

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**DIPLOMOVÁ
PRÁCE**

2018

**PETR
MATOUŠ**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Matouš** Jméno: **Petr** Osobní číslo: **411087**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav energetiky**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Energetika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Akumulace elektrické energie do roztavených solí

Název diplomové práce anglicky:

Utility scale electricity storage into molten salts

Pokyny pro vypracování:

Rostoucí neřízená výroba elektřiny v obnovitelných zdrojích vyžaduje zapojení více skladování do možností přenosové soustavy. Metody skladování jako palivové články, baterie či přečerpávací elektrárny narážejí na ekonomická, technická i legislativní úskalí. Skladování elektřiny do vysokopotenciálního tepla má sice stále relativně nízkou účinnost, nabízejí ale potenciálně levné řešení. Součástí práce bude:

- Rešerše možností skladování tepla na vysokých teplotách, obzvláště v kombinaci s produkcí elektřiny (např. solární tepelné elektrárny)
- Koncepční návrh zařízení pro skladování elektřiny pomocí přeměny na teplo se zpětnou konverzí tepla na elektřinu pomocí tepelných oběhů
- Bilanční model pro zvolený koncept zařízení s analýzou možného ročního využití pro zadaný profil výkonů pro nabíjení a vybíjení
- Závěrečná shrnutí a doporučení

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:


Ing. Václav Novotný, ústav energetiky FS


Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:


Datum zadání diplomové práce: **20.04.2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **04.06.2018**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2019**


Ing. Václav Novotný
podpis vedoucí(ho) práce


podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

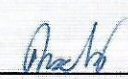

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

- 2 -05- 2018

Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením
vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Praze dne

.....

Jméno a příjmení

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce Ing. Václavovi Novotnému za cenné rady, připomínky a věnovaný čas mé práci.

Anotační list

Jméno autora:	Petr Matouš
Název DP:	Akumulace elektrické energie do roztavených solí
Anglický název:	Utility scale electricity storage into molten salts
Akademický rok:	2017/2018
Ústav/Odbor:	Ústav energetiky
Vedoucí DP:	Ing. Václav Novotný
Konzultant:	
Bibliografické údaje:	Počet stran: 124 Počet obrázků: 43 Počet tabulek: 37 Počet příloh: 0
Klíčová slova:	roztavená sůl, skladovací nádrž, tepelný výměník,
Keyword:	Molten salts, accumulation storage, heat exchanger
Anotace:	Práce se zabývá návrhem skladovacího zařízení pro skladování elektřiny přeměněnou na teplo v roztavených solích. Dále je v práci navrhnut systém výměníků pro přenos tepla ze solné části oběhu do parní. Poslední částí práce je vytvoření bilančních modelů pro jednotlivé varianty doby ukládání a výběr nejvhodnější varianty pro zadané hodnoty nabíjení a vybíjení skladovacích nádrží.
Abstract:	Master thesis deals with the design of a storage device for the electricity storage. In the storage device electric energy is converted to heat energy in molten salts. Furthermore heat exchanger system for heat transfer from the molten salts to the steam is designed. In the last part set of balance equations are described for individual storage time variants and the most suitable variant for the given values of charging and discharging of storage tanks is selected.

Obsah

Seznam obrázků	9
Seznam tabulek	11
Seznam symbolů	12
Seznam indexů	15
Seznam zkratk	17
1. Úvod.....	18
2. Vybrané druhy akumulace a jejich rozdělení:	19
3. Metody skladování tepelné energie TES (Thermal energy storage)	21
3.1. Skladování citelného tepla SHS (Sensible heat storage).....	21
3.1.1. Horniny	21
3.1.2. Soli	21
3.2. Termochemické skladování.....	22
3.3. Latentní ukládání LHS (Latent heat storage)	22
3.3.1. Médium pro změnu fáze PCM (Phase change materials).....	22
3.3.2. Akumulace pomocí kapslí PCM.....	24
4. Technologie pro skladování elektřiny pomocí tepla v roztavených solí	25
4.1. Solární elektrárny se skladováním citelného tepla ve dvou nádržích.....	25
4.1.1. První použití skladování tepelné energie pomocí dvou nádrží.....	25
4.1.2. Porovnání solárních elektráren.....	25
4.1.3. Solární elektrárny s dohříváním	28
4.2. Zařízení v okruhu	28
4.3. Médium pro skladování tepelné energie	30
4.3.1. Způsoby čištění solí.....	30
4.4. Korozní mechanismy použitých materiálů.....	30
5. Bezpečnost a ekonomika	31
5.1. Bezpečnostní aspekty	31
5.2. Účinnost	32
5.3. Náklady	32
6. Experimentální analýza vybíjení a nabíjení	36
7. Koncepční návrh zařízení pro skladování elektrické energie v roztavených solí.....	42
7.1. Okruhy.....	42

