

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice PhD Thesis, sv. 743

ISSN 1213-4198

thesis
IS

Ing. Zdeněk Hájek

**Výzkum zařízení
pro úpravu mořské vody
a další aplikace**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO INŽENÝRSTVÍ

Ing. Zdeněk Hájek

**VÝZKUM ZAŘÍZENÍ PRO ÚPRAVU MOŘSKÉ VODY
A DALŠÍ APLIKACE**

RESEARCH OF EQUIPMENT FOR SEA WATER TREATMENT
AND OTHER APPLICATIONS

Zkrácená verze Ph.D. Thesis

Obor: Konstrukční a procesní inženýrství
Školitel: doc. Ing. Zdeněk Jegla, Ph.D.
Oponenti: prof. Dr.-Habil. Ing. Jiří Klemeš, D.Sc., Dr.h.c.
Ing. Miloslav Odstrčil, CSc.
Datum obhajoby: 16. května 2014

Klíčová slova:

Odsolování, mořská voda, čistá voda, odsolená voda, pitná voda, destilace, MSF.

Keywords

Desalination, seawater, freshwater, seawater distillation, drinking water, MSF.

Místo uložení práce:

Vysoké učení technické

Fakulta strojního inženýrství

Ústav procesního a ekologického inženýrství

Technická 2

616 69 Brno

© Zdeněk Hájek, 2014

ISBN 978-80-214-4986-2

ISSN 1213-4198

OBSAH

| | |
|--|----|
| 1 ÚVOD..... | 5 |
| 2 ZAMĚŘENÍ PRÁCE..... | 5 |
| 3 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY | 6 |
| 3.1 Aktuální dostupnost sladké vody ve světě | 6 |
| 3.2 Potenciál odsolování | 6 |
| 3.3 Metody odsolování..... | 6 |
| 3.3.1 Tepelné metody | 8 |
| 3.3.2 Membránové metody..... | 9 |
| 4 HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE | 10 |
| 4.1 Návrhový program jednotek msf v ms excel | 10 |
| 4.2 Výroba experimentálních jednotek | 10 |
| 4.2.1 Experimentální jednotka MSF | 10 |
| 4.2.2 Demonstrační jednotka MSF | 11 |
| 4.2.3 Experimentální jednotka ME | 11 |
| 4.3 Experimentální měření | 12 |
| 4.3.1 Předběžné zkoušky jednotky MSF | 12 |
| 4.3.2 Experimentální měření na jednotce MSF..... | 13 |
| 4.4 Porovnání výsledků měření s výpočty | 14 |
| 4.5 Možnosti využití vyvíjených zařízení | 15 |
| 4.5.1 Odsolovací jednotky..... | 15 |
| 4.5.2 Jednotky pro čištění vody..... | 15 |
| 4.5.3 Zahušťovací jednotky | 16 |
| 4.6 Ekonomické aspekty | 16 |
| 5 ZÁVĚR..... | 17 |
| LITERATURA | 19 |
| CIRRICULUM VITAE | 20 |
| ABSTRAKT | 22 |
| ABSTRACT | 22 |

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 autorovo působení 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.

2 ZAMĚŘENÍ PRÁCE

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.

Cílem dizertační práce je tedy provedení souboru činností souvisejících s 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.

3 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

3.1 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.

3.2 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 [6]. Odsolovací jednotky jsou na trhu v mnoha variantách; jejich nabídka je úzce spojena s poptávkou a kapitálovými možnostmi investorů.

3.3 METODY ODSOLOVÁNÍ

Obecně odsolovací jednotka rozděluje napájecí slanou vodu na dva proudy:

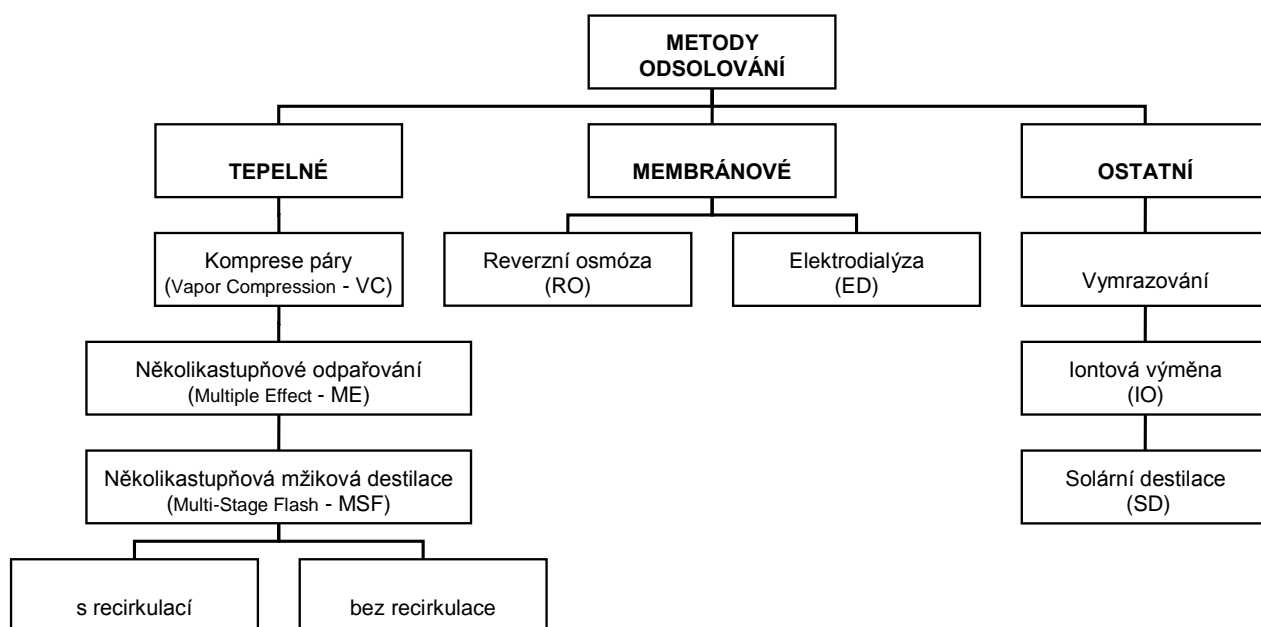
- proud s nižší koncentrací rozpuštěných solí, tj. sladká (čistá) voda
- proud se zbylou vyšší koncentrací rozpuštěných solí, tj. koncentrát.

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

Pro separaci rozpuštěných solí a minerálů z vody se používá řada odlišných technologií. Rozdělení metod odsolování je znázorněno na obr. 1. 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.

Z velkého množství metod odsolování se jich však komerčně ujalo jen několik. Komerčně se využívají hlavně některé metody destilace a reverzní osmóza [8].



Obr. 1 Rozdělení metod odsolování [10]

Každá odsolovací metoda má své výhody i nevýhody, jak vyplývá např. z [11], 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.

3.3.1 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). 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 zvyšuje podtlak a snižuje teplota. Např. při tlaku, který odpovídá čtvrtině atmosférického tlaku, dochází k varu vody při 65 °C a při desetině je to 45 °C. Mořská voda má vyšší bod varu než obyčejná voda. Trendem pro další zvýšení energetické účinnosti je kombinování tepelných metod odsolování o další doplňkové odsolovací procesy. V porovnání s ostatními metodami odsolování, má destilace nejlepší parametry odsolené vody. Typickými představiteli tepelných metod odsolování je metoda MSF a ME.

