do oblasti plynu (přehřáté páry), tedy směrem dolů v rozmezí bodů A a K (křivka  $k_p$ ). Při kondenzaci děj probíhá v opačném směru. Trojný bod A ( $T = 273,16 \text{ K}$ ,  $p = 610,8 \text{ Pa}$  [4]) je bod, ve kterém se nachází všechny tři fáze naráz. Kritický bod K ( $T = 647,3 \text{ K}$ ,  $p = 22,1 \cdot 10^6 \text{ Pa}$  [4]) je bod, při kterém je voda stále v kapalném stavu.

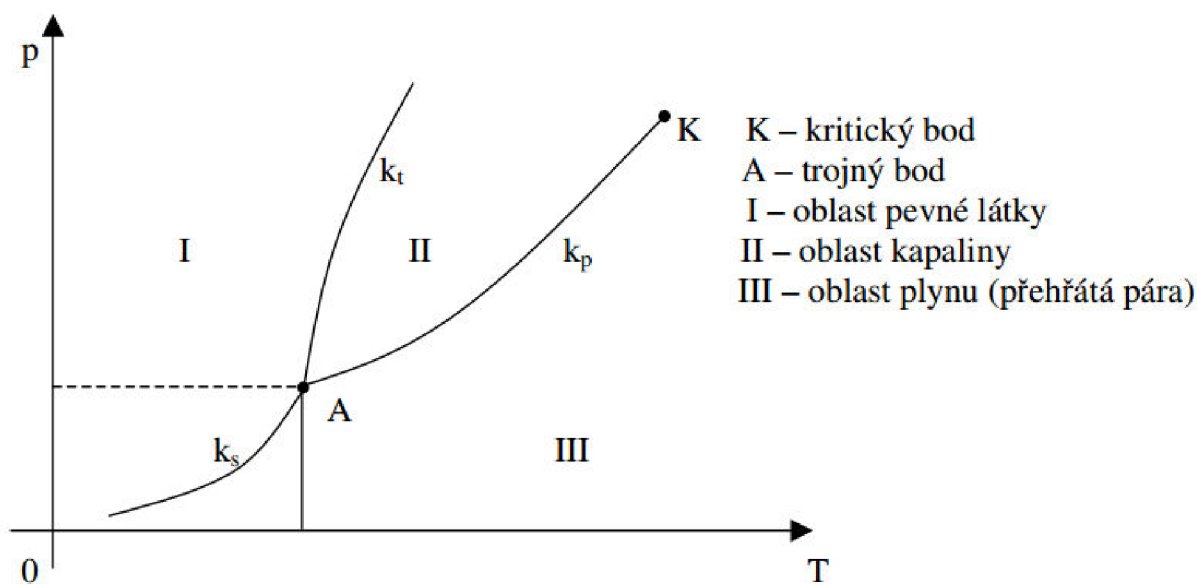
Nad tímto bodem se vyrovnává hustota kapaliny a její syté páry (fluidní oblast). Křivku  $k_p$  lze popsat Antoineovou rovnicí, která má tvar:

$$\log p = A - \frac{B}{C + T} \quad \text{rov. (2-2)}$$

kde  $A, B, C$  – empirické konstanty[-],  
 $T$  – teplota [°C],  
 $p$  – tlak nasycených par [kPa].

Pro vodu jsou empirické konstanty následující [4]:

- Pro teploty 1-100 °C:  
 $A = 7,19621$ ;  $B = 1730,63$ ;  $C = 233,426$
- Pro teploty 100-265 °C:  
 $A = 7,14258$ ;  $B = 1715,7$ ;  $C = 234,268$

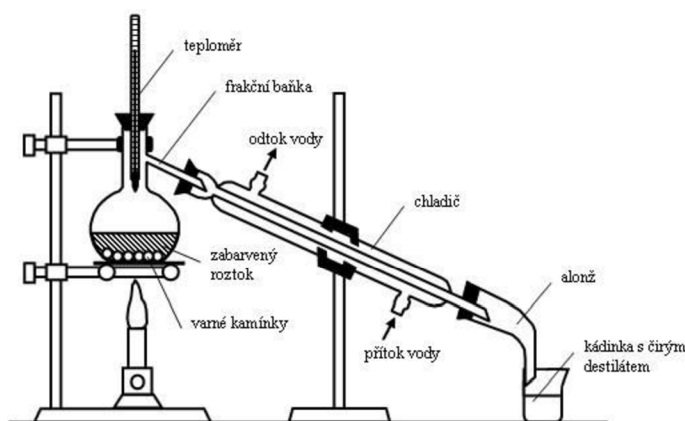


Obr. 2.1 Fázový diagram vody [5]

Antoineova rovnice tedy vyjadřuje závislost tlaku nasycených par na bodu varu kapaliny. Se snižujícím se tlakem par klesá teplota bodu varu. V oblasti trojného bodu na křivce  $k_p$ , kde se tlak blíží k vakuu a teplota k bodu mrazu bude i přes takto nízkou teplotu docházet k varu kapaliny díky sníženému tlaku.

## 2.1 Destilace

Destilací (obr. 2.2) se rozumí proces, při němž se vlivem tepla odpaří z kapaliny její nejtěkavější složka, která se následně v kondenzátoru přemění zpět do kapalné fáze. Tato zkapalněná část se nazývá destilát. V neodpařeném podílu se koncentrují méně těkavé složky či nečistoty. Tento podíl se nazývá koncentrát. Využití nachází destilace v mnoha odvětvích, jako je například odsolování mořské vody za účelem produkce sladké vody. Detailněji bude problematika odsolování popsána v následujících kapitolách. Mezi další příklad využití destilace lze zařadit petrochemický průmysl, který se zabývá zpracováním ropy, jejímž výsledným produktem jsou například pohonné hmoty automobilů (nafta, benzín), či oleje.



Obr. 2.2 Princip jednoduché destilace [6]

Existuje několik druhů destilací [7], [8]:

- **Jednoduchá (prostá) destilace** – používá se především k rozdělení dvou látek o vyšším rozdílu bodu varu.
- **Rektifikace (frakční destilace)** – rektifikace je druh destilace, využívaná pro dělení látek s podobným bodem varu. Při destilaci se látka rozděluje na několik frakcí. Tyto frakce se následně dále destilují. Provádí se tak v destilačních kolonách v rafinériích, při již zmiňovaném zpracování ropy.
- **Destilace za sníženého tlaku (vakuová)** – výhoda destilace za nižšího tlaku spočívá v jejím klesajícím bodu varu za klesajícího tlaku. Používá se například na destilaci látek, které se za normálních podmínek rozkládaly či oxidovaly. Hojně se využívá i při odsolování mořské vody (viz následující kapitoly). Touto destilací lze v některých případech dosáhnout lepšího dělení směsi.

- **Destilace vodní parou** – vodní parou se destilují méně těkavé látky, které se nemísí s vodou či jsou v ní obtížně rozpustné. Zároveň není nutné látku zahřívat na její bod varu. To je zapříčiněno součtem parciálních tlaků nad nemísitelnými kapalinami, které dříve dosáhnou rovnováhy s tlakem okolního vzduchu. Tím se sníží teplota bodu varu.
- **Azeotropní destilace** – destilace založena na existenci azeotropních roztoků. Každá kapalina má při různých teplotách různé tlaky nasycených par. Pokud se smísí dvě kapaliny o různých tlacích par, tlak par směsi je potom dán součtem těchto dvou parciálních tlaků. Princip podobný jako u destilace vodní parou.
- **Molekulární destilace** – pracuje za vysokého vakua, kdy se výrazně projevuje snížení teploty potřebné k destilaci. Hlavním konstrukčním znakem zařízení je krátká vzdálenost mezi hladinou destilované kapaliny a kondenzátorem. Nejčastěji se tato vzdálenost pohybuje v rozmezí 0,5 – 2 cm. Důvodem této krátké vzdálenosti je, že molekuly uvolněné z kapaliny mohou překonat tuto vzdálenost pouze tehdy, pokud nezačnou ztrácet svoji pohybovou energii srážkami s jinými molekulami.

## 2.2 Faktory ovlivňující vakuové odpařování

Odpařování ovlivňuje několik faktorů, jejichž znalost je při navrhování zařízení pracující na principu odpařování nutná. V této podkapitole budou uvedeny a popsány faktory ovlivňující odpařování jako takové. V podkapitole 7.1.1 budou dále uvedeny a popsány faktory ovlivňující odpaření v experimentální jednotce mžikového odpaření (MSF). Jednotlivé faktory mohou mezi sebou interagovat (vzájemně na sebe působit a tak ovlivňovat proces), což je ale velmi složité předpovídat. Jak vypadají interakce vybraných faktorů lze vidět v kapitole 7 na obr. 7.3.

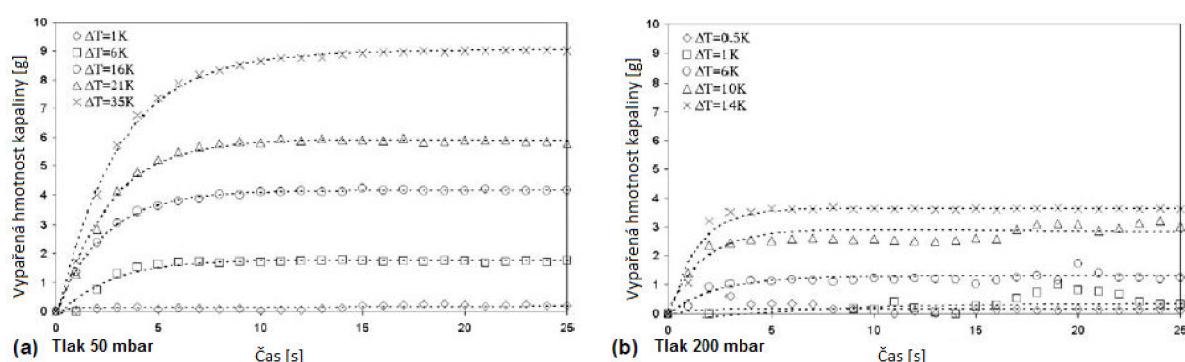
### 2.2.1 Tlak a teplota

Tlak resp. podtlak souvisí s bodem varu kapaliny. Při vysokém podtlaku vře voda podstatně dříve než při normálním atmosférickém tlaku (viz úvod kapitoly 2). Ze závislosti bodu varu na tlaku vychází Antoineova rovnice (rov. 2-2), díky které jsme schopni efektivně určit, při jakém tlaku nám začne voda vřít.



Mezi molekulami existují síly, které vlivem tepla slábnou (molekuly začnou více kmitat), tím dochází ke vzrůstu energie a proces odpaření tak probíhá lépe. Platí, že čím vyšší energii molekuly mají, tím lépe proběhne proces odpaření (vyšší teplota vody = vyšší rychlost odpaření) [9].

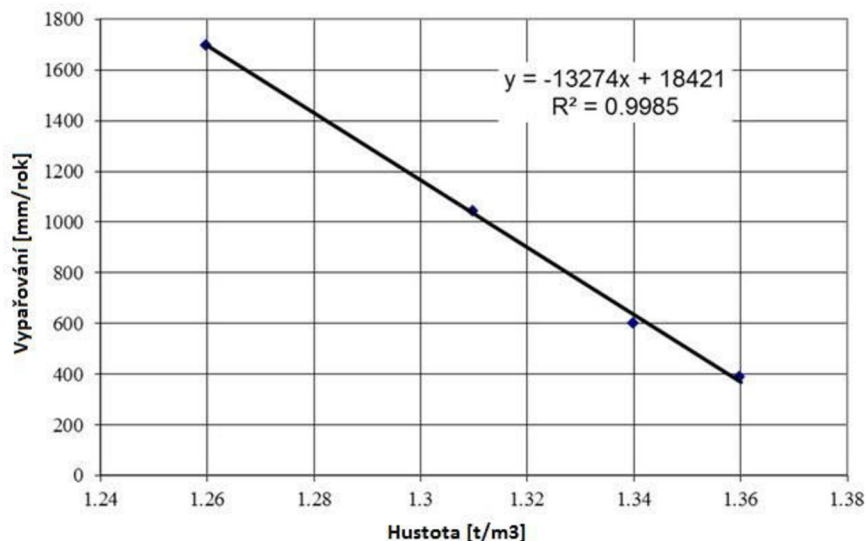
Vlivem teploty a tlaku na míru odpaření se zabýval ve studii např. D. Saury, S. Harmand a M. Siroux (obr. 2.3) [10]. V případě grafu a) se jedná o tlak 50 mbar a v případě grafu b) o 200 mbar. Grafy potvrzují tvrzení o lepším vypaření při nižším tlaku a vyšší teplotě. Označení  $\Delta T$  znázorňuje rozdíl mezi rovnovážnou teplotou a teplotou vstupující kapaliny.



Obr. 2.3 Vypařování kapaliny o různých teplotách a různém tlaku [10]

## 2.2.2 Hustota

Směs o vysoké hustotě má mezi molekulami silnější vazby a hůře se tak odpařuje. Naopak je tomu u směsi s nižší hustotou, která k překonání mezimolekulárních vazeb spotřebuje méně energie (tepla). Vyšší hustota tedy znamená horší odpařovací rychlost (obr. 2.4), jak dokazuje např. zdroj [11].



Obr. 2.4 Závislost množství vypařené kapaliny na hustotě [11]

### 2.2.3 Plocha odpařovací hladiny

Odpařování závisí i na velikosti plochy, ze které se voda odpařuje. Děje se tak z důvodu zvyšování plochy pro přestup hmoty podle Fickova zákona (rov. 2-3). Čím větší tato plocha je, tím se rychlost odpaření zvyšuje.

$$\frac{\dot{N}_A}{A} = -\frac{D_g}{RT} \cdot \frac{dp_A}{ds} \quad \text{rov. (2-3)}$$

kde  $N_A$  – molový tok složky A [kmol/s],  
 $A$  – plocha přestupu hmoty [m<sup>2</sup>],  
 $D_g$  – difuzní koeficient plynné fáze [m<sup>2</sup>/s],  
 $p_A$  – parciální tlak složky A [Pa],  
 $s$  – vzdálenost od fázového rozhraní [m],  
 $R$  – univerzální plynová konstanta [J/mol.K],  
 $T$  – teplota [K].

Při výpočtu molového toku a tím vynásobením pravé strany rovnice plochou  $A$ , dostáváme s vyšší plochou i vyšší molový tok [12].

### 2.2.4 Koncentrace par nad kapalinou (vlhkost)

Difuze (přestup hmoty) je děj, při kterém se vyrovnávají koncentrace. Při vysokém rozdílu koncentrací probíhá difuze rychleji a při postupném vyrovnávání koncentrací se snižuje. Je-li nad kapalinou nízká koncentrace par, probíhá odpařování rychleji než při vysoké koncentraci. Tento jev lze sledovat v upraveném Fickově zákoně (rov. 2-4):

$$\dot{n}_1 = \frac{D_{12}}{RT} \cdot \frac{p_{1F} - p_{1I}}{s} = D_{12} \cdot \frac{c_{1F} - c_{1I}}{s} \quad \text{rov. (2-4)}$$

$$\dot{n}_1 = -\dot{n}_2 \quad \text{rov. (2-5)}$$

kde  $c$  – koncentrace složky,  
 index F znázorňuje fázové rozhraní a index I znázorňuje jádro proudu.

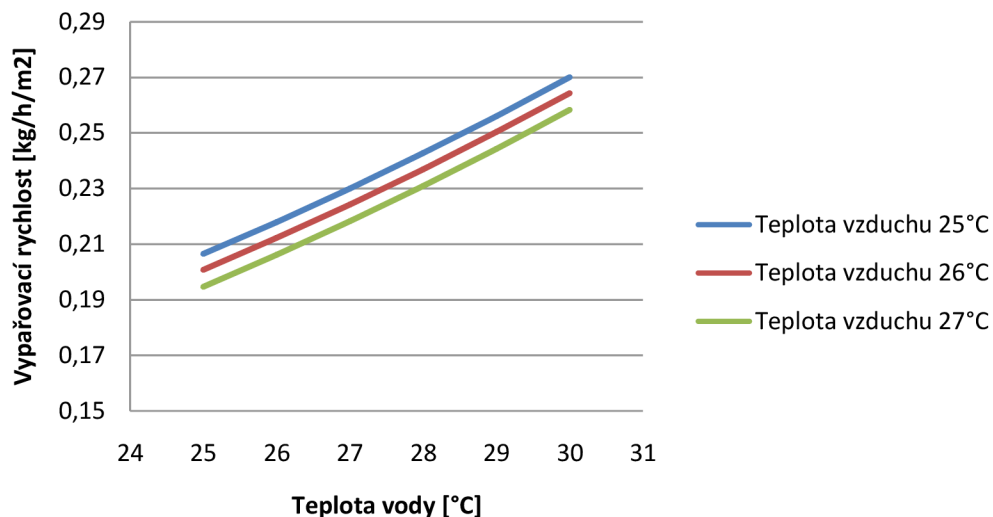
Z rovnice vyplývá tvrzení o rychlosti vypařování. Pokud je na jádru proudu (nad kapalinou) velká koncentrace par, molový tok bude nabývat nižších hodnot [12].