7.1.1.	Solný okruh	43
7.1.2.	Parní okruh	43
7.2.	Médium primárního okruhu	43
7.2.1.	Směs 60NaNO ₃ - 40KNO ₃	44
7.2.2.	Směs 45NaNO ₃ -55KNO ₃	44
7.2.3.	Směs 7NaNO ₃ -49 NaNO ₂ -44 KNO ₃	44
7.3.	Výpočtový model	47
8.	Návrh akumulčních nádrží	49
8.1.1.	Akumulované množství soli	51
8.1.2.	Rozměry nádrží	51
8.1.3.	Tepelné ztráty izolovaných nádrží	53
8.1.4.	Doba do zatuhnutí soli ve studené nádrži.....	56
8.1.5.	Nabíjení a vybíjení nádrže.....	56
8.1.6.	Maximální využití při nepřetržitém provozu.....	57
9.	Návrh výměníků tepla	59
9.1.	Množství obíhající soli v primárním okruhu.....	60
9.2.	Návrh PREHEATERU	61
9.2.1.	Návrh vodní strany	61
9.2.2.	Návrh solné strany.....	63
9.2.3.	Počet a velikost segmentů výměníku:	70
9.2.4.	Tlakové ztráty.....	71
9.2.5.	Efektivita výměníku metodou ϵ - NTU	74
9.3.	Návrh EVAPORATORU	76
9.3.1.	Návrh solné strany.....	79
9.3.1.	Návrh vodní/parní strany.....	83
9.3.2.	Počet a velikost segmentů výměníku:	89
9.3.3.	Tlakové ztráty.....	90
9.3.4.	Efektivita výměníku metodou ϵ - NTU	92
9.3.5.	Návrh vodní strany po částech	93
9.4.	Návrh SUPERHEATRU	102
9.4.1.	Návrh parní strany	102
9.4.2.	Návrh solné strany.....	104

9.4.3.	Počet a velikost segmentů výměníku:	109
9.4.4.	Tlakové ztráty.....	110
9.4.5.	Efektivita výměníku metodou ϵ - NTU	111
10.	Bilanční modely	113
10.1.1.	Model pro 4 hodinovou akumulaci	113
10.1.2.	Model pro 8 hodinovou akumulaci	115
10.1.3.	Model pro 12 hodinovou akumulaci	116
10.1.4.	Model pro 24 hodinovou akumulaci	117
11.	Požizovací náklady na solný okruh	119
12.	Závěr	120
13.	Zdroje	122