Vícestupňová mžiková destilace – MSF

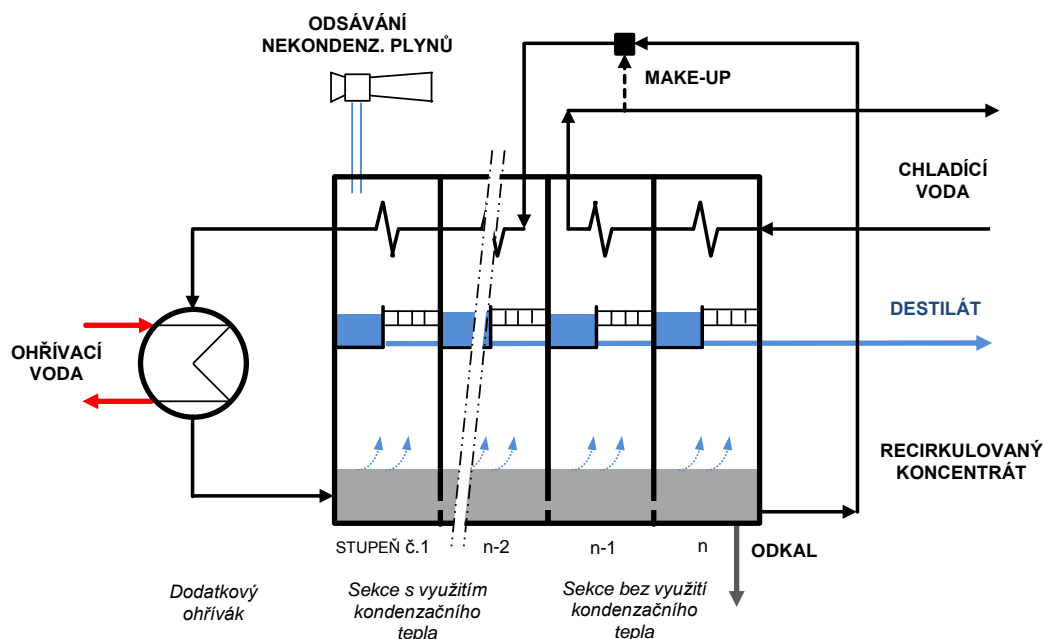
Při destilaci metodou MSF (angl. *Multi-Stage Flash*) jde o proces okamžitého rovnovážného odpaření, tj. o okamžitou rovnovážnou destilaci za sníženého tlaku (tj. podtlaku). V souladu s obecně používaným názvoslovím je pro tuto metodu používán termín „vícestupňová mžiková destilace“.

Při vícestupňové mžikové destilaci se uplatňuje efekt mžikového (tj. okamžitého) rovnovážného odpařování části průtočného objemu ve více stupních. Jednotka pro úpravu mořské vody založená na principu MSF má vždy dva anebo 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. MSF jednotka obsahující 4 stupně a recirkulaci koncentrátu je znázorněna na obr. 2.

Vícestupňové odpařování – ME

Vícestupňové odpařování ME (angl. *Multiple Effect*) 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 .



Obr. 2 Schéma MSF jednotky s recirkulací

3.3.2 Membránové metody

Membránová úprava vody je založena na použití fyzické bariéry – polopropustné membrány a hnací síly. Hnací silou může být tlak a jeho gradient nebo rozdíl elektrického potenciálu. Komerčně nejpoužívanější membránové metody pro úpravu vody jsou elektrodialýza a reverzní osmóza [12]. Obě metody používají membránu a jsou schopné oddělit rozpuštěné minerály a soli z napájecí vody. Rozdíl elektrického potenciálu využívá elektrodialýza a tlakového gradientu reverzní osmóza.

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

Reverzní osmóza

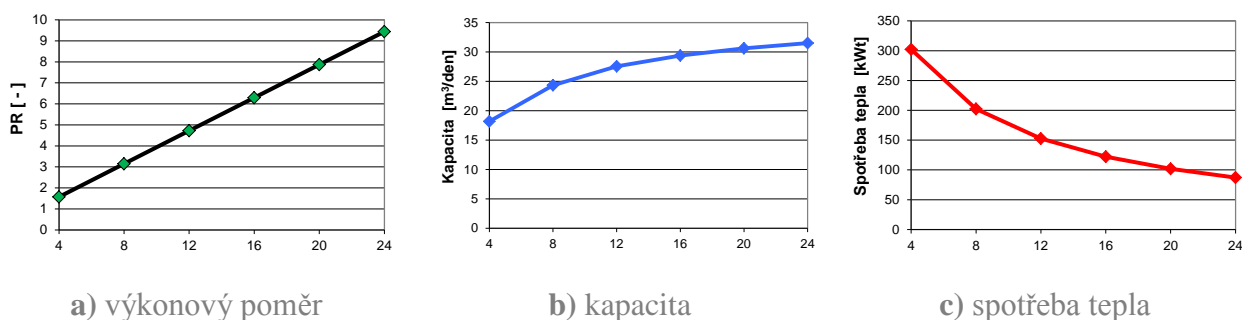
Reverzní osmóza (RO) je nejrozšířenějším membránovým procesem. Uplatnění nachází v 88 % všech aplikací membránových procesů. Hnací silou procesu je hydraulický tlak a k separaci rozpuštěných látek dojde na částečně propustné membráně. Princip je tento: napájecí voda je přivedena vysokotlakým čerpadlem 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.