### 2.2.5 Koncentrace jiných látek nad kapalinou

Při odpařování se nad kapalinou mohou shromažďovat i jiné látky než jen pára. To zapříčiní snížení objemu pro páru a zvýší se tím její koncentrace. Je patrné, že tento jev může nepříznivě ovlivnit odpařování. V principu se jedná o stejný případ, jako u vlhkosti.

### 2.2.6 Teplota nad kapalinou

Horká kapalina se lépe odpařuje při nižší teplotě okolního vzduchu. Chladný vzduch způsobí rychlejší odpařovací rychlost z důvodu vyššího teplotního gradientu. Tento faktor je v některých publikacích popsán opačně (vyšší teplota vzduchu = lepší odpaření). Následující graf (2.1) je podložen experimentálními daty z měření odpařování vody z plaveckého bazénu.



**Graf 2.1** *Vypařovací rychlost v závislosti na teplotě okolního vzduchu [13]*

### 2.2.7 Rychlost odvodu par

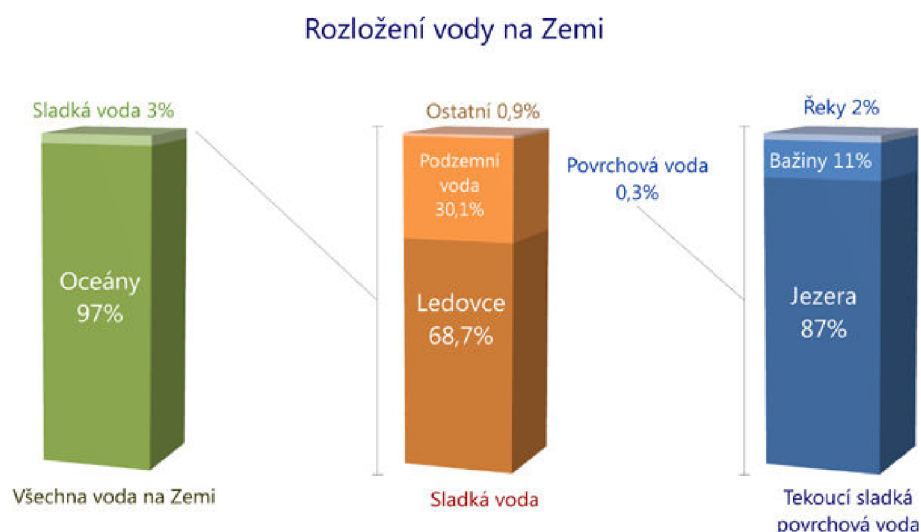
Při odvodu par se snižuje vlhkost nad kapalinou, to znamená, že se sníží koncentrace par nad kapalinou a zvýší se rychlost odpaření (foukání polévky), jak již bylo popsáno výše. Pokud nad odpařovací plochou odvádíme páry například větrem, zlepšuje se odpaření.

### 3 ODSOLOVÁNÍ

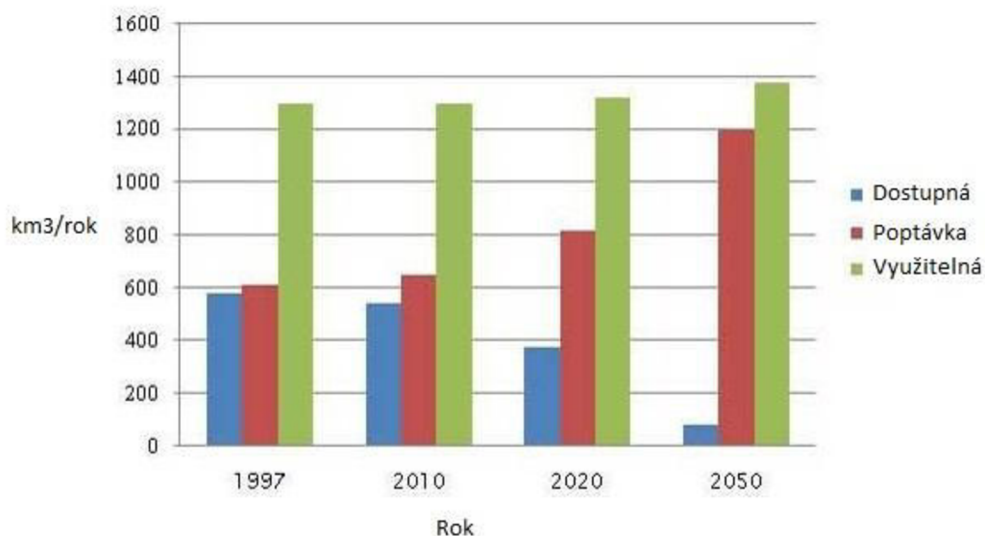
Přeměna slané vody na sladkou se nazývá odsolování. V přírodě tento proces probíhá kontinuálně v takzvaném koloběhu vody. Voda ve formě kapiček deště padá na zemský povrch a stéká vodními toky do oceánu. Na této cestě je voda obohacena o různé minerály a soli. Vlivem slunečního záření se voda na cestě i při setrvání v jezerech či oceánech odpařuje do atmosféry. Minerály a soli zůstávají ve vodě a odpařená voda se akumuluje do oblak. Ty následně způsobí dešťové srážky a takto proces probíhá stále dokola [14]. V dnešní době se pro odsolení vody používají různé metody (viz kapitola 4) jako jsou tepelné, membránové nebo další metody (zmražení vody).

#### 3.1 Dostupnost sladké vody ve světě

Lidstvo hledá náhradu za zdroje, jako je například ropa, ale není zde žádná náhrada za vodu. Ta představuje základ života. Člověk může žít bez jídla asi měsíc, ale bez vody nepřežije více než týden. Dotýká se všech aspektů našeho života, od pití a sprchování, k pěstování potravin a chovu zvířat, či na výrobu elektřiny. Z následujícího obrázku (3.1) se může zdát, že je na světě vody dostatek. Bohužel tomu tak není, jen 3 % z veškeré vody na Zemi tvoří sladkou vodu. Sladká voda je ovšem z 30 % podzemní voda a z 68 % tvoří ledovce a tzv. „věčný sníh“. Pouze 1 % vody lze tedy použít pro lidstvo, jehož populace je více než sedm miliard. Před šedesáti lety byla světová populace asi 2,5 miliardy a do roku 2050 se počítá s více než devíti miliardami lidí. Se zvyšujícím počtem lidí roste i životní úroveň a poptávka po sladké vodě se zvyšuje (obr 3.2) [15].



Obr. 3.1 Dostupnost sladké vody na Zemi [15]



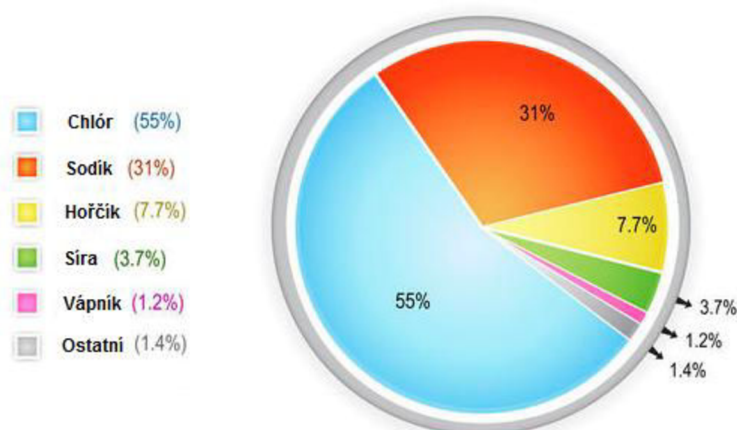
**Obr. 3.2** Historická a predikovaná data pro Indii [16]

### 3.2 Mořská voda

H<sub>2</sub>O je polární molekula, v níž se může rozpustit mnoho látek (obr. 3.3), jako například soli, cukry, kyseliny či organické molekuly. Soli zabírají cca 3,5 % hmotnosti vody v oceánech, ale obsah soli se liší v různých místech (Mrtvé moře má obsah soli 30 %, což je téměř devětkrát více než je průměrný obsah v oceánech). Koncentrace soli ve vodě se vyjadřuje její salinitou v jednotkách ppm či g/kg a pohybuje se v rozmezí od 31 do 38 g/kg [17], [18]. Podle koncentrace rozpuštěné soli ve vodě se dělí na sladkou, brakickou a mořskou vodu (tab. 3.1).

Voda	Koncentrace solí
Sladká	<500 ppm
Brakická	500 – 30 000 ppm
Mořská	30 000 – 50 000 ppm

**Tab. 3.1** Dělení vod [19]



Obr. 3.3 Rozpuštěné soli v mořské vodě [18]

### 3.3 Úpravy vody

Obvykle je nutné vodu před vpuštěním do odsolovací jednotky upravit dle požadavků, kladených na kvalitu slané vody. Tyto požadavky se liší s použitou metodou. Naopak po průchodu jednotkou je voda zbavena minerálu a je potřeba je do vody přidat, aby byla vhodná ke konzumaci. Tento proces se nazývá remineralizace a spadá do kategorie konečné úpravy vody. Dále do této kategorie spadá například dezinfekce vody.

#### 3.3.1 Příprava

Existují různé rizikové faktory, které mohou poškodit odsolovací zařízení, a je třeba jim předcházet. Příprava vody zajistí, aby tyto faktory nijak neohrozily snížení výkonu či nezpůsobili již zmíněné poškození jednotky.

U tepelných metod se jedná o následující faktory [17]:

- zanášení teplosměnných ploch výměníků tepla/kondenzátorů
- koroze části zařízení
- eroze obsaženými látkami
- důsledky dalších přítomných složek

U membránových metod jsou faktory následující [17]:

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

### 3.3.2 Konečná úprava

Při konečné úpravě záleží na koncovém účelu, ke kterému je voda využita. Může se jednat o průmyslové či zemědělské využití, ale i o výrobu pitné vody. Vodu pro pitné účely je důležité nejprve dezinfikovat, dodat potřebné chloridy a minerály. Mezi nejčastěji přidávané chemikálie na demineralizaci patří ty, které obsahují vápník nebo vápník a hořčík. Tyto chemikálie se nejčastěji dávkuje do odsolené vody v množství  $60 \div 120$  mg/l, aby byla voda prospěšná lidskému zdraví a zároveň se zabránilo korozi vodovodních řádů. Sladká voda je totiž bez minerálů agresivní a nestabilní a má schopnost se sama stabilizovat například korodováním materiálu, se kterým je ve styku [17].

Mezi nejčastější metody remineralizace se řadí tyto [17]:

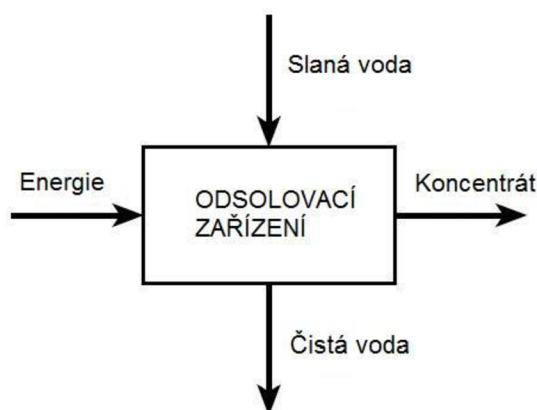
- přímé dávkování chemikálií obsahujících vápník a hořčík
- mísení odsolené vody s určitým množstvím neodsolené nebo sladké vody s vysokým obsahem vápníku a hořčíku
- proces, při kterém je hořčík nebo vápník přidáván rozpouštěním přirozeně se vyskytujících minerálů jako je vápenec nebo dolomit (vápník a uhličitán vápenatý)



## 4 METODY ODSOLOVÁNÍ

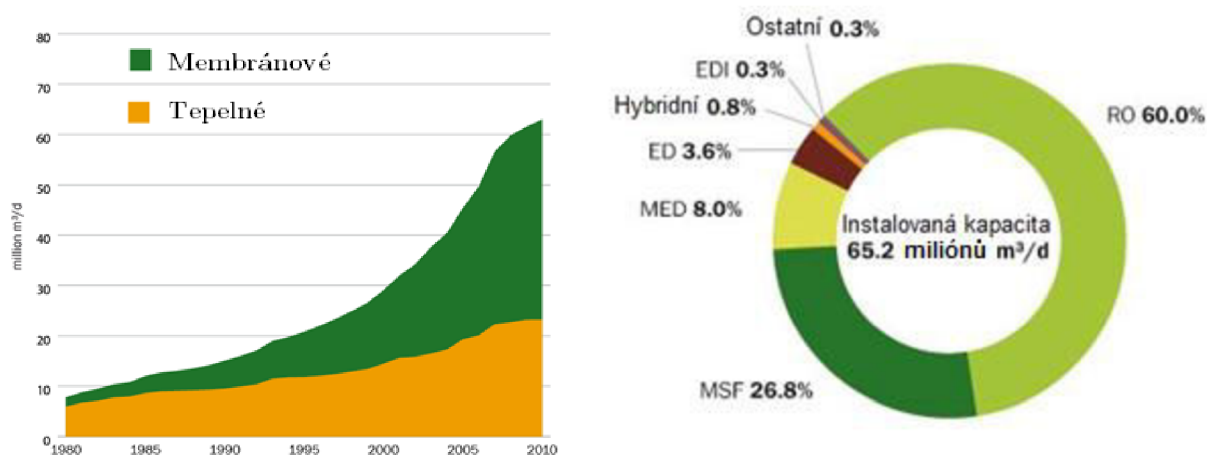
Tato kapitola pojednává o světově používaných odsolovacích metodách a vysvětluje principy jednotlivých zařízení. Odsolovací metody dělíme na tepelné, membránové a ostatní. Existují i hybridní metody, využívající jak tepelné, tak membránové metody, ale jsou méně používané.

Každá odsolovací jednotka dělí vstupní proud slané vody na dva výstupní proudy (obr. 4.1) za současného působení energie (elektrická, tepelná). Jedná se o proud vyčištěné vody a koncentrát. Čistá voda je voda ochuzená o soli (popřípadě minerály) a nečistoty, zatímco koncentrát je o tyto prvky zahuštěn. Jak již bylo řečeno, každé odsolovací zařízení potřebuje ke svému chodu určitý druh energie. V případě tepelných metod to je jak tepelná, tak elektrická energie, kdežto membránové metody využívají pouze elektrickou energii. Tepelné metody jsou obecně považovány za energeticky náročnější [24], vykazují ovšem kvalitněji vyčištěnou vodu, která má zbytkový obsah rozpuštěných látek v rozmezí 0,5 až 50 ppm. Vyčištěná voda z membránových metod obsahuje 25 až 500 ppm zbytkových rozpuštěných látek [17].



**Obr. 4.1** Princip odsolovací jednotky [14]

Od roku 2003 rapidně stoupla poptávka po membránových metodách, převážně po reverzní osmóze (viz obr. 4.2). Tepelné metody jsou ovšem také stále využívány (především MSF).



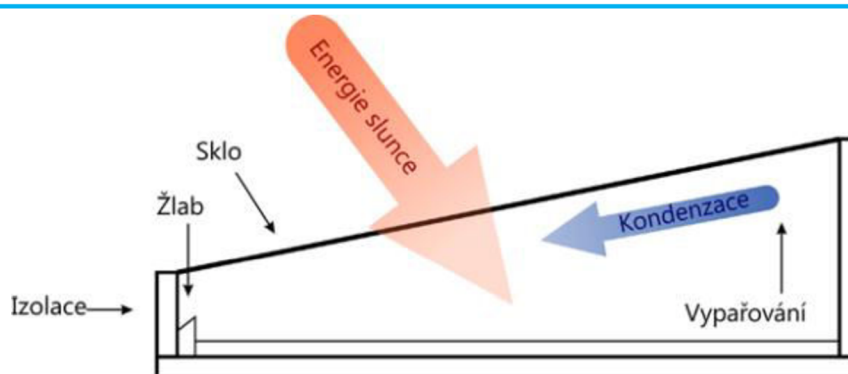
Obr. 4.2 Využití odsolovacích metod ve světě [20]

## 4.1 Tepelné metody

Metody využívající tepelnou energii se nazývají tepelné a jsou známy již po tisíce let. Jedná se o technologie využívající fyzikálního jevu zvaného destilace. Mezi původní způsoby patří solární destilace. Nyní existují další, které zvyšováním či snižováním tlaku korigují bod varu destilované kapaliny. V následujícím textu budou jednotlivé metody blíže popsány.