4 HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE

Práce je zaměřena na výzkum a vývoj modulového zařízení pro úpravu mořské vody, a to primárně metodou MSF a okrajově metodou ME. Výchozí koncepce vývoje MSF jednotky vychází z toho, že každý modul vyvíjené jednotky bude obsahovat 4 stupně. Moduly bude možno skládat za sebe. 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 destilátu.

4.1 NÁVRHOVÝ PROGRAM JEDNOTEK MSF V MS EXCEL

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 soustavu bilančních a přenosových rovnic za účelem výpočtu počtu trubkových svazků a celkové tepelné spotřeby jednotky pro požadované celkové kapacity jednotek. Na obr. 3 je znázorněna závislost vybraných výstupních proměnných na počtu stupňů konkrétní navržené MSF jednotky.



Obr. 3 Závislost výstupních proměnných jednotky na počtu stupňů jednotky

4.2 VÝROBA EXPERIMENTÁLNÍCH JEDNOTEK

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 výzkum a vývoj zařízení MSF s vícestupňovou destilací. Byly také provedeny významné vývojové fáze u destilačního zařízení typu ME.

4.2.1 Experimentální jednotka MSF

V návaznosti na tepelné a konstrukční výpočty byla navržena experimentální jednotka MSF (viz obr. 4), která byla konstruována pro denní produkci destilátu cca 20 m³/den. Její výkon závisí hlavně na teplotě dostupné ohřívací a napájecí vody.

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 experimentální MSF jednotky vyrobeny z jiných (levnějších) materiálů, než jaké bude nutno použít při výrobě zařízení pro trvalý provoz (např. s životností 20 let).



Obr. 4 Experimentální jednotka MSF

4.2.2 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. 5), která byla nainstalována a pracovala na egyptském pobřeží po dobu jednoho roku.

4.2.3 Experimentální jednotka ME

Experimentální jednotka ME (viz obr. 6) byla navržena jako dvoustupňová s plánovanou produkcí sladké vody $35 \text{ m}^3/\text{den}$. Při řešení specifických konstrukčních prvků jednotky i při její výrobě se vycházelo ze zkušeností získaných při výrobě i uvádění do provozu experimentální jednotky MSF.

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).



Obr. 5 Demonstrační jednotka MSF



Obr. 6 Experimentální jednotka ME

4.3 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ

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

Pro potřeby testování a měření vyrobených jednotek MSF i ME byla navržena a sestavena měřicí trať, která byla vybavena potřebnými provozními a měřicími prvky.

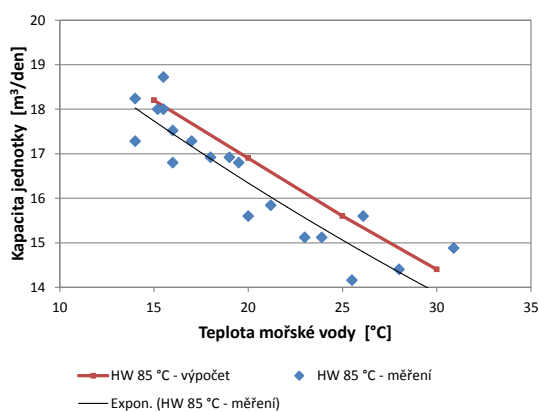
4.3.1 Předběžné zkoušky jednotky MSF

Detailním experimentálním měřením předcházely předběžné zkoušky pro ověření konstrukčního návrhu MSF jednotky a jejich prvků. Ty se řídily plánem předběžných zkoušek, a vyznačovaly se vylučovacím charakterem. Tzn. že v daném konstrukčním uzlu jednotky bylo vyzkoušeno několik variant (úrovní) použitých prvků a následně byl vybrán ten nejvhodnější konstrukční prvek. Po výběru vhodného prvku (faktoru) se pokračovalo v předběžné zkoušce dalšího faktoru atd. Pořadí předběžných měření bylo uspořádáno takovým způsobem tak, aby byly