### 4.1.1 Solární destilace

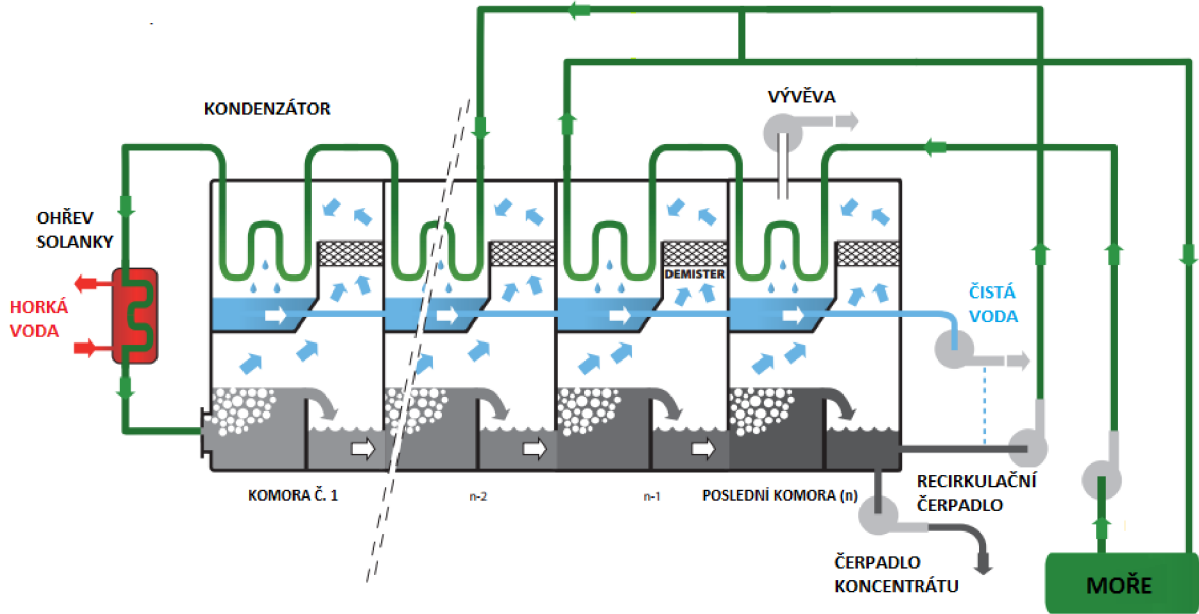
Technologie solární destilace (obr. 4.3) se využívá převážně v místech s hojným slunečním svitem. Jedná se o nádobu černé barvy (černá pohlcuje světlo) zakrytou sklem pod určitým úhlem. Na stékající straně se nachází žlab pro zachycení destilátu. Slunce svítící na sklo zahřívá vodu uvnitř a dochází k postupnému vypařování. Vzniklé páry stoupají vzhůru a zachytí se na skle, kde kondenzují, a vzniklý destilát stéká do žlabu. Odtud je dále dopravován do zásobníku. Při tomto procesu nedochází k varu, ale pouze vypařování a destilát je velmi čistý (nemusí být ovšem sterilní). Destilát může obsahovat některé bakterie, udává se ale, že je vyhovující pro pití [21].



Obr. 4.3 Solární destilace [21]

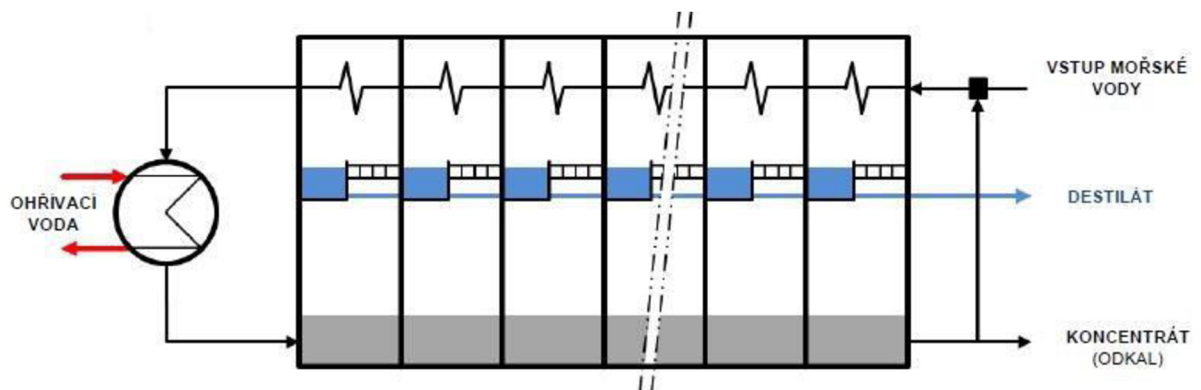
#### 4.1.2 MSF – Vícetupňová mžiková destilace

Princip mžikové destilace spočívá v odpařování mořské vody o vyšší teplotě za současného podtlaku v komoře. Celá jednotka se skládá z několika spojených komor, v nichž je udržován postupně klesající tlak (vývěvou, ejektory). Každá komora obsahuje přepážku, demister, kondenzátor a nádobu na zachycování destilátu. Ve většině stávajících zařízení je mořská voda čerpána do kondenzačního potrubí, kde získává tepelnou energii při kondenzaci par uvnitř. Takto zahřátá voda nespotřebuje mnoho tepla v dodatkovém ohříváku, a tudíž snižuje energetickou náročnost procesu. Po vstupu do komory dojde k mžikovému odpaření části kapaliny. Vzniklá pára s sebou unáší i kapičky vody, které jsou zachycovány demisterem. Následně je pára zkondenzována zpět do kapalné fáze (destilátu) a odváděna pryč z procesu. Neodpařená voda (koncentrát) je obohacena o koncentraci solí a minerálů a část je odvedena k recirkulaci. Zbytek je vypouštěn zpět do moře. Zapojením sekce bez využití kondenzačního tepla v posledních stupních (obr. 4.4) lze zvýšit účinnost zařízení. Do posledních stupňů se přivede chladicí (mořská) voda, která je po průchodu kondenzátory vedena zpět do moře a z části smíchávána s recirkulujícím koncentrátem. Do posledních stupňů tedy nevstupuje voda zředěná ohřátým koncentrátem, ale pouze studená mořská voda. Díky tomu se zlepší kondenzace uvnitř komor.

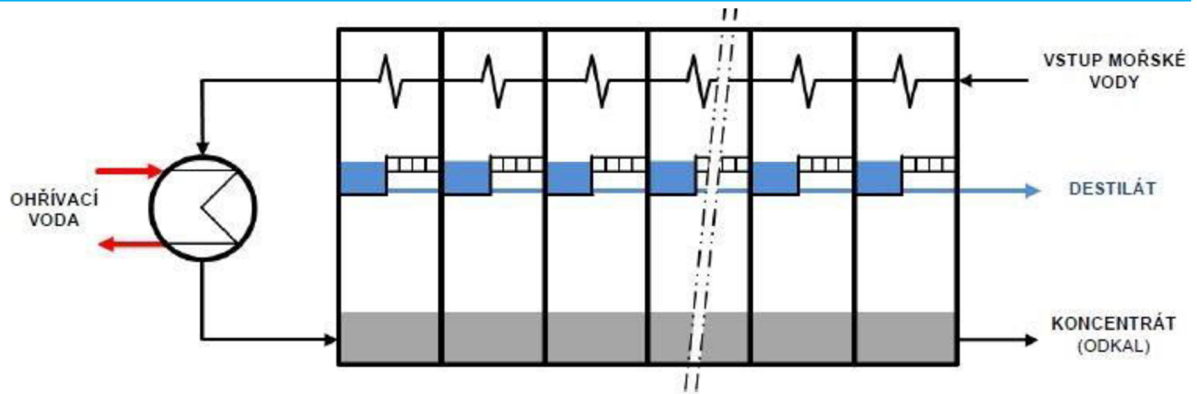


Obr. 4.4 MSF zapojení bez využití kondenzačního tepla [22]

Dalším již z části zmíněným zapojením jednotky MSF je takzvané zapojení s využitím kondenzačního tepla. Princip spočívá v proudění chladicí mořské vody skrz všechny komory jednotky od poslední k první a je tedy využito kondenzační teplo k předehřevu chladicí vody. Dále vstupuje do dodatkového ohříváku, kde ještě zvýší svoji teplotu a vstupuje do jednotky. Toto zapojení může být jak s recirkulací části koncentrátu (obr. 4.5), tak bez recirkulace (obr. 4.6).



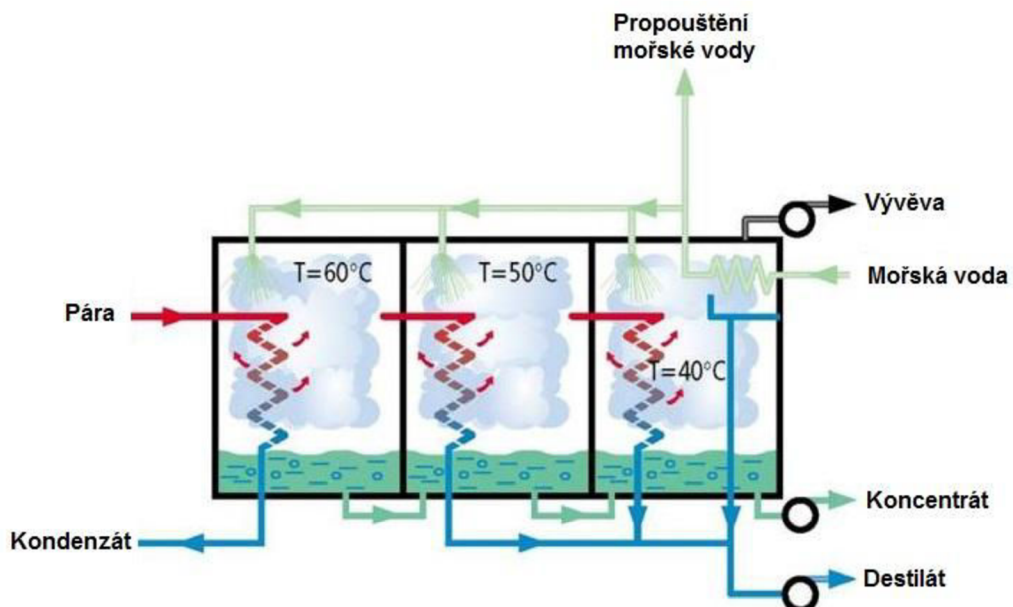
Obr. 4.5 MSF zapojení s využitím kondenzačního tepla a recirkulací koncentrátu [17]



Obr. 4.6 MSF zapojení s využitím kondenzačního tepla bez recirkulace koncentrátu [17]

#### 4.1.3 MED – Vícetupňové odpařování

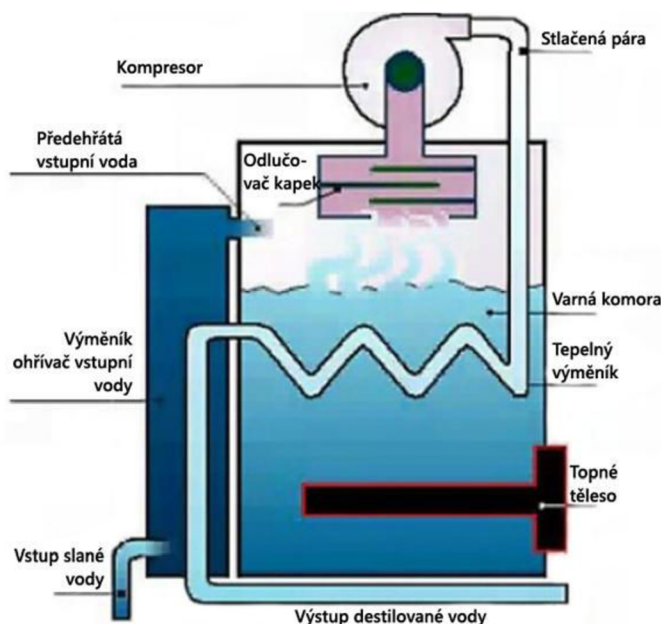
Vícetupňové odpařování (obr. 4.7) pracuje na podobném principu jako MSF. Skládá se z několika po sobě jdoucích komor udržujících klesající úroveň tlaku. Ve spodní části komory se nachází neodpařená mořská voda. Napájecí mořská voda je vedena skrz kondenzátor, nacházející se v poslední komoře. Dále je nastříkovaná do komor, kde se na potrubí vařáku část vody odpaří a vzniklá pára je vedena vlivem podtlaku v poslední komoře do vařáku následující komory. Zde zkondenzuje při předání tepla nastříkované mořské vodě a je odváděna pryč z procesu. Stejný princip je i v dalších stupních. V posledním stupni zkondenzují veškeré páry na kondenzátoru a zároveň i uvnitř potrubí vařáku. Zahuštěná voda je odváděna zpět do moře [23].



Obr. 4.7 Schéma ME [23]

#### 4.1.4 VC – Kompresce páry

Metoda, při níž je rozhodující přetlak, se nazývá komprese páry (obr. 4.8). Jedná se o nádobu se slanou vodou, zahřívanou topným tělesem ve spodní části nádoby. V okamžiku, kdy začne voda vřít, se zapne kompresor, který nasává vzniklé páry, vede je přes demister a stlačuje je. Zároveň v nádobě vzniká podtlak. Stlačením se zvýší bod varu a stlačená pára je vedena skrz nádobu, kde začíná vlivem vyššího bodu varu kondenzovat a pokračuje do tepelného výměníku. Výměník předehřívá slanou vodu před vstupem do nádoby. Destilát je na výstupu z výměníku zcela zkondenzován a odváděn do zásobníku [21].



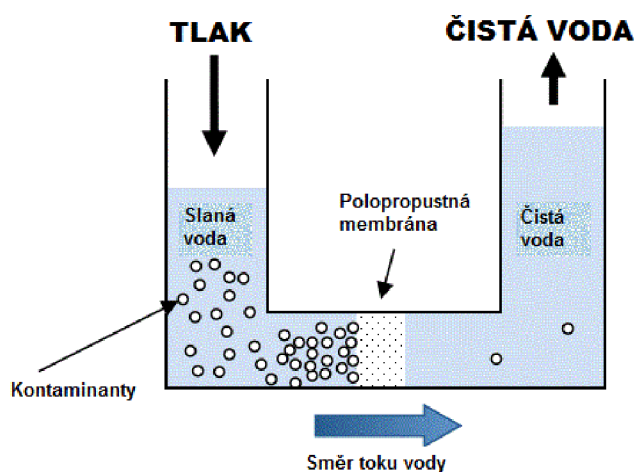
Obr. 4.8 Kompresce páry [21]

## 4.2 Membránové metody

Membránové metody jsou oproti tepelným energeticky méně náročné, jelikož pro svou funkci potřebují pouze elektrickou energii [24]. Hnací silou je u elektrodialýzy rozdíl elektrického potenciálu, reverzní osmóza využívá tlak a jeho gradient. U obou metod je použita membrána, skrz kterou jsou schopny oddělit rozpuštěné minerály a soli z napájecí vody. Neprobíhá zde fázová přeměna, ani není do procesu dodávána tepelná energie [17].

#### 4.2.1 RO - Reverzní osmóza

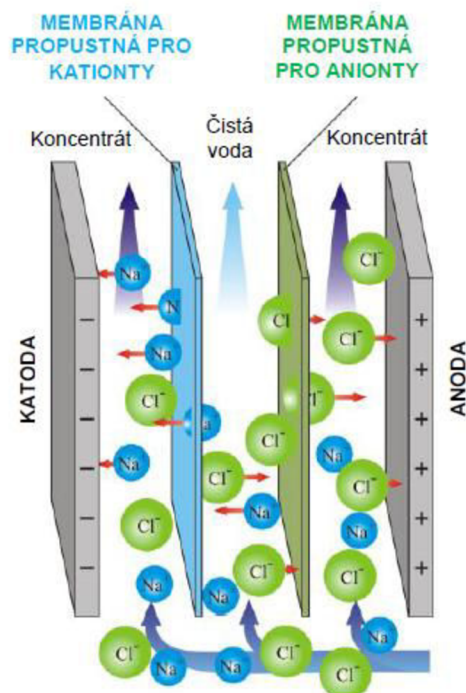
Reverzní osmóza (obr. 4.9) je nejrozšířenější membránový proces (až 88 % všech membránových procesů). Princip spočívá v protlačování slané vody skrz polopropustnou membránu, kde hnací silou je osmotický tlak. Skrz membránu projde pouze sladká voda a koncentrát je odváděn pryč. Skrz membránu tedy prochází čistá kapalina z oblasti s více koncentrovaným roztokem do oblasti s nižší koncentrací. Jedná se o opak obvyčejné osmózy, při které kapalina (voda) prostupuje skrz membránu z oblasti s méně koncentrovaným roztokem do oblasti s více koncentrovaným roztokem. Reverzní osmóza je energeticky méně náročná oproti tepelným metodám, kvalita upravené vody je ovšem řádově nižší. Membrány se vyrábí z různých materiálů, například acetát celulózy, polyamidy, polyethersulfáty atd. Nejrozšířenější materiál je v poslední době kompozitní polymer s maticí mikroporózního polysulfanu, na němž je nanесena tenká vrstva polyamidů [17].



Obr. 4.9 Reverzní osmóza [25]

#### 4.2.2 ED - Elektrodialýza

Elektrodialýza pracuje na principu propouštění a zachycování kationtů a aniontů na katexových a anexových membránách. Hnací silou je zde stejnosměrné elektrické pole (rozdíl elektrických potenciálů). Anionty jsou přitahovány k anodě a jsou propouštěny anexovou membránou, ale zachycovány na katexové membráně. Naopak kationty jsou přitahovány ke katodě, propouštěny katexovou membránou a zachycovány na anexové membráně. Vhodnou kombinací těchto membrán dochází k dělení iontů vstupního slané proudy a dochází ke vzniku destilátu a koncentráty (obr. 4.10) [26].



Obr. 4.10 *Princip elektrodialýzy* [17]

### 4.3 Ostatní metody

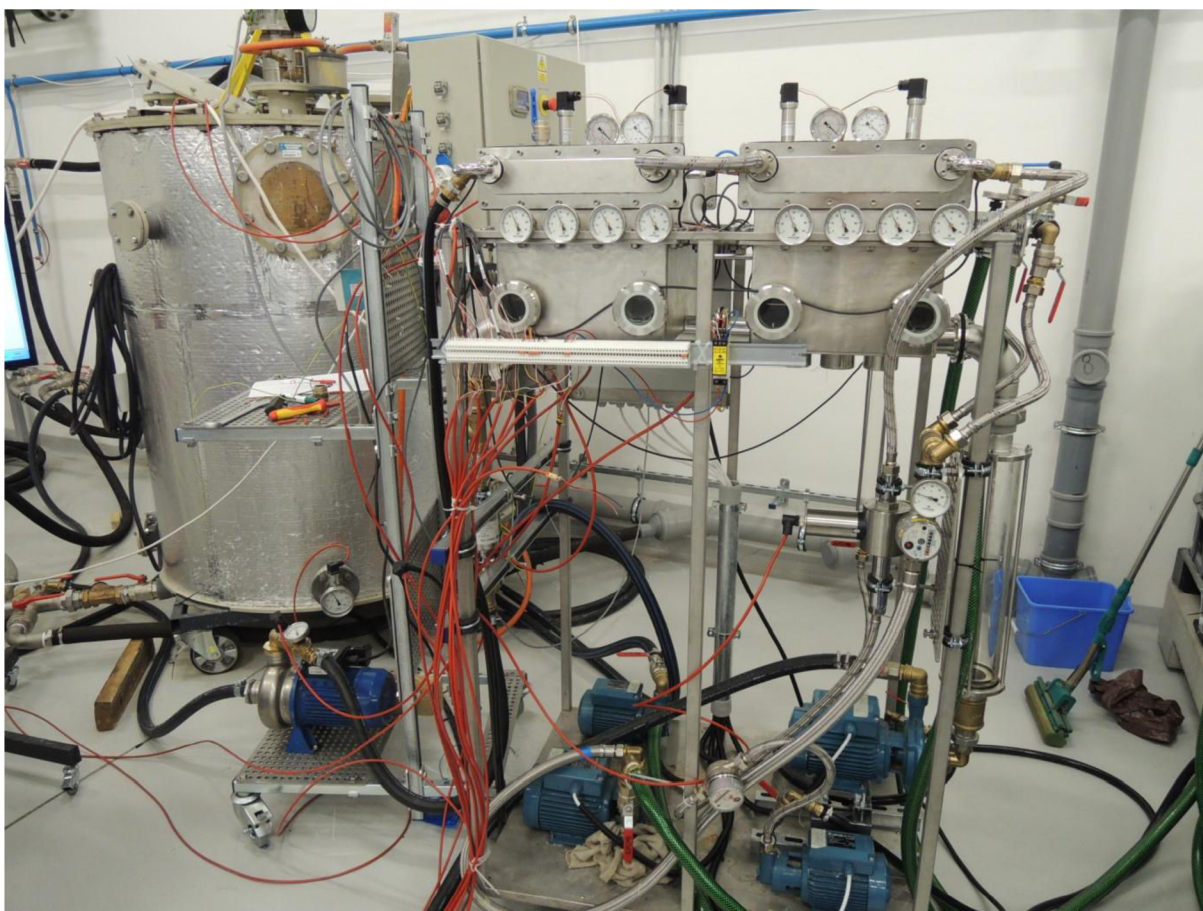
Mezi ostatní metody se řadí komerčně nevyužívané metody. Důvodem může být vysoká cena, malé kapacity či nízké stádium vývoje [17]. Dále budou některé z nich popsány.

- **Vymrazování** - Při vymrazování je ze slané vody krystalizací oddělována sladká voda. Při snížení teploty začne čistá voda krystalizovat a sůl se koncentruje v kapalném podílu. Je ovšem obtížné dále oddělit krystaly ledu od koncentrovaného roztoku [21].
- **Iontová výměna** - Jedná se o vázání kationtů či aniontů na polymerní materiál ve tvaru kuliček (iontoměnič), namísto nichž se do roztoku uvolňují vodíkové ionty a získává se tak čistá voda [21].



## 5 EXPERIMENTÁLNÍ JEDNOTKA MSF

Pro experiment byla využita experimentální jednotka MSF (obr. 5.1), jejíž detailnější popis je uveden v následujícím textu. O kontrolu nad procesem se stará celkem 25 měřidel zapisujících data do PC, ale obsahujících i měřidla pouze informativního charakteru.



**Obr. 5.1** Sestavené experimentální zařízení MSF

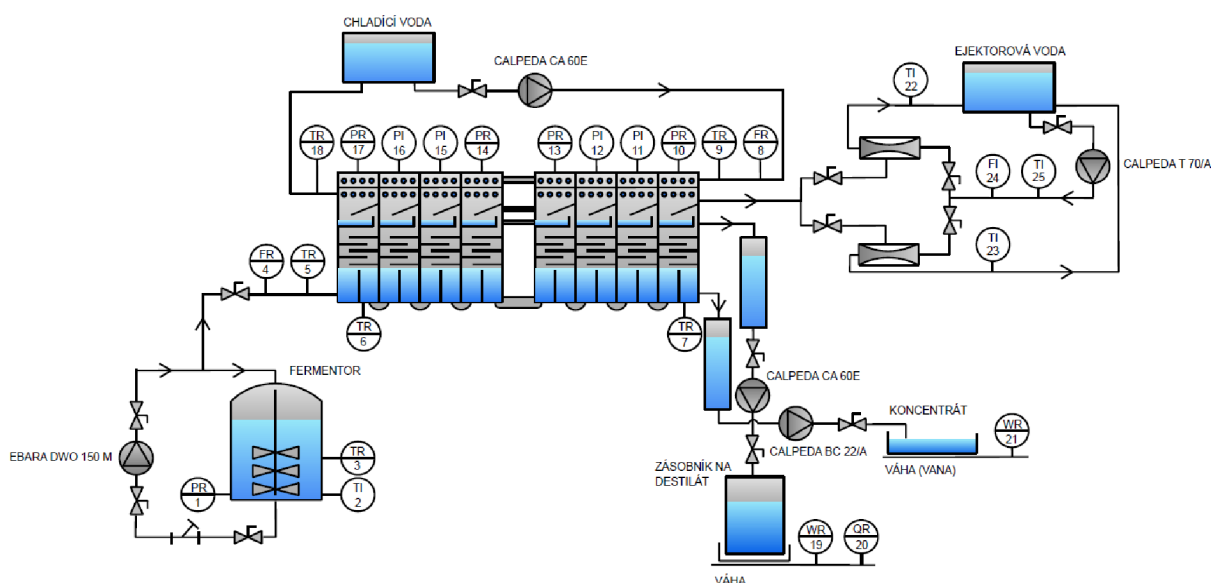
### 5.1 Technologie a popis jednotky MSF

Experimentální jednotka MSF (obr. 5.2, ve větším měřítku v příloze č. 2) se skládá ze dvou modulů, z nichž každý modul obsahuje čtyři komory. O zvýšení turbulence vody v komoře se stará přepážka, přes kterou voda musí přetéci, aby mohla pokračovat do další komory (tím se veškerá voda dostane k povrchu). Skrz oba moduly je vedeno kondenzační potrubí nacházející se v horní části. Všechny komory i oba moduly jsou spojeny potrubím ve spodní části, zajišťujícím průtok odpařované vody skrz celé zařízení. Dále jsou moduly spojeny hadicemi, která zajišťuje podtlak

v prvním modulu a potrubím na odvod destilátu. Jednotlivé komory obsahují demistry (zařízení zachycující unášené kapičky vody) ve formě etážových desek, nádobu na destilát a kondenzační desku, která zajistí stékání destilátu do nádoby. Nádoby na destilát jsou propojeny a médium je odváděno do zásobníku. Podtlak v komorách zajišťují dva ejektory zapojené paralelně. O vytváření podtlaku se stará čerpadlo Calpeda T 70A o výkonu 0,75 kW. Voda se před vstupem do prvního modulu ohřívá ve fermentoru, který ji zároveň stále promíchává pro rovnoměrné ohřátí a rozmíchání obsahu soli. Díky cirkulačnímu okruhu fermentoru je zajištěna minimální odchylka teplot mezi výstupem z fermentoru a vstupem do jednotky. Informace o podílu mezi produkovaným destilátem a koncentrátem se zjišťuje pomocí vah. Účinnost vypařování se počítá dle rovnice (5-1) a při takto navržené experimentální jednotce se pohybuje v rozmezí cca 1-5 %.

$$\eta = \frac{m_D}{m_K + m_D} \cdot 100 \quad \text{rov. (5-1)}$$

kde  $\eta$  – účinnost [%],  
 $m_D$  – hmotnost destilátu [kg],  
 $m_K$  – hmotnost koncentrátu [kg].



Obr. 5.2 Schéma MSF

Roztok vody a soli je ve fermentoru promícháván, ohříván na požadovanou teplotu a čerpadlem dopravován do MSF. Zde díky vysokému podtlaku a teplotě dochází k mžikovému odpaření vody, která s sebou unáší i kapičky vody. Ty jsou zachyceny demisterem a vzhůru stoupá pouze vodní pára, která kondenzuje vlivem proudění chladící vody v kondenzátoru a po kondenzační desce stéká do nádoby

na destilát. Destilát je následně odváděn do zásobníku, kde je vážen. Není tedy použit průtokoměr, jelikož není možné zajistit stálý průtok destilátu bez přítomnosti vzduchu a výsledný průtok je potom chybný. Stejně je tomu tak u odvodu koncentráту, který je vážen ve vaně stojící na tenzometrických snímačích LCBB.

## Použitá čerpadla

O stálý pohyb média se starají čerpadla, jejichž seznam i s charakteristikami je uveden v tab. 5.1.

Čerpadlo	Průtok [m <sup>3</sup> /h]	Výtlačná výška [m]	Výkon [kW]
CALPEDA CA 60E	0,12 ÷ 0,75	6,5 ÷ 20	0,15
CALPEDA T 70A	0,48 ÷ 3,6	10 ÷ 59	0,75
CALPEDA BC 22/A	1,5 ÷ 6,6	10 ÷ 21	0,55
EBARA DWO 150 M	6 ÷ 33	5,1 ÷ 9,5	1,1

**Tab. 5.1** *Použitá čerpadla*

## 5.2 Měřicí instrumentace

Měřicí instrumentace zapojená dle obr. 5.2 nám udává informace o procesu. Je tedy vhodné jich do procesu zařadit co nejvíce. Pro experiment na jednotce MSF jsou nejdůležitější veličiny teplota, tlak, průtok, hmotnost a salinita (konduktivita). Seznam všech použitých měřidel, jejich charakteristiky a zařazení v procesu jsou uvedeny v tab. 5.3. Význam označení jednotlivých měřidel je vysvětlen v tab. 5.2

První člen	Význam	Druhý člen	Význam
P	Tlak	R	Zápis
T	Teplota	I	Ukazování
F	Průtok		
W	Hmotnost		
Q	Konduktivita		

**Tab. 5.2** *Význam označení měřidel*

Měřidlo č.	Výrobce	Typ	Jednotky	Rozsah	Přesnost
20	Smaris	SV06	$\mu\text{S}/\text{cm}$	0 ÷ 20 000	-
1	BD Sensors	DMP 331	mbar	0 ÷ 250	-
2	SUKU	-	$^{\circ}\text{C}$	0 ÷ 100	1
3,5,9,18	Sensit	TR 080A-50	$^{\circ}\text{C}$	-30 ÷ 150	$\pm 0,152$
4,8	ComacCal	Flow 33	$\text{m}^3/\text{h}$	0,13 ÷ 7,6	0,01
6,7	Sensit	TR 080A-120	$^{\circ}\text{C}$	-30 ÷ 150	$\pm 0,152$
10,13,14,17	BD Sensors	DMP 331	bar	-1 ÷ 0	-
11,12,15,16	PTL	EA0131	bar	-1 ÷ 0	0,05
19	LESAK	RWS-M	kg	0,001 ÷ 30	0,001
21	PT Limited	LCBB	kg	5 ÷ 500	-
22,23,25	Aparator Metra	-	$^{\circ}\text{C}$	0 ÷ 120	1
24	Ista	D88	$\text{m}^3$	-	0,0001

**Tab. 5.3** Seznam měřící instrumentace

### 5.2.1 Teplota

Teplota je jedna z nejdůležitějších veličin při měření. Pokud bychom nebyli schopni zajistit dost vysokou teplotu, může se stát, že produkce destilátu bude mizivá. Údaje o teplotě zaznamenávají odporové teploměry Pt1000 (při 0  $^{\circ}\text{C}$  mají odpor 1000  $\Omega$ ), pracující na principu zvyšování odporu při zvyšující se teplotě. Dále jsou použity bimetalové teploměry v méně důležitých a pouze informativních místech. Jedná se o různé dva spojené kovy, které mají odlišnou tepelnou roztažnost a při působení teploty se ohýbají. Tento ohyb je převeden na ručku teploměru. Teploměry jsou znázorněny na obr. 5.3.



**Obr. 5.3** Bimetalické (vlevo) a odporové teploměry (vpravo)

### 5.2.2 Tlak

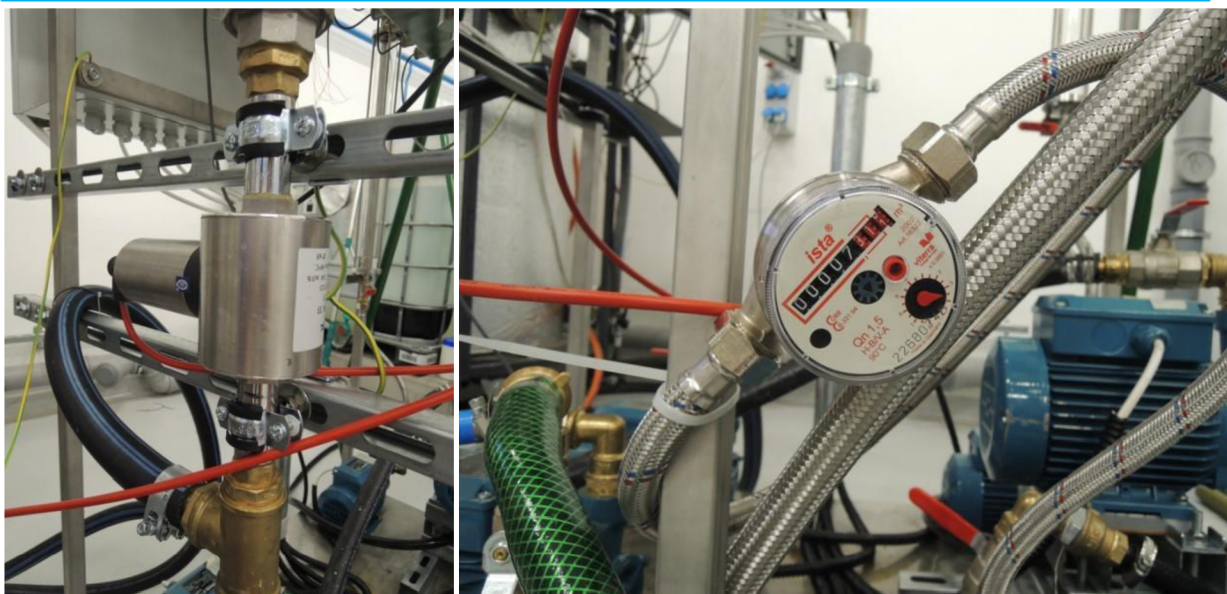
Tlak resp. podtlak patří stejně jako teplota k nejdůležitějším veličinám. Vysoký podtlak zaručí odpaření i při nižších teplotách. Pro zápis jsou použity snímače tlaku DMP 331 s analogovým výstupem, jehož signál se zapisuje do měřicí karty Delphin Technology (kapitola 5.3) a vyhodnocuje v PC. Dále jsou použity manometry naplněné glycerinem s převodem na ručku, které jsou pouze informativní (obr. 5.4).



Obr. 5.4 Snímače tlaku (na bocích) a manometry (uprostřed)

### 5.2.3 Průtok

Průtok se měří indukčním průtokoměrem, ve kterém se kapalina pohybuje v magnetickém poli a získává elektrický náboj. Ten je následně měřen na elektrodách, jejichž signál je veden do měřicí karty. Dalším průtokoměrem je vodoměr. Kapalina zde prochází rotačním zařízením s lopatkami, které je převedeno na číselník v  $\text{m}^3$ . Při známém čase můžeme spočítat průtok. Oba typy průtokových měřidel jsou znázorněny na obr. 5.5.