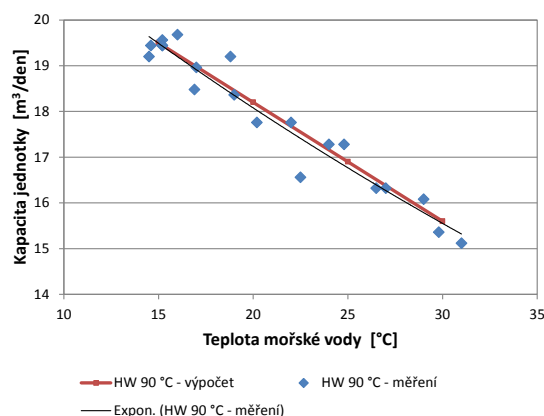
měření co nejvíce časově efektivní. Tudíž každé nové nastavení měření vyžadovalo nejmenší možný počet změn úrovní faktorů vzhledem k předcházejícímu nastavení.

4.3.2 Experimentální měření na jednotce MSF

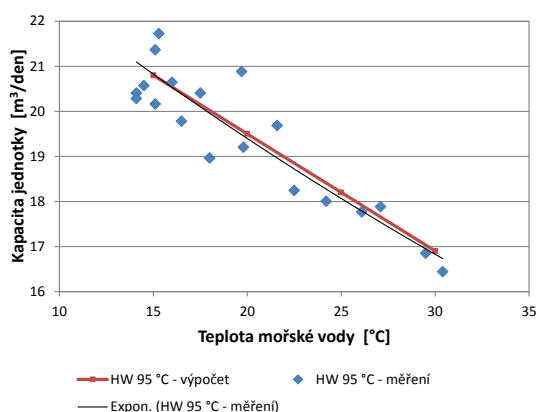
Po proběhlých předběžných zkouškách bylo přistoupeno k detailním experimentálním měřením, které probíhaly dle plánu experimentu. Experimentální měření bylo zaměřeno hlavně na měření odezvy na změnu teploty ohřívací vody. Pro tato měření bylo provedeno osm sad měření. Předmětem dalšího experimentálního měření bylo zjišťování závislosti slanosti destilátu na rychlosti par destilátu přes odlučovač kapek. Vybrané závislosti naměřených dat z experimentálních měření experimentální jednotky MSF jsou graficky znázorněny na obr. 7, obr. 8 a obr. 9. 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.