Obr. 5.5 Indukční průtokoměr (vlevo) a vodoměr (vpravo)

#### 5.2.4 Salinita (konduktce)

Salinita je měřena nepřímo tzv. konduktometrem (obr. 5.6). Jedná se o zařízení, které měří vodivost kapaliny. Vodivost vody se mění se salinitou a pomocí zjednodušeného empirického vztahu (rov. 5-2) lze vodivost přepočítat na salinitu [27].

$$s = 0,64 \cdot k \quad \text{rov. (5-2)}$$

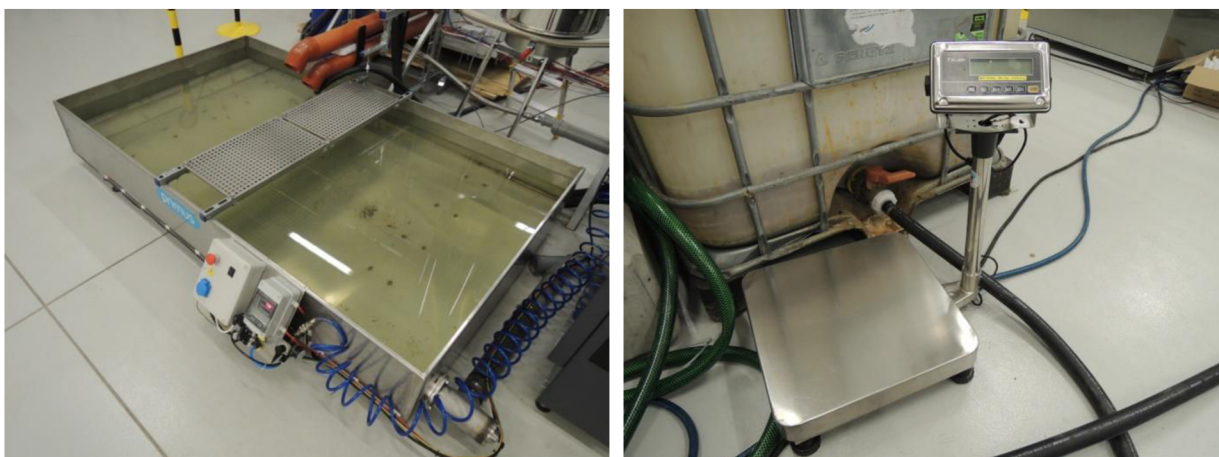
kde  $s$  – salinita [ppm],  
 $k$  – vodivost [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ].



Obr. 5.6 Konduktometr

### 5.2.5 Hmotnost

Hmotnost destilátu a koncentrátu je měřena na samostatných váhách (obr. 5.7). V případě koncentrátu se jedná o svařenou nádobu (vanu) stojící na čtyřech tenzometrických snímačích. Destilát je dopravován na můstkovou váhu firmy Lesak.



Obr. 5.7 Váha na koncentrát (vlevo) a destilát (vpravo)

### 5.3 Měřicí ústředna a software

O sběr dat se stará měřicí ústředna firmy Delphin Technology AG (obr. 5.8). Jedná se o modulární systém kombinující různě vybavené měřicí karty tak, aby co nejlépe vyhovoval konkrétnímu měření a regulaci. Systém obsahuje hlavní jednotku (master) a šest podružných jednotek (slave), do kterých je integrováno 14 měřících karet [28].



Obr. 5.8 Měřicí ústředna Delphin Technology [28]

## 6 TEORIE PLÁNOVANÉHO EXPERIMENTU

Tato kapitola popisuje základní teorii plánovaného experimentu v rozsahu odpovídajícím potřebám diplomové práce. Více o plánování experimentů lze nalézt v publikacích [29], [30], [31].

### 6.1 Úvod do navrhování experimentů

Navrhování statistických experimentů je efektivní způsob získávání objektivních závěrů o sledovaných veličinách. Jedná se o ucelený souhrn pokusů (měření), dle určitého návrhu. Takový návrh se skládá z vlastního plánu experimentu a ze statistického vyhodnocení plánu. Základním kamenem návrhu jsou dvě části, a to replikace (počet opakování) a randomizace (znáhodnění). Replikace slouží k odhalení chyby, která může nastat při původním měření, tedy při více opakováních bude větší šance k odhalení chyby měření a tím se docílí přesnějšího vyhodnocení. Randomizace zase zaručuje, že pořadí měření bude prováděno náhodně a nebude v něm žádná logická posloupnost. K navržení experimentu je zapotřebí určit si hlavní faktory, které ovlivňují výsledek (odezvu). Tyto faktory mohou být říditelné (můžeme jejich hodnoty měnit) a neříditelné (tyto měnit nelze). Neříditelné faktory do experimentu nezapočítáváme, jelikož jejich hodnoty nemůžeme nijak omezit, z toho důvodu se experiment provádí pouze s říditelnými faktory. Po provedení plánovaného experimentu zjistíme, které z říditelných faktorů ovlivňují odezvu více a které méně. Dále chceme z analýzy výsledků určit podmínky, za jakých bude odezva nejlepší [29].

Každý experiment se skládá z následujících fází [29]:

- Analýza procesu
- Návrh experimentu
- Provedení zkoušek ve stanoveném pořadí
- Analýza výsledků
- Závěry

#### Analýza procesu

V první fázi plánování je potřeba určit odezvu, kterou sledujeme a faktory ovlivňující tuto odezvu. Je tedy nutné mít znalosti o analyzovaném procesu.



---

## Návrh experimentu

Zde existuje mnoho různých návrhů, při jejichž výběru se musíme řídit časovou i ekonomickou náročností.

## Provedení zkoušek

Provádí se ve stanoveném pořadí a výsledky se zaznamenávají pomocí určitého software.

## Analýza výsledků

Výsledkem analýzy je většinou vyhodnocení, které faktory ovlivňují odezvu nejvíce a jaké jsou mezi nimi interakce (společné působení). Cílem tohoto experimentu je najít a vybrat ty faktory, které nejvíce ovlivňují odezvu a určit jejich efektivní nastavení.

## Závěry

Závěrem každého experimentu by mělo být zhodnocení výsledků, neboli které faktory odezvu ovlivňují nejvíce a jak je nastavit pro optimální výsledek a naopak.

## 6.2 Základní typy návrhů experimentu

Jak již bylo řečeno, existuje mnoho typů návrhu. Obecně je lze rozdělit do čtyř skupin [29]:

- 1. Faktoriální návrhy** – slouží k popisu procesu a identifikaci důležitých faktorů
- 2. Návrhy pro hledání optimální odezvy** – vhodné při hledání optimální hodnoty odezvy (hledání optimální kombinace hodnot faktorů ovlivňujících odezvu)
- 3. Směšové návrhy** – slouží k nalezení procentuálního zastoupení jednotlivých složek směsi, ze kterých se vytváří výsledná odezva

**4. Optimální návrh** – slouží k detailní specifikaci statistického modelu, který testujeme. Je potřebné mít k dispozici mnoho informací, abychom tento návrh mohli provést.

V našem případě byl použit dílčí faktoriální experiment  $2^{k-p}$ . Pro úplnost je popsán i základní faktoriální návrh typu  $2^k$ .

### 6.2.1 Faktoriální návrh typu $2^k$

Tento návrh umožňuje redukci počtu měření. Jeho další výhodou je poměrně dobré odlišení interakcí mezi jednotlivými faktory a míru jejich závislosti. Jedná se o experiment, při kterém zkoumáme určitý počet  $k$  faktorů o dvou úrovních (horní a dolní mez). Například pro tři faktory provádíme osm měření ( $2^3$ ), přičemž se započítají všechny kombinace faktorů a jejich mezí [32].

Hlavní výhody tohoto návrhu jsou následující [32]:

- Jednoduchý pro použití a analýzu dat
- Lze použít grafické metody
- Splňuje většinu parametrů pro potřebu zlepšování kvality
- Vhodný pro postupné testování
- Rozumný rozsah měření při velkém počtu faktorů

### 6.2.2 Dílčí faktoriální experiment $2^{k-p}$

Používá se pro identifikaci důležitých faktorů při experimentování, za předpokladu redukce počtu měření. Znamená to, že původní počet měření v návrhu  $2^k$  se dá snížit o stupeň snížení  $p$ , neboli  $2^{k-p}$ . Například máme-li sedm faktorů, které představují 128 měření, můžeme tento počet snížit o polovinu, tedy 64 měření ( $p = 1$ ). Pokud experiment snížíme o polovinu, nazýváme jej poloviční. Stupeň snížení ovšem nemusí být pouze 1. Obecně platí, že můžeme experiment snížit tak, aby počet výsledných měření  $n$  nebyl menší, než počet faktorů. Musí tedy platit podmínka  $n \geq k$ . V případě sedmi faktorů můžeme snížit experiment až na osm měření ( $p = 4$ ) a podmínka bude splněna. Statistický software vždy vybere nejdůležitější kombinace faktorů, podle kterých lze spolehlivě určit výsledek i u takto zkráceného experimentu [30].

## 7 REALIZACE EXPERIMENTU

V této kapitole bude podrobněji popsán provedený experiment a vše s ním související. Experiment je zaměřen na zjištění klíčových faktorů, důležitost těchto faktorů při provozu a vytvoření modelu, který popisuje vztah mezi vybranými faktory pro nastavení zařízení na nejvyšší účinnost.

### 7.1 Analýza procesu

Při analýze procesu probíhá výběr hlavních faktorů, se kterými budeme dále pracovat. Je tedy nutná určitá teoretická znalost mžikového odpařování, ale i praktická. U experimentální jednotky nejsme schopni regulovat všechny faktory, které jsou níže vypsány (i v kapitole 2.2). Nejprve probíhá „seznámení se“ s použitou technologií, jejíž popis je uveden v kapitole 5. Z těchto znalostí jsme schopni určit, které faktory jsme schopni regulovat a které nikoliv.

#### 7.1.1 Faktory ovlivňující odpařování v MSF

##### **Teplota nástřiku**

Na teplotě nástřiku je závislá rychlost odpaření po vstupu do jednotky. Vyšší teplota znamená více odpařené vody a zaručí nám, že i v posledním stupni jednotky bude stále teplota dost vysoká na to, aby docházelo k odpaření [33].

##### **Teplota chladicí vody**

Teplota chladicí vody je důležitá pro kondenzaci odpařené vody. Chladnější voda způsobí vyšší teplotní rozdíl a tím vyšší stupeň kondenzace [33].

##### **Průtok chladicí vody**

Na tomto průtoku je závislá teplota chladicí vody a tím i kondenzace uvnitř zařízení. Pokud by byl průtok moc malý, způsobil by menší přenos tepla v celém zařízení. Díky tomu by mohlo dojít k situaci, že voda v kondenzátorovém potrubí nebude dostatečně chladná a způsobí menší stupeň kondenzace (produkce destilátu bude menší). Tento průtok je omezen charakteristikou použitého čerpadla [33].

## **Průtok koncentráту**

Průtok koncentráту je omezen nejen použitým čerpadlem, ale i geometrií MSF jednotky. Obecně platí, čím vyšší průtok koncentráту, tím vyšší produkce destilátu [33].

## **Salinita**

Salinita ovlivňuje hustotu slané vody a tím její bod varu. Vyšší salinita znamená vyšší hustotu a tím vyšší bod varu [33].

## **Počet stupňů aparátu**

Počtem stupňů aparátu se definuje výkonnost zařízení (produkce destilátu). Se zvyšujícím počtem stupňů se zvyšuje kapacita zařízení i produkce destilátu [17].

## **Zapojení sekce bez využití kondenzačního tepla**

Obvykle se při odsolování v jednotce MSF používá tzv. zapojení sekce bez využití kondenzačního tepla. Je to z důvodu zvýšení účinnosti zařízení, kdy do posledních stupňů jednotky vstupuje chladící voda o nízké teplotě a dojde k lepší kondenzaci. Tato voda po průtoku kondenzátory odchází zpět do nádrže s chladící vodou. Pokud jednotka nevyužívá toto zapojení, jde do posledních stupňů recirkulovaný koncentrát o vyšší teplotě a snižuje se tak stupeň kondenzace [17].

## **Průtok doplňkové vody**

Tento průtok vzniká pouze při zapojení sekce bez využití kondenzačního tepla, kdy část chladící vody odcházející zpět do nádrže vstupuje i do průtoku recirkulovaného koncentráту. Dochází tedy ke zředění koncentráту formou snížení salinity. Tím dochází i ke snížení bodu varu koncentráту [17].

## **Průtok a teplota v dodatkovém ohříváku**

Produkce destilátu je závislá mimo jiné na teplotě vody v nástřiku. Tato teplota je ovlivněna teplotou a průtokem páry/horké vody proudících v trubkách ohříváku. Pokud se zvýší průtok slané vody, nemusí se v ohříváku dostatečně ohřát a sniží

se produkce destilátu. Proto je při takových změnách důležité změnit i průtok či teplotu v ohříváku [33].

### Výška otvoru mezi komorami

Důležitou roli hraje i velikost otvorů pro průtok vody mezi stupni. Některé jednotky mají tyto otvory regulovatelné, jiné tuto možnost nemají. Při nesprávné velikosti otvoru může dojít například k zaplavení komory a tím ke zředění destilátu. Je nutné nastavit otvor tak, aby hladina byla optimální ve všech stupních a provoz byl stabilní [33].

### Výška hladiny v posledním stupni

Výška této hladiny je spojena s úrovní všech předchozích komor. Ovlivňuje ji ale i průtok koncentráту či odkalu. Obvykle je hladina v této komoře nejnižší [33].

## 7.1.2 Výběr faktorů

Cílem experimentu je nalézt nejdůležitější faktory v procesu odsolování vody v jednotce MSF a dále jejich optimální nastavení tak, aby odezva (produkce destilátu) byla co nejvyšší. Jako první krok bylo zapotřebí určit faktory, které můžeme při experimentování měnit a zkoumat tak na nich závislost výstupní hodnoty. Pro tyto faktory dále provedeme dílčí experiment. V další části již víme, které faktory nejvíce ovlivňují odezvu, a vytvoříme pro ně matematický model, díky kterému budeme moci určit, při jakém nastavení bude zařízení pracovat s nejvyšší účinností. Byly vybrány všechny říditelné faktory, které by mohly mít vliv na výsledek:

- Teplota nástřiku TBT
- Chladicí voda (průtok, teplota)
- Průtok slané vody „brine“ (vstupní voda)
- Tlak
- Salinita (konduktance)

## 7.2 Návrh plánu experimentu

Pro experiment byl vybrán dílčí faktoriální návrh  $2^{k-2}$ . Vybrán byl z důvodu velké redukce výchozího počtu měření. V našem případě by se jednalo o 32 měření, ale po zavedení této metody jsme se dostali na konečný počet osmi měření ( $2^{5-2}$ ).

Jako první bod je důležité si určit pro každý faktor krajní body (meze). Jedná se tedy o dvouúrovňový experiment s pěti faktory. Výsledkem měření bude zjištění, v jaké míře faktory ovlivňují proces.

- **Teplota nástřiku** – při stanovení mezních teplot vycházíme z odolnosti fermentoru, ve kterém se bude slaná voda zahřívat. Voda ve fermentoru bude zahřívána pomocí výměníku tepla (pára-voda) na maximální teplotu 85 °C. Při určování spodní meze musíme brát zřetel na to, že voda se bude postupně v každém stupni ochlazovat a v posledním stupni musí být teplota dostatečně vysoká na to, aby došlo k odpaření. Volíme spodní teplotu 60 °C.

$$t_{\min} = 60 \text{ °C}$$

$$t_{\max} = 85 \text{ °C}$$

- **Chladicí voda (teplota, průtok)** – teplota musí být dostatečně nízká, aby ve všech stupních byl vysoký stupeň kondenzace. Byla použita voda z bečky o teplotě 23 °C a voda z vodovodního řádu o teplotě 9 °C. Použitým čerpadlem a absencí frekvenčního měniče jsme omezeni v regulaci průtoku. Voda z bečky je čerpána o průtoku cca 9 l/min, zatímco voda z vodovodního řádu zvýší průtok díky tlaku na 12,3 l/min. Z tohoto důvodu byly určeny meze podle použité vody. Pro vodu z bečky byla určena hodnota -1 a pro vodovodní řád hodnota 1.

$$CW_{\min} = -1$$

$$CW_{\max} = 1$$

- **Průtok brine (vstupní voda)** – průtok vstupní vody byl stanoven na základě vlastností čerpadla koncentrátu. Toto čerpadlo je po dobu experimentu stále zapnuto a nesmí dojít k jeho zahlcení (čerpadlo nestíhá odčerpávat vodu, dochází k zaplavení poslední komory a zředění destilátu), popřípadě zavzdušnění z důvodu nízkého průtoku, kdy čerpadlo má vyšší

průtok než vstupující voda. Experimentem byly zjištěny hodnoty pro nejnižší průtok 20 l/min a nejvyšší průtok 40 l/min.

$$V_{\min} = 20 \text{ l/min}$$

$$V_{\max} = 40 \text{ l/min}$$

- **Tlak** – mezní hodnoty tlaku volíme v závislosti na použitých ejektorech. Ty jsou způsobilé dosáhnout tlaku v posledním stupni až 0,05 bar(a). Ejektory jsou nainstalované paralelně na posledním stupni jednotky. Jako nejnižší hodnota tlaku byla zvolena hodnota -0,9 bar(g) a nejvyšší -0,8 bar(g). Jedná se ovšem o tlaky, při kterých započalo měření. V průběhu měření již nejsme schopni tlak regulovat.

$$p_{\min} = -0,9 \text{ bar(g)}$$

$$p_{\max} = -0,8 \text{ bar(g)}$$

- **Salinita (konduktce)** – salinitu, neboli hmotnostní zastoupení soli v 1 kg vody měříme nepřímo tzv. konduktometrem. Jsou tedy zvoleny hodnoty v jednotkách  $\mu\text{S/cm}$ . Tyto hodnoty lze následně jednoduše přepočítat na salinitu o jednotkách ppm pomocí vynásobení konstantou 0,64 (rov. 5-2). Spodní mez byla stanovena na 5000  $\mu\text{S/cm}$  a horní na 16 000  $\mu\text{S/cm}$ .

$$S_{\min} = 5000 \mu\text{S/cm}$$

$$S_{\max} = 16\,000 \mu\text{S/cm}$$

Pro takto navržené meze byl v programu Minitab 17 vygenerován plán experimentu (tab. 7.1). Jak již bylo řečeno, jedná se o dílčí experiment  $2^{k-2}$  u kterého byla zavedena randomizace (pořadí měření je náhodné, viz sloupec C1 a C2). Doba trvání dílčího experimentu je omezena množstvím slané vody ve fermentoru. Na základě měření bude programem Minitab graficky určena významnost jednotlivých efektů faktorů, zpracováním do Paretova diagramu (obr. 7.1). Dále program statisticky vyhodnotí experiment, jehož výstupem bude matematický model popisující závislost vybraných faktorů na účinnosti (viz rov. 7.1).

C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
Pův. pořadí	Výsl. pořadí	Centr. Bod	Blok	Vstup. teplota	Chlad. voda	Podtlak	Průtok slané vody	Salinita
7	1	1	1	60	1	0,9	20	5000
6	2	1	1	85	-1	0,9	20	16000
3	3	1	1	60	1	0,8	20	16000
8	4	1	1	85	1	0,9	40	16000
2	5	1	1	85	-1	0,8	20	5000
4	6	1	1	85	1	0,8	40	5000
5	7	1	1	60	-1	0,9	40	5000
1	8	1	1	60	-1	0,8	40	16000

**Tab. 7.1** *Plán experimentu*

### 7.3 Příprava na měření

Před samotným experimentováním bylo důležité sestavit odsolovací jednotku, dobře jí utěsnit a zařadit do technologie všechna potřebná měřidla. Pro kontrolu nad procesem a následnou analýzu výsledků je důležité zapojit měřidla do měřicí ústředny, která ukládá každý signál vyslaný z měřidel a zaznamenává jejich průběh.

Po zapojení měřidel se mohlo přejít k testování. První krok před každým testem bylo namíchání roztoku o předem zvolené salinitě. Do bečky s vodou bylo nasypáno osm balíčků slaných tablet o celkové hmotnosti 200 kg, které postupným rozpouštěním vytvořily v bečce roztok o vodivosti přibližně 230 000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (cca 147 200 ppm). Ve fermentoru se míchala voda z vodovodního řádu se sláným roztokem z bečky a na základě průběžného odebrání vzorků se namíchal roztok o požadované salinitě.

Dalším krokem je ohřátí roztoku na požadovanou teplotu. Zde se nabízejí dvě možnosti jak toho docílit. První možností je zapojit elektrické topné těleso (12 kW, 3x40 V). Tato možnost je ale zdlouhavá (cca čtyři hodiny na teplotu 60 °C). Z tohoto důvodu se k ohřívání využil místní trubkový výměník pára-voda (15 minut na teplotu 85 °C). Po ohřátí roztoku bylo zapnuto oběžné čerpadlo k zahřátí potrubí před vstupem do první komory.

Po spuštění a chvilkovém nastavování průtoku byla zjištěna vada v šoupátku. Při zavření šoupátka průtokoměr stále načítal signály do karty. Problém nastal v dosedacím těsnění šoupátka. To se z důvodu vysokého podtlaku v komorách a zároveň velké teploty vody o vyšším průtoku deformovalo. Problém byl vyřešen zavedením podložky mezi těsnění a matici toto těsnění uchycující. Na funkci těsnění tento zásah neměl žádný vliv.



Po vyřešení jednoho problému se objevil druhý. Čerpadlo odčerpávající koncentrát z komor se vysokým podtlakem zavzdušnilo a začala se plnit poslední komora. To vedlo ke zředění destilátu slaným roztokem. Tento problém se mohl vyřešit jen tak, že při každém zavzdušnění čerpadla se celé zařízení vypnulo, čerpadlo se odvzdušnilo a do prostoru nad čerpadlem se dopravila voda. To vedlo k vytvoření hydrostatického tlaku nad čerpadlem, díky kterému následně po určitou dobu pracovalo správně.

Posledním problémem, jenž se ovšem nepodařilo vyřešit, bylo odsávání destilátu. Při spuštění čerpadla a otevření kulového kohoutu za transparentním potrubím občas docházelo ke ztrátě podtlaku. Nicméně tato ztráta nebyla dostatečně vysoká, aby narušila experiment ve velké míře.

Po následné zkoušce se zjistila neschopnost přisávat vzduch do komor a zvyšovat tak tlak v komorách při překročení dolní meze podtlaku. Řešením byla instalace kulového ventilu do první komory prvního modulu, který se při potřebě pootočil a podtlak se vyrovnal na požadovanou hodnotu. V případě nižšího podtlaku nelze dělat nic a zařízení si podtlak ustálí samo.

## 7.4 Provedení experimentu

Po vyřešení všech problémů a vytvoření plánu měření se mohlo přejít k samotnému experimentování. Měření probíhalo v náhodném pořadí vygenerovaném programem Minitab. Pro přehlednost budou následující poznámky k jednotlivým měřením uvedeny v pořadí od prvního měření po osmé podle sloupce C2. Testování vždy započalo ve chvíli, kdy byly nastaveny všechny parametry dle plánu, a zařízení pracovalo v ustáleném stavu.

### Test 1

Test (tab. 7.2) běžel po prvních dvacet minut bez potíží. Následně začalo z důvodu zavzdušnění cyklicky vynechávat čerpadlo koncentrát. Vždy se zaplnilo transparentní potrubí a část poslední komory do určité výšky a následně vlivem hydrostatického tlaku začalo čerpadlo opět sávat. Bylo již ovšem z části zavzdušněno a tak se tento děj opakoval. Test bylo nutno přerušit a čerpadlo odvzdušnit. Po následném zapnutí již nezbyl ve fermentoru dostatek roztoku a test byl po chvíli ukončen. Nicméně data z prvních dvaceti minut vykazují účinnost 3,7 % s velmi dobrou kvalitou destilátu, jehož vodivost byla 3  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Při odsávání destilátu z transparentního potrubí se neměnila hodnota podtlaku.

Test 1			
Čas [h:m:s]	0:00:00	0:08:02	0:10:38
Koncentrát [kg]	0	154	199,9
Destilát [kg]	0	5,9	7,69

**Tab. 7.2** *Experimentální data testu 1*

## Test 2

Po ustálení stavu se snížila hodnota podtlaku z -0,9 bar(g) na -0,8 bar(g). Jelikož test (tab. 7.3) pracoval za teploty brine 85 °C, mohlo zde docházet ke zvyšování tlaku z důvodu rychlejšího vzniku par a nestíhání kondenzátoru tyto páry zkondenzovat. Tím docházelo k vyplňování odsávaného prostoru parami. Test probíhal bez potíží za vzniku destilátu o kvalitě 27  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a dosahoval účinnosti 3,65 %.

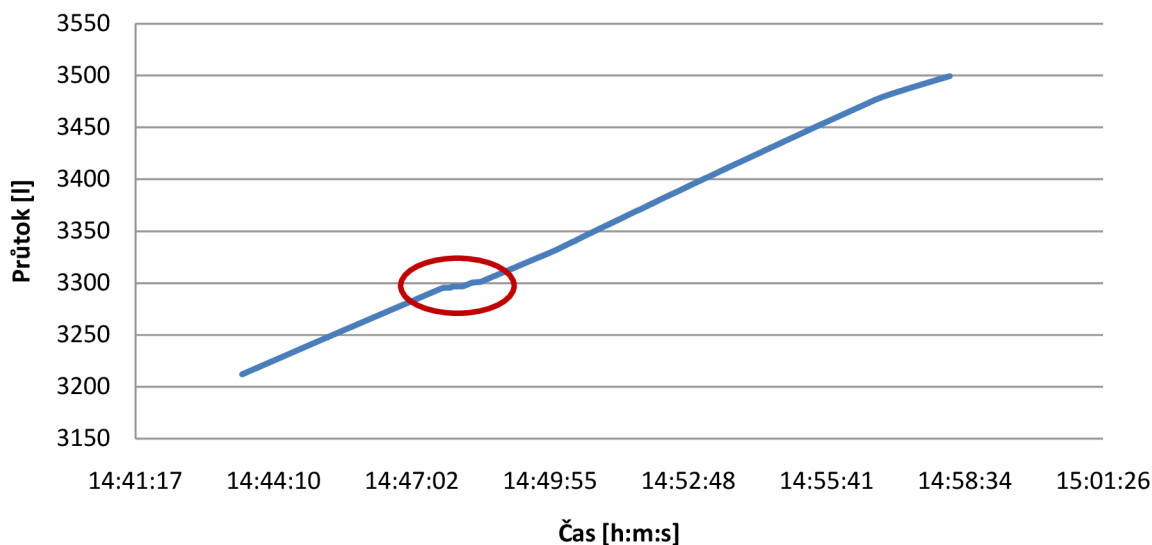
Test 2					
Čas [h:m:s]	0:00:00	0:01:14	0:04:06	0:06:30	0:08:08
Koncentrát [kg]	0	24	76,1	122,8	154,6
Destilát [kg]	0	0,967	2,95	4,645	5,863

**Tab. 7.3** *Experimentální data testu 2*

## Test 3

Tento test (tab. 7.4) produkoval nejméně kvalitní destilát (900  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). V průběhu tohoto testu klesl průtok brine na celé dvě minuty z hodnoty 20 l/min na 14,8 l/min (viz graf. 7.1, oblast vyznačená červeně). Tento problém byl ovšem zjištěn až při analýze výsledků. Podepsalo se to nejspíše na účinnosti, která byla 2,6 %. Mimo tento problém test probíhal bez potíží.

### Průtok v čase



**Graf 7.1** Průběh průtoku slané vody testu 3

Test 3					
Čas [h:m:s]	0:00:00	0:03:30	0:05:30	0:09:30	0:14:45
Koncentrát [kg]	0	61	97	181	272,5
Destilát [kg]	0	0,716	0,99	4,49	7,26

**Tab. 7.4** Experimentální data testu 3

### Test 4

Po ustálení stavu se snížil podtlak z -0,9 bar(g) na -0,75 bar(g). V průběhu testování (tab. 7.5), které trvalo necelých dvacet minut, se dále tlak neměnil. Změna tlaku byl jediný problém tohoto testu, který i přes tento nedostatek pracoval s účinností 3,35 % a produkoval destilát o kvalitě 4  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Test 4								
Čas [h:m:s]	0:00:00	0:00:50	0:02:16	0:04:35	0:06:14	0:09:05	0:13:22	0:16:31
Koncentrát [kg]	0	31,8	86,2	174	236,3	343,1	506,7	625,9
Destilát [kg]	0	0,984	2,91	6,173	8,4	12,065	17,679	21,722

**Tab. 7.5** Experimentální data testu 4

## Test 5

Problém tohoto testu (tab. 7.6) byl v zavzdušnění čerpadla ihned po začátku testování. Po chvíli úprav, kdy bylo čerpadlo destilátu stále otevřeno, se čerpadlo koncentrátu samo odvzdušnilo a začalo pracovat správně. V tu chvíli již byla známa některá data, která se následně porovnávala s daty, kdy čerpadlo běželo správně. Překvapující bylo zjištění, že i přes problémy se zavzdušněním, první část testu vykazovala stejnou účinnost jako část druhá, kdy již čerpadlo pracovalo správně. Účinnost v obou případech byla 3,84 %, což je zároveň i nejvyšší dosažená účinnost ze všech testů. Podtlak se po spuštění testu snížil z původních -0,8 bar(g) na -0,76 bar(g) a dále se neměnil. Tato změna je ovšem malá a tudíž test nijak významně neovlivnila. Dosažená kvalita destilátu byla 27  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Test 5				
Čas [h:m:s]	0:00:00	0:02:20	0:04:48	0:06:30
Koncentrát [kg]	0	44,5	90,8	121,7
Destilát [kg]	0	1,991	3,674	4,867

**Tab. 7.6** Experimentální data testu 5

## Test 6

Tento test (tab. 7.7) se dá považovat za bezproblémový, jelikož zde neproběhla žádná komplikace. Pouze se změnila hodnota tlaku z -0,8 bar(g) na -0,75 bar(g), což je stejně jako u testu č. 5 nepatrná změna, která na výsledek nemá podstatný vliv. Test běžel za konstantních podmínek 15 minut a ukončen byl po vyčerpání roztoku z fermentoru. Výsledkem je kvalitní destilát o vodivosti 6-7  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a účinnost 3,38 %.

Test 6							
Čas [h:m:s]	0:00:00	0:01:31	0:03:49	0:05:45	0:10:19	0:11:45	0:15:27
Koncentrát [kg]	0	56,7	144,1	218,2	391,2	445,4	575,8
Destilát [kg]	0	1,945	5,001	7,506	13,355	15,234	20,134

**Tab. 7.7** Experimentální data testu 6

## Test 7

Stejně jako u testu č. 6, i tento test (tab. 7.8) se dá považovat za bezproblémový. Nicméně vykazuje účinnost nejnižší ze všech testů. Podtlak se ustálil na nižší hodnotě -0,85 bar(g) oproti původnímu -0,9 bar(g). Tato změna taktéž nemá podstatný vliv na výsledek. Po 17 minutách měření bylo dosaženo účinnosti pouze 1,38 % a produkce destilátu o vodivosti 8-12  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Test 7								
Čas [h:m:s]	0:00:00	0:00:41	0:02:45	0:04:19	0:07:11	0:11:09	0:15:44	0:17:12
Koncentrát [kg]	0	26,4	107,3	169,3	282,1	438,2	615,8	672,7
Destilát [kg]	0	0,474	1,632	2,482	4,06	6,155	8,646	9,422

**Tab. 7.8** *Experimentální data testu 7*

## Test 8

Tento test (tab. 7.9) s sebou nesl některé problémy. Jednalo se o problém s podtlakem, čerpadlem i destilátem. Nejdříve se překvapivě změnila hodnota tlaku z -0,8 bar(g), na vyšších -0,86 bar(g). Následně došlo k zavzdušnění čerpadla, kdy nepomohla žádná regulace, a test musel být zastaven. Po novém začátku testování již čerpadlo fungovalo správně, ale podtlak opět stoupl na -0,86 bar(g) a držel si konstantní hodnotu. Výsledkem tohoto testu byl destilát o nižší kvalitě 72-180  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Zároveň se jednalo o skoro nejhorší účinnost 1,39 %.

Test 8						
Čas [h:m:s]	0:00:00	0:01:05	0:02:48	0:04:12	0:06:07	0:07:36
Koncentrát [kg]	0	41	104,9	158,8	229,6	284,8
Destilát [kg]	0	0,59	1,459	2,25	3,232	4,007

**Tab. 7.9** *Experimentální data testu 8*

## 7.5 Analýza výsledků

Po ukončení testování a výpočtu jednotlivých účinností se jejich hodnoty zapsaly do plánu experimentu (tab. 7.10). Takto kompletní experiment může být programem Minitab vyhodnocen.