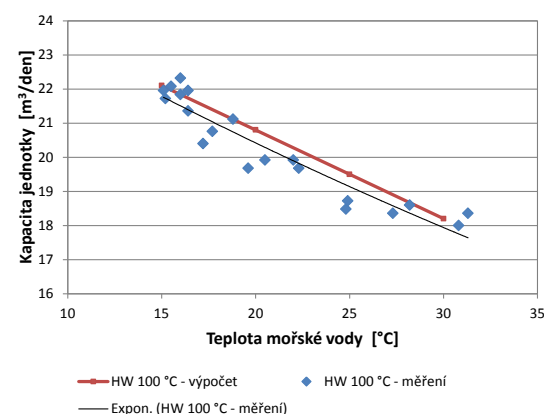
a) při teplotě ohřívací vody 85 °C



b) při teplotě ohřívací vody 90 °C

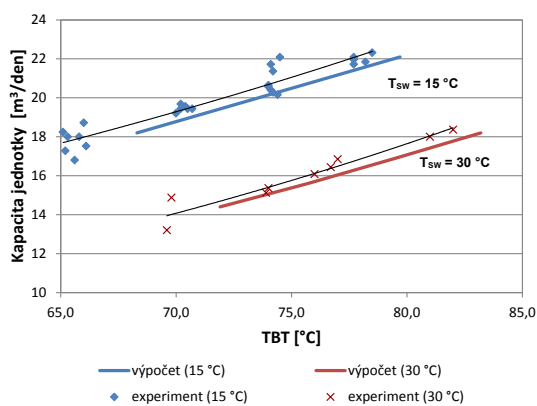


c) při teplotě ohřívací vody 95 °C

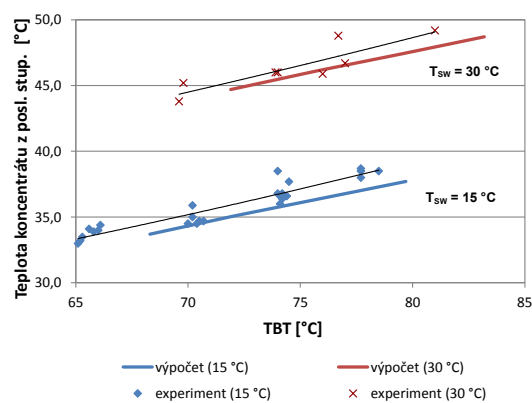


d) při teplotě ohřívací vody 100 °C

Obr. 7 Experimentální měření – závislost kapacity jednotky na teplotě ohřívací vody

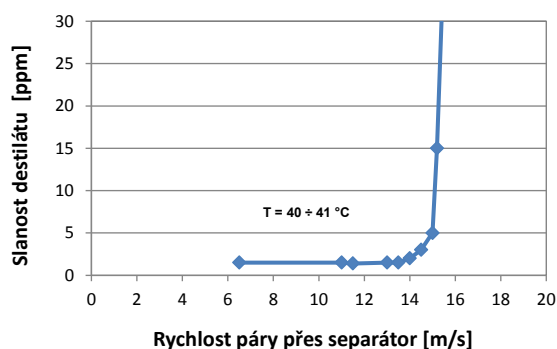


Obr. 8 Závislost kapacity jednotky na teplotě nástřiku



Obr. 9 Závislost teploty koncentráту na teplotě nástřiku

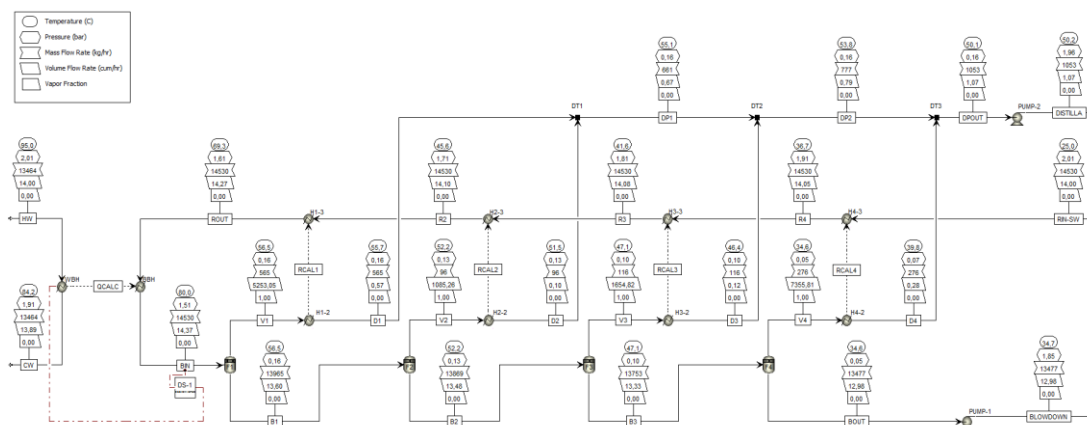
Jedno z experimentálních měření bylo zaměřeno na ověření vlivu rychlosti páry přes odlučovač kapek na výslednou hodnotu slanosti. Při této zkoušce bylo měněno množství par destilátu přes odlučovač kapek a odezvou byla slanost destilátu. Rychlost páry byla ovlivňována změnou teploty nástřiku, popř. změnou jeho průtoku. Z měření je patrné, že limitní rychlostí par destilátu je rychlost kolem 14 až 15 m/s (viz obr. 10). Při rychlostech nad 15 m/s dochází k prudkému zvýšení slanosti produkovaného destilátu.



Obr. 10 Závislost slanosti destilátu na rychlosti páry přes separátor

4.4 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. Z naměřených dat je patrné, že rozdíl mezi nimi a návrhovými daty se pohybuje do 5 %, což lze považovat za uspokojivý výsledek. 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.



Obr. 11 PFD zapojení experimentální MSF jednotky v SW Aspen Plus

4.5 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.

4.5.1 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.