C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
Pův. pořadí	Výsl. pořadí	Centr. bod	Blok	Vstup. teplota	Chlad. voda	Podtlak	Průtok slané vody	Salinita	Destilát
7	1	1	1	60	1	0,9	20	5000	3,70
6	2	1	1	85	-1	0,9	20	16000	3,65
3	3	1	1	60	1	0,8	20	16000	2,60
8	4	1	1	85	1	0,9	40	16000	3,35
2	5	1	1	85	-1	0,8	20	5000	3,84
4	6	1	1	85	1	0,8	40	5000	3,38
5	7	1	1	60	-1	0,9	40	5000	1,38
1	8	1	1	60	-1	0,8	40	16000	1,39

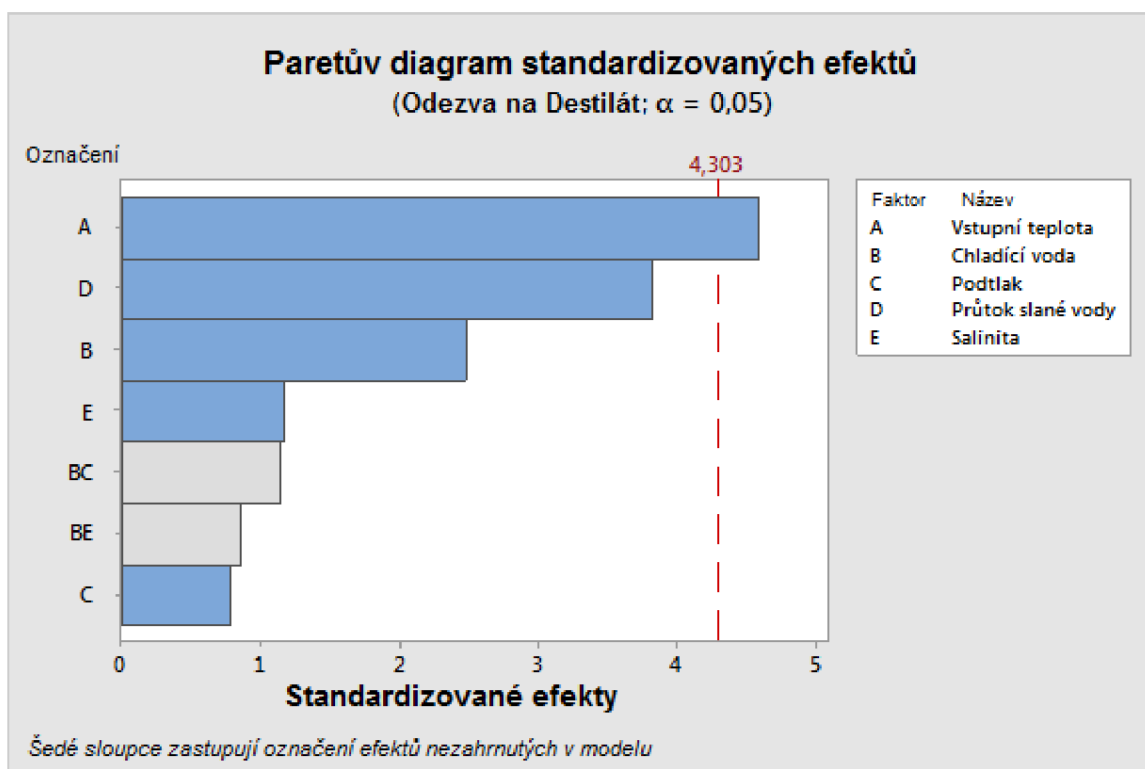
**Tab. 7.10** *Plán experimentu s výslednou účinností*

Prvním krokem analýzy experimentu navrženým na zjištění klíčových faktorů je určení jejich významnosti. To lze sledovat na obr. 7.1, který znázorňuje Paretův diagram. Svislá, červená přímka znázorňuje kritickou hodnotu významnosti pro riziko  $\alpha = 0,05$ . Pokud tuto přímku přesahuje modrý pruh některého z faktorů, jedná se o významný faktor. Jediný významný faktor tohoto experimentu je teplota nástřiku.

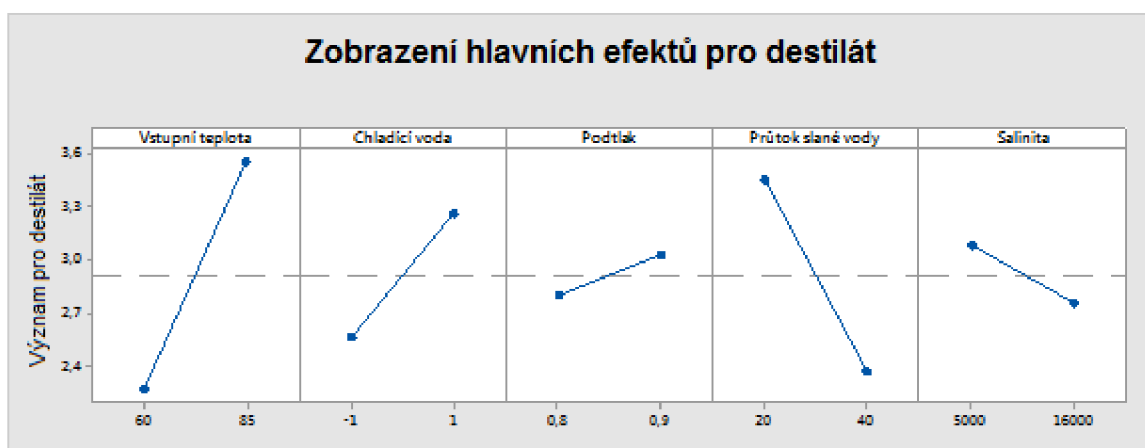
Ostatní faktory jsou statisticky nevýznamné. To ovšem neznamená, že nemohou ovlivnit výsledek experimentování. Na obr. 7.2 lze vidět jednotlivé efekty faktorů. Dále do procesu mohou zasahovat interakce jednotlivých faktorů (viz obr. 7.3).

Je patrné, že dalším významnějším faktorem je průtok slané vody. Tento efekt má ovšem přímku klesajícího charakteru, to znamená, že při zvyšujícím se průtoku klesá účinnost. V publikacích se obecně uvádí, že vyšší průtok slané vody znamená zvýšení účinnosti. Je to dáno nejspíše možností lepší regulace průtoku. U stávajících zařízení se nastaví průtok chladicí vody podle průtoku slané vody tak, aby docházelo k dobré kondenzaci a páry neodcházely skrz ejektory pryč z procesu. U zkoumaného experimentálního zařízení MSF lze nastavit pouze dva průtoky v závislosti na použité chladicí vodě. Při horní hranici průtoku slané vody o hodnotě 40 l/min tedy není dostatečný průtok chladicí vody v maximální hodnotě 12,3 l/min a páry nestíhají kondenzovat, hromadí se nad odpařovací hladinou a způsobují nižší stupeň odpaření. Zároveň část par odchází pryč skrz ejektory. Další možností tohoto jevu může být velikost zařízení z důvodu velikosti odpařovací hladiny. Velikost zařízení a jednotlivých komor se dimenzuje podle požadované produkce destilátu a s tím spojeným průtokem slané vody. Proto je možné, že průtok 40 l/min je pro navrženou experimentální jednotku MSF příliš velký a jednotka je tak vůči tomuto průtoku poddimenzovaná.

Jako překvapivě nejméně významný faktor se jeví tlak resp. podtlak. Pravděpodobně je tak z důvodu nemožnosti jakkoliv účinně regulovat hodnotu podtlaku. Ventil na připouštění vzduchu je vhodný pouze v případě, že je podtlak moc velký oproti požadovanému. V opačném případě, kdy je hodnota podtlaku nižší, než je požadováno, nelze dělat nic. Zařízení si tak podtlak seřídí samo na ustálenou hodnotu.

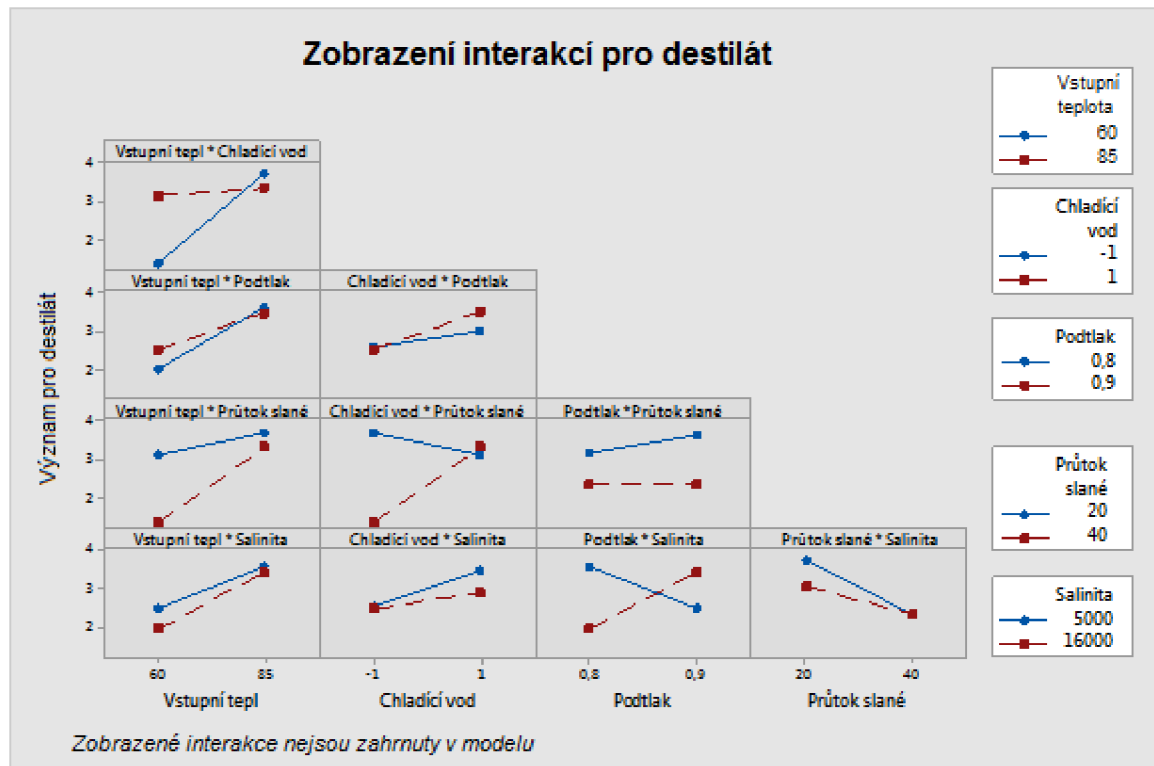


Obr. 7.1 Paretův diagram



Obr. 7.2 Hlavní efekty jednotlivých faktorů

Jak je patrné z obr. 7.3, jednotlivé faktory na sebe vzájemně působí. Toto vzájemné působení ovšem neumíme v modelu numericky vyjádřit a tak do výsledného modelu vzájemné interakce nezasahují (viz věta: „Zobrazené interakce nejsou zahrnuty v modelu“). Tyto interakce jsou ovšem malé, a tak nijak významně neovlivňují proces.



Obr. 7.3 Interakce mezi faktory

Dalším cílem v analýze experimentu je vytvořit matematický model (rov. 7-1) zkoumaného procesu o zadaných faktorech. Program Minitab 17 vypočítá konstanty jednotlivých faktorů, kterými se bude následně násobit hodnota jednotlivých faktorů v zadaných mezích. Jedná se o následující rovnici modelu:

$$\eta = -0,75 + 0,0515 \cdot A + 0,346 \cdot B + 2,18 \cdot C - 0,0536 \cdot D - 0,00003 \cdot E \quad \text{rov. (7-1)}$$

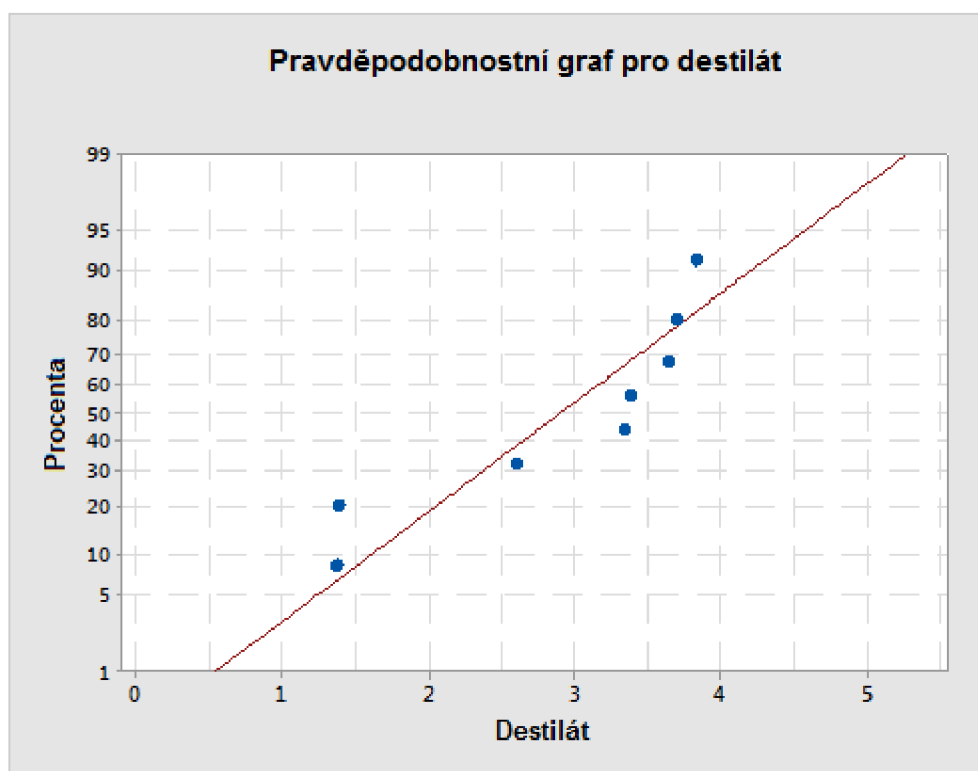
- kde  $\eta$  – účinnost [%]  
 A – teplota nástřiku (TBT) [°C],  
 B – typ chladicí vody (CW) [-],  
 C – podtlak [bar(g)],  
 D – průtok slané vody [l/min],  
 E – salinita [ $\mu\text{S/cm}$ ].



Jak je výsledný model přesný lze vidět v následující tab. 7.11. Absolutní chyby jednotlivých účinností jsou řádově setiny až desetiny procent, což je dobrý výsledek s ohledem na vzniklé problémy při měření. Relativní chyby jsou řádově v jednotkách až desítkách. Přesnost modelu lze považovat za přijatelnou. Pro lepší přehlednost byl průběh naměřených i vypočítaných hodnot účinnosti zaznamenán do grafu 7.2. Červená příčka představuje model a modře zbarvené body charakterizují reálné hodnoty naměřené během experimentu.

Test	Naměřená [%]	Vypočítaná [%]	Absolutní chyba [%]	Relativní chyba [%]
1	3,70	3,43	0,27	7,41
2	3,65	3,69	0,04	1,14
3	2,60	2,88	0,28	10,69
4	3,35	3,31	0,04	1,15
5	3,84	3,80	0,04	0,95
6	3,38	3,42	0,04	1,29
7	1,38	1,66	0,28	20,43
8	1,39	1,11	0,28	19,86

Tab. 7.11 Přesnost modelu



Graf 7.2 Přesnost modelu

## 7.6 Zhodnocení a návrh optimálních provozních podmínek

Na základě rovnice modelu a rozsahu hodnot vybraných faktorů byly navrženy provozní podmínky (tab. 7.12), při kterých zařízení pracuje s nejvyšší účinností. K této části patří i výpočtový program vytvořený v programu MS Excel s názvem ModelMSF.xlsx, který je přílohou této práce. Program vypočítá účinnost na základě zadaných vstupních parametrů.

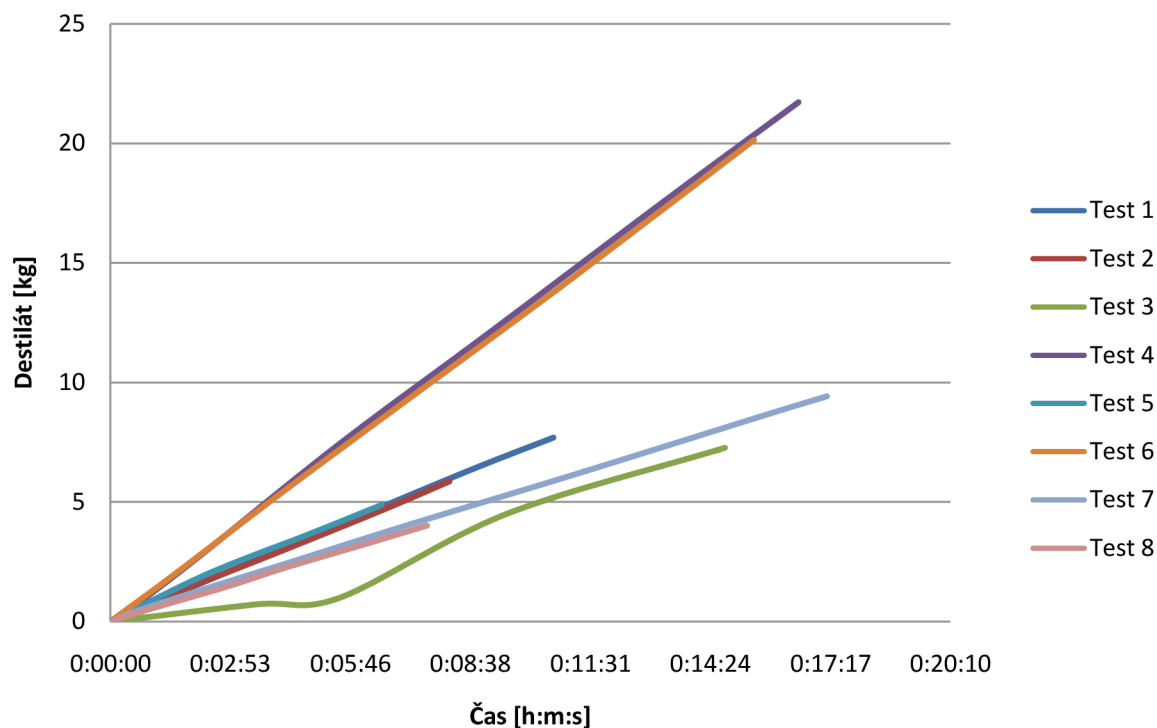
Faktor	Hodnota	Jednotka
Vstupní teplota TBT	85	°C
Chladicí voda	1	-
Tlak	-0,9	bar
Průtok slané vody	20	l/min
Salinita	5000	μS/cm
Účinnost	4,71	%

**Tab. 7.12** Optimální provozní podmínky

Teplota vstupní vody, jakožto nejvýznamnější faktor je nastaven na nejvyšší hodnotu 85 °C a průtok slané vody na nejnižších 20 l/min. Tyto faktory měly při regulaci největší podíl na změně účinnosti. Teoreticky lze konstatovat, že pokud při podtlaku -0,9 bar(g) zvýšíme vstupní teplotu na teplotu blízkou bodu varu a průtok slané vody snížíme alespoň na hodnotu průtoku chladicí vody, můžeme očekávat účinnost přesahující 5 %, což je u tohoto zařízení očekávané maximum. Pro chladicí vodu byl zvolen vodovodní řád, který oproti vodě z bečky disponuje více než o 10 °C chladnější vodou, která je pro kondenzaci par příznivější. Tlak byl zvolen na nejnižší možný, -0,9 bar(g). Tato hodnota je pro odpaření vhodná již z teoretických předpokladů Antoineovy rovnice, které byly potvrzeny experimentem. Salinita koriguje hustotu roztoku, a tudíž je lepší počítat s nižší hodnotou (5000 μS/cm), kterou dokazuje i výpočet pomocí modelu.

Při zadání vstupní teploty 95 °C a průtoku slané vody 10 l/min model počítá s účinností 5,77 %, což je rozdíl vyšší než 1 %. Model je ovšem nastaven programem Minitab na spolehlivý výpočet jen v rozsahu hodnot vybraných pro experiment. Nemůžeme tedy tuto hodnotu brát za spolehlivou.

Při nižším průtoku slané vody má zařízení vyšší účinnost, pokud ale budeme brát v úvahu dlouhodobou produkci destilátu, je vhodnější vyšší průtok. Ten způsobuje horší kondenzaci par, ale díky většímu množství vody se jí více odpaří a také zkondenzuje. Dokazuje to následující graf 7.3.



**Graf 7.3** *Produkce destilátu v čase*

Uvedený graf vychází z provedeného experimentu, kdy testy 1, 2, 3 a 5 pracovaly při průtoku 20 l/min a testy 4, 6, 7 a 8 při průtoku 40 l/min. Lze vidět, že test 1, 2, 5 a především 3 produkují viditelně méně destilátu (i více než dvojnásobně) než například test 4 a 6. Dále testy 7 a 8 byly prováděny za celkově horších podmínek (chladicí voda z bečky a vstupní teplota roztoku 60 °C), z toho důvodu je výsledná produkce dlouhodobě mizivá i přes vysoký průtok slané vody. Pokud bude ovšem provozovatel chtít vyšší produkci, tyto faktory nastaví na příznivější hodnoty.

## 8 ZÁVĚR

Tato diplomová práce je zaměřena na experimentální činnost v oblasti zvyšování účinnosti vakuového odpařování na experimentální jednotce pracující na principu vícestupňové mžikové destilace. Jedním z cílů bylo navrhnout experiment pro vybrané faktory a na základě výsledného matematického modelu navrhnout optimální provozní podmínky zařízení. V teoretické části byl blíže vysvětlen proces vypařování kapalin, destilace a byly uvedeny veškeré faktory, mající vliv na změnu účinnosti. Na základě teoretických poznatků a praktických zkušeností se zkoumanou jednotkou byly vybrány všechny důležité faktory ovlivňující nejen vypařování jako takové, ale i vypařování přímo v technologii MSF. Původní myšlenka směřovala k vybrání pouze dvou faktorů, pro které se navrhne experiment. Po úvaze, kdy by bylo neefektivní vybrat pouze dva faktory, když i další mohou ovlivnit výsledek, bylo vybráno faktorů pět. Jednalo se o vstupní teplotu roztoku a jeho průtok, volbu chladicí vody, podtlak v komorách a salinitu roztoku. Pro tyto faktory vycházel celkový experiment na 32 měření, ale díky plánovanému experimentu lze tento počet redukovat na pouhých osm měření.

Po provedení experimentu byl potvrzen pouze jeden faktor, který má významný vliv na účinnost. Jedná se o vstupní teplotu roztoku. Dalším, ale méně významným faktorem je průtok roztoku vstupující do zařízení. Tento faktor má ovšem na účinnost opačný vliv, než bylo očekáváno. Obecně se uvádí, že zvýšením průtoku dosáhneme vyšší produkce destilátu. Pro navržené zařízení toto tvrzení neplatí. Důvodů může být několik. V práci bylo diskutováno o poddimenzování jednotky či příliš vysokému průtoku oproti průtoku chladicí vody a tím sníženému teplotnímu gradientu, který je důležitý pro kondenzaci par. Tím se dostáváme k určitým omezením navržené technologie. Pokud čerpadlo pohánějící vstupující roztok dosahuje průtoku 40 l/min, mělo by i čerpadlo chladicí vody moci dosáhnout takového průtoku. Použité čerpadlo ovšem dosahuje pouze průtoku 12,3 l/min, což je nedostačující. Za další problém lze považovat volbu chladicí vody. Díky použitému čerpadlu není možnost regulovat průtok v dostatečném rozdílu mezi maximálním a minimálním. Pro další experimentování by bylo vhodné použít výkonnější čerpadlo a zařadit do faktorů teplotu a průtok chladicí vody, namísto pouhé volby použité chladicí vody. Po těchto úpravách a vhodném nastavení lze konstatovat, že by zařízení dokázalo bez jakýchkoliv problémů pracovat s účinností přesahující 5 %.

Přes určité nedostatky lze výsledky experimentu považovat za přijatelné a vhodné k využití pro další výzkum v této oblasti. Jedná se o destilaci odpadní vody za účelem produkce sladké a čisté vody. To ale již není tématem této práce.

## 9 BIBLIOGRAFIE

- [1] UN Water. *Water for Life Decade* [online]. 2015. [cit. 6. 5. 2015]. Dostupné z: <[http://www.un.org/waterforlifedecade/water\\_and\\_sustainable\\_development.shtml](http://www.un.org/waterforlifedecade/water_and_sustainable_development.shtml)>.
- [2] UN Water. *Water is health* [online]. 2015. [cit. 6. 5. 2015]. World water day 2015. Dostupné z: <<http://www.unwater.org/worldwaterday/home/en/>>.
- [3] EDUTORIUM. *Vypařování a kondenzace* [online]. [cit. 18. 4. 2015]. Dostupné z: <[http://techmania.cz/edutorium/art\\_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=536b7570656e737476edh&key=610](http://techmania.cz/edutorium/art_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=536b7570656e737476edh&key=610)>.
- [4] BÉBAR, L. *Clausius-Clapeyron*. Brno. 2013, 74 stran. Prezentace z předmětu: Systémové inženýrství I. [cit. 18. 4. 2015].
- [5] Gymnázium Křenová. *Skupenské změny látek* [online]. Učební texty. [cit. 18. 4. 2015]. Dostupné z: <[http://www.gymkren.cz/text\\_old/Fyzika/f13.pdf](http://www.gymkren.cz/text_old/Fyzika/f13.pdf)>.
- [6] Učebnice Chemie. *Destilace* [online]. [cit. 8. 2. 2015]. Dostupné z: <<http://www.zschemie.euweb.cz/smesi/smesi16.html>>.
- [7] CÍDLOVÁ, H. *Destilace* [online]. Brno. Učební text. [cit. 19. 4. 2015]. Dostupné z: <[http://www.ped.muni.cz/wchem/sm/hc/labtech-old/soubory/operace/separacni\\_metody/destilace.pdf](http://www.ped.muni.cz/wchem/sm/hc/labtech-old/soubory/operace/separacni_metody/destilace.pdf)>.
- [8] Vyšší odborná škola zdravotnická a Střední zdravotnická škola. *Destilace* [online]. Hradec Králové. Učební text. [cit. 19. 4. 2015]. Dostupné z: <<http://lat.zshk.cz/vyuka/destilace.aspx>>.
- [9] MALIJEVSKÁ, I., MALIJEVSKÝ, A., NOVÁK, J. *Záhady, klíče, zajímavosti – Očima fyzikální chemie*. 1. vyd. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha 2004. ISBN 80-7080-535-8.
- [10] Saury D., Harmand S., Siroux M., 2002. Experimental study of flash evaporation of a water film. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 45, 3447–3457, DOI: 10.1016/S0017-9310(02)00056-X.

- 
- [11] H. El-Badry, "Development of Solar Ponds Optimization Model: Arab Potash Solar System—A Case Study," *Natural Resources*, Vol. 4 No. 1, 2013, pp. 82-91. DOI: 10.4236/nr.2013.41010.
- [12] JÍCHA, J. *Difuze*. Brno. 2014, 19 stran. Presentace z předmětu: Difuzní pochody. [cit. 18. 4. 2015].
- [13] Mirza Shan. *Simplified method of calculating evaporation from swimming pools* [online]. 2011. [cit. 30. 11. 2014]. Dostupné z: <<http://hpac.com/humidity-control/simplified-method-calculating-evaporation-swimming-pools>>
- [14] BUROS, O. K. *The ABC's of Desalting*. Topsfield (Massachusets, USA), 1990.
- [15] Acqua Innovations Inc. *Water facts* [online]. 2014. [cit. 7. 2. 2015]. Dostupné z: <<http://www.acquainnovations.com/water-facts/>>.
- [16] Tun Marvni's World. *Another Inconvenient Truth* [online]. 2010. [cit. 19. 4. 2015]. Dostupné z: <<http://tunmarvinworld.blogspot.cz/2010/03/another-inconvenient-truth.html>>.
- [17] 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..
- [18] CK-12. *Seawater Chemistry* [online]. [cit. 25. 3. 2015], Dostupné z: <<http://www.ck12.org/book/CK-12-Earth-Science-Concepts-For-High-School/section/8.11/>>.
- [19] Thinking Buildings Universe. *Brakická voda* [online]. [cit. 25. 3. 2015], Dostupné z: <[http://cbs.grundfos.com/GCZ\\_Czech\\_Republic/lexica/WW\\_Brackish\\_water.html#-](http://cbs.grundfos.com/GCZ_Czech_Republic/lexica/WW_Brackish_water.html#-)>.
- [20] GWI. *What technologies are used?* [online]. [cit. 25. 3. 2015], Dostupné z: <<http://www.desalination.com/market/technologies>>.
-

- 
- [21] NAZELENO.CZ. *Odsolování vody: Destilace, vymrazování, komprese a další* [online]. 2010. [cit. 14. 3. 2015], Dostupné z: <<http://www.nazeleno.cz/technologie-1/odsolovani-vody-destilace-vymrazovani-komprese-a-dalsi.aspx>>.
- [22] PBS POWER EQUIPMENT, s.r.o. *Multi-stage flash (MSF) fresh water generator* [online]. [cit. 14. 3. 2015], Dostupné z: <[www.pbspe.cz/eng/getfile.php?FileID=1436](http://www.pbspe.cz/eng/getfile.php?FileID=1436)>.
- [23] SIDEM VEOLIA. *Desalination by distillation* [online]. [cit. 14. 3. 2015], Dostupné z: <<http://www.sidem-desalination.com/en/Process>>.
- [24] Mohamed A. Eltawil, Zao Zhengming, Ligiang Yuan. *Renewable energy powered desalination systems: Technologies and economics - State of Art*. Twelfth International Water Technology Conference, IWTC12 2008 Alexandria, Egypt.
- [25] PURETEC. *What is reverse osmosis?* [online]. [cit. 14. 3. 2015], Dostupné z: <<http://puretecwater.com/what-is-reverse-osmosis.html>>.
- [26] MEGA. *Membránové procesy – elektrodialýza (ED)* [online]. [cit. 25. 3. 2015], Dostupné z: <<http://www.mega.cz/elektrodialyza.html>>.
- [27] IMKO. *Determinaton of Soil Conductivity and Salt Content* [online]. [cit. 25. 4. 2015]. Dostupné z: <<http://www.imko.de/download/Manual/TRIME%20PICO%2032/EC-TRIME%20Measurement%20with%20PICO%20Probes.pdf>>.
- [28] BOBÁK, P. *Snižování energetické náročnosti procesu profesní údržby prádla*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 95 s. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.
- [29] MICHÁLEK, J. *Navrhování a vyhodnocování experimentů (DOE)* [online]. Učební texty k semináři. 2010. [cit. 8. 11. 2014]. Dostupné z: <[www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura\\_05\\_1012\\_2.pdf](http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_05_1012_2.pdf)>.
- [30] TOŠENOVSKÝ, J. *Plánování experimentů* [online]. Vysoká škola Báňská – Technická univerzita Ostrava. Učební text. 2012. [cit. 8. 11. 2014]. Dostupné z: <<http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/DOE/Planovani%20experimentu.pdf>>.
-

- 
- [31] MONTGOMERY, Douglas C. *Design and analysis of experiments*. 5th ed. New York: Wiley, 2001, xii, 684 s. ISBN 04-713-1649-0.
- [32] GUTOVSKÝ, J. *Experimentální měření v oblasti průmyslového sušení textilu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 60 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Vítězslav Máša, Ph.D..
- [33] Khawla Al-Shayji. *Modeling, simulation, and optimization of large-scale commercial desalination plants*. Blacksburg: Faculty of the Virginia Polytechnic Institute, Chemical engineering, 1998. 453 s. Dissertation thesis.



## 10 SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

Obr. 2.1	<i>Fázový diagram vody</i> [5]	14
Obr. 2.2	<i>Princip jednoduché destilace</i> [6]	15
Obr. 2.3	<i>Vypařování kapaliny o různých teplotách a různém tlaku</i> [10]	17
Obr. 2.4	<i>Závislost množství vypařené kapaliny na hustotě</i> [11]	18
Obr. 3.1	<i>Dostupnost sladké vody na Zemi</i> [15]	21
Obr. 3.2	<i>Historická a predikovaná data pro Indii</i> [16]	22
Obr. 3.3	<i>Rozpuštěné soli v mořské vodě</i> [18]	23
Obr. 4.1	<i>Princip odsolovací jednotky</i> [14]	25
Obr. 4.2	<i>Využití odsolovacích metod ve světě</i> [20]	26
Obr. 4.3	<i>Solární destilace</i> [21]	27
Obr. 4.4	<i>MSF zapojení bez využití kondenzačního tepla</i> [22]	28
Obr. 4.5	<i>MSF zapojení s využitím kondenzačního tepla a recirkulací koncentráту</i> [17]	28
Obr. 4.6	<i>MSF zapojení s využitím kondenzačního tepla bez recirkulace koncentráту</i> [17]	29
Obr. 4.7	<i>Schéma ME</i> [23]	29
Obr. 4.8	<i>Kompresce páry</i> [21]	30
Obr. 4.9	<i>Reverzní osmóza</i> [25]	31
Obr. 4.10	<i>Princip elektrodialýzy</i> [17]	32
Obr. 5.1	<i>Sestavené experimentální zařízení MSF</i>	33
Obr. 5.2	<i>Schéma MSF</i>	34
Obr. 5.3	<i>Bimetalické (vlevo) a odporové teploměry (vpravo)</i>	36
Obr. 5.4	<i>Snímače tlaku (na bocích) a manometry (uprostřed)</i>	37
Obr. 5.5	<i>Indukční průtokoměr (vlevo) a vodoměr (vpravo)</i>	38
Obr. 5.6	<i>Konduktometr</i>	38
Obr. 5.7	<i>Váha na koncentrát (vlevo) a destilát (vpravo)</i>	39
Obr. 5.8	<i>Měřicí ústředna Delphin Technology</i> [28]	39
Obr. 7.1	<i>Paretův diagram</i>	55
Obr. 7.2	<i>Hlavní efekty jednotlivých faktorů</i>	55
Obr. 7.3	<i>Interakce mezi faktory</i>	56
Tab. 3.1	<i>Dělení vod</i> [19]	22
Tab. 5.1	<i>Použitá čerpadla</i>	35
Tab. 5.2	<i>Význam označení měřidel</i>	35
Tab. 5.3	<i>Seznam měřicí instrumentace</i>	36
Tab. 7.1	<i>Plán experimentu</i>	48

---

Tab. 7.2 <i>Experimentální data testu 1</i> .....	50
Tab. 7.3 <i>Experimentální data testu 2</i> .....	50
Tab. 7.4 <i>Experimentální data testu 3</i> .....	51
Tab. 7.5 <i>Experimentální data testu 4</i> .....	51
Tab. 7.6 <i>Experimentální data testu 5</i> .....	52
Tab. 7.7 <i>Experimentální data testu 6</i> .....	52
Tab. 7.8 <i>Experimentální data testu 7</i> .....	53
Tab. 7.9 <i>Experimentální data testu 8</i> .....	53
Tab. 7.10 <i>Plán experimentu s výslednou účinností</i> .....	54
Tab. 7.11 <i>Přesnost modelu</i> .....	57
Tab. 7.12 <i>Optimální provozní podmínky</i> .....	58

## 11 PŘÍLOHY

1. CD-ROM s elektronickou verzí práce a programem ModelMSF.xlsx na výpočet účinnosti zařízení
2. Schéma zapojení experimentální jednotky MSF

## Příloha č. 2