4.5.2 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:

- čištění oplachových vod (strojí průmysl, galvanické pokovování)
- čištění průsakových vod na skládkách odpadu
- čištění mazacích a olejových směsí
- čištění vývojek a ustalovačů ve fotografickém průmyslu

- čištění odmašťovacích, mořících a omílacích vod v oblasti povrchových úprav.

4.5.3 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:

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

4.6 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.

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 [13] respektující všechny ovlivňující faktory je dána:

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

5 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. 12

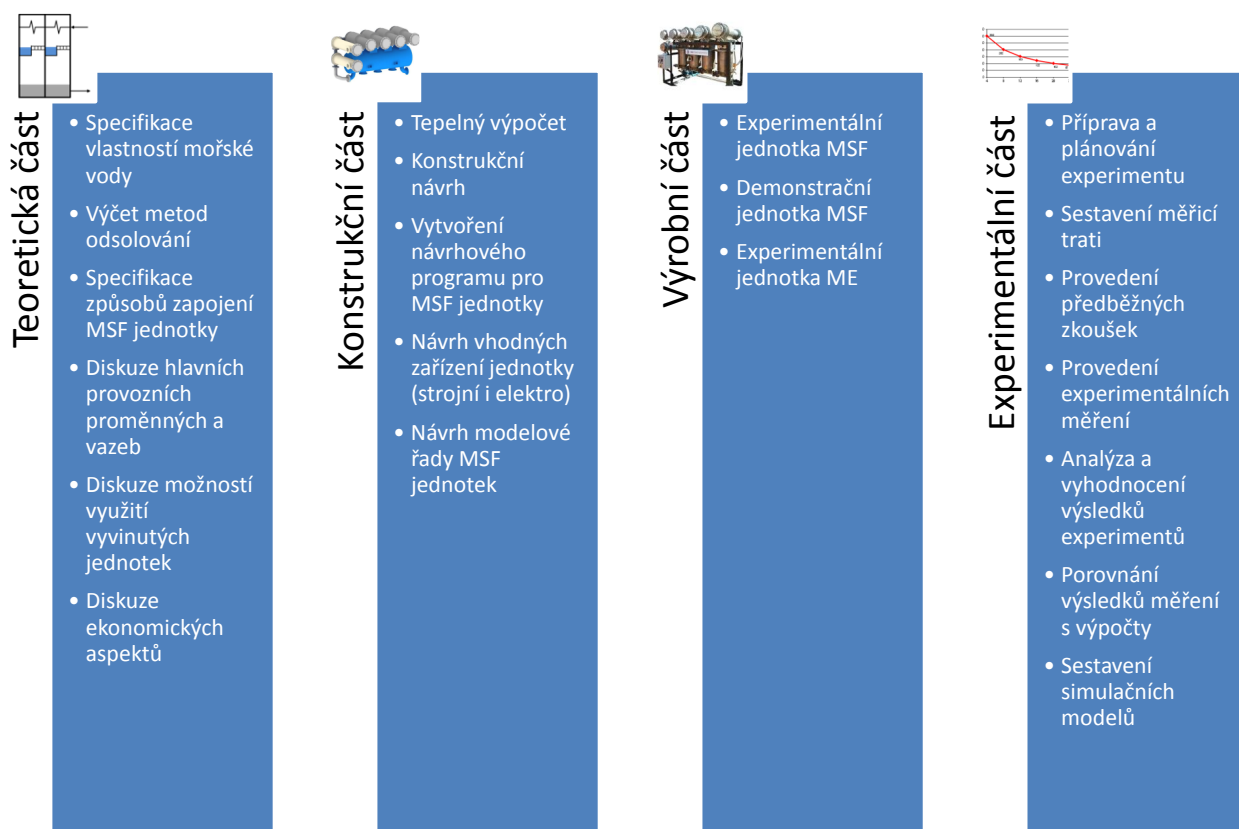
Úvodní část práce seznamuje s vlastnostmi mořské vody a používanými metodami odsolování. V další části práce je proveden návrh jednotky na principu MSF, který se skládá z tepelného a konstrukčního návrhu. Pro zefektivnění fáze návrhu modulových MSF jednotek byl vytvořen návrhový program, který pracuje 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, která probíhala 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. 12 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.

LITERATURA

- [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, vi, 46 s. ESCWA water development report. ISBN 978-92-1-128329-7.
- [6] *Desalination: A National Perspective*. Washington, D.C.: National Academies Press, c2008, xiv, 298 p. ISBN 03-091-1924-3.
- [7] U.S. CONGRESS, Office of Technology Assessment. *Using Desalination Technologies for Water Treatment*. Washington, DC: U.S. Government Printing Office, 1988.
- [8] AMERICAN MEMBRANE TECHNOLOGY ASSOCIATION. *Water Desalination Process*. 2007. Dostupné z: http://www.amtaorg.com/wp-content/uploads/8_WaterDesalinationProcesses.pdf
- [9] QIBLAWEY, Hazim Mohameed a Fawzi BANAT. Solar thermal desalination technologies. *Desalination*. 2008, č. 220, s. 633-644. ISSN 00119164.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] BUROS, O.K. *The ABC's of Desalting*. Topsfield (Massachusetts, USA), 1990.
- [13] 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, 1-3, s. 298-311.

CIRRICULUM VITAE

OSOBNÍ ÚDAJE:

Jméno: Ing. **Zdeněk Hájek**
Datum narození: 18. 1. 1985
Adresa: Josefy Faimonové 9, 628 00 Brno
Mobil: +420 604 858 429
E-mail: zhajek@post.cz

DOSAŽENÉ VZDĚLÁNÍ:

- 2011 – 2014 VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství
doktorské studium – obor Konstrukční a procesní inženýrství
DDP: Výzkum zařízení pro úpravu mořské vody a další aplikace
- 2008 – 2010 VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství
magisterské studium – obor Procesní a ekologické inženýrství
DP: Náhrada fosilních paliv ve velkých energetických zdrojích
- 2005 – 2008 VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství
bakalářské studium – obor Strojní inženýrství
BP: Efektivní použití 3D CAD systémů v procesním inženýrství
- 2001 – 2005 Integrovaná střední škola – centrum odborné přípravy
Brno, Olomoucká 61 (obor Mechanik-elektronik)

PRACOVNÍ ZKUŠENOSTI:

- 11/2013 – dosud DOOSAN ŠKODA POWER s.r.o.
– hlavní inženýr projektu
- 4/2012 – 10/2013 PBS POWER EQUIPMENT, s.r.o.
– vedoucí kanceláře Brno
– obchodní činnost v oblasti dodávek průmysl. kotelen
– návrh, nákup a vedení výstavby průmyslových kotelen
– vývoj v oblasti odsolovacích jednotek
- 7/2010 – 3/2012 PBS INDUSTRY, a.s.
– aplikační inženýr
– vývoj odsolovacích jednotek na principu (MSF, ME)
– vedení projektu mobilních kontejnerových kotelen

PRACOVNÍ ZKUŠENOSTI PŘI STUDIU:

- 5/2009 – 2/2010 EVECO Brno s.r.o.
– konstruktér v programu SolidWorks
– příprava nabídek, poptávek
- 2/2009 – 6/2010 TIRSO a.s.
– člen řešitelského týmu výzkumných projektů
– editor, supervizor zpráv k výzkumným projektům
– tvorba rešerše na téma „Technologie zpracování odpadů“

DALŠÍ VZDĚLÁNÍ A CERTIFIKÁTY:

Vyhláška č.50/1978 Sb. §6, §7 o práci na elektrických zařízeních

DALŠÍ ZNALOSTI:

Jazyky: Anglický jazyk: středně pokročilý
 Německý jazyk: začátečník

Práce na PC: SolidWorks, AutoCad, ChemCad, MS Office, Internet, VBA

Řidičské oprávnění: skupiny A, B, C, E

OSOBNÍ ZÁJMY:

Sport – cyklistika, sjezdové i běžecké lyžování, tenis, stolní tenis, turistika

Kultura – divadlo, koncerty

Studium knih – osobní rozvoj, odborná literatura

PC a internet – odborné články

OSTATNÍ:

Účast na Letní univerzitě JE Dukovany 2009

Soutěže s diplomovou prací:

- místo v soutěži Cena Nadace ČEZ 2010 v kategorii OZE
- 3. místo v soutěži Cena ČEZ 2010

Člen České společnosti chemických inženýrů

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.

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 desalination 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.