Seznam obrázků

Obr. 1 Rozdělení způsobů ukládání energie [2]	21
Obr. 2 Průběh tepla s fázovými změnami [2]	23
Obr. 3 Skladovací nádrž s použitím kapslí PCM [4]	25
Obr. 4 Schéma solární elektrárny se skladovacími nádržemi	26
Obr. 5 Schéma solární elektrárny s centrální přijímačem [5]	27
Obr. 6 Schéma solární elektrárny s záložním zdrojem [6]	28
Obr. 7 Graf poklesu teploty studené nádrže [6]	34
Obr. 8 Cena x doba akumulace [6]	35
Obr. 9 Experimentální smyčka [9]	37
Obr. 10 Provozní režimy [9]	38
Obr. 11 Vývoj teploty podle časového a průměrného rozložení teploty v souproutém zapojení: Experiment 1, 2 [9]	39
Obr. 12 Vývoj teploty podle časového a průměrného rozložení teploty v protiproudém zapojení: Experiment 3, 4 [9]	40
Obr. 13 Vývoj teploty podle časového a průměrného rozložení teploty v protiproudém zapojení: Experiment 5, 6 [9]	40
Obr. 14 Grafy výkonů kW jednotlivých zapojení [9]	41
Obr. 15 Grafy výkonu kWh jednotlivých zapojení [9]	41
Obr. 16 Grafy efektivity jednotlivých zapojení [9]	42
Obr. 17 Varianta oběhu pro ukládání elektřiny do roztavených solí se dvěma nádržemi	42
Obr. 18 Závislost hustoty na teplotě a typu směsi	45
Obr. 19 Závislost měrné tepelné kapacity na teplotě a typu směsi	46
Obr. 20 Závislost tepelné vodivosti na teplotě a typu směsi	46
Obr. 21 Závislost kinematické viskozity na teplotě a typu směsi	47
Obr. 22 Model celého oběhu	47
Obr. 23 QT - diagram svazku výměníků	49
Obr. 24 Tepelné ztráty horké nádrže o skladovací kapacitě 147 MWh	55
Obr. 25 Trubkový výměník tepla s dvojitým tahem [17]	60
Obr. 26 Graf průběhu teplot v protiproudém výměníku [23]	67
Obr. 27 Součinitel F pro výměníky s křídlovým proudem [24]	68
Obr. 28 Návrhové rozměry segmentových přepážek [16]	71
Obr. 29 Moodyho diagram pro určení součinitele tření [20]	72
Obr. 30 Diagram pro určení faktoru tření f a korekčního faktoru χ [20]	74
Obr. 31 Var v trubkách s průběhem α (h) po délce trubky [20]	77
Obr. 32 Průběh funkce $S(Re_{TP})$	87
Obr. 33 Střední logaritmický spád výparníku	87
Obr. 34 Průběh součinitele přestupu tepla po délce trubky	102
Obr. 35 Bilanční model max. kapacity 147 MWh za 1 rok	114
Obr. 36 Bilanční model max. kapacity 147 MWh za 2 roky	115
Obr. 37 Bilanční model max. kapacity 294 MWh za 1 rok	115

Obr. 38 Bilanční model max. kapacity 294 MWh za 2 roky.....	116
Obr. 39 Bilanční model max. kapacity 441 MWh za 1 rok.....	116
Obr. 40 Bilanční model max. kapacity 441 MWh za 2 roky.....	117
Obr. 41 Bilanční model max. kapacity 883 MWh za 1 rok.....	117
Obr. 42 Bilanční model max. kapacity 883 MWh za 2 roky.....	118
Obr. 43 Graf jednotkových nákladů na akumulaci dle Tab. 8.....	119

Seznam tabulek

Tab. 1 Vlastnosti vybraných případů akumulace [3]	20
Tab. 2 Termofyzikální vlastnosti vybraných anorganických solí pro PCM [2]	24
Tab. 3 Termofyzikální vlastnosti vybraných směsí pro PCM [2]	24
Tab. 4 Hodnocení technologie s 50MWe [5]	27
Tab. 5 Parametry solární elektrárny s dohříváním [5].....	28
Tab. 6 Parametry akumulačního zařízení podle doby akumulace [6]	29
Tab. 7 Materiály použitelné podle teploty a rychlosti koroze [11]	31
Tab. 8 Náklady na akumulační zařízení přepočtené na jednotkové náklady [6].....	33
Tab. 9 Výkony a ekonomická analýza akumulace do roztavených solí [6]	35
Tab. 10 Charakteristika deskového výměníku olej x roztavená sůl [9]	37
Tab. 11 Výsledky experimentu [9].....	41
Tab. 12 Hodnoty zadané a získané ze CT	48
Tab. 13 Parametry akumulačních nádrží I.....	53
Tab. 14 Parametry akumulačních nádrží II	58
Tab. 15 Výběr typu výměníku dle jejich charakteristik [16]	59
Tab. 16 Hmotnostní průtok soli v primárním okruhu	61
Tab. 17 Koeficienty C_1 a m pro výpočet Nusseltova čísla [20]	65
Tab. 18 Koeficienty C_2 pro $N_L < 20$ ($Re_{D,max} > 10^3$) [20].....	66
Tab. 19 Fouling faktor (faktor zanesení) [21]	66
Tab. 20 Porovnání parametrů jednotlivých solí	70
Tab. 21 Porovnání tlakových ztrát a efektivity	76
Tab. 22 Porovnání parametrů solné části dle jednotlivých solí.....	83
Tab. 23 Porovnání parametrů parovodní části výměníku dle typu soli.....	89
Tab. 24 Porovnání ztrát a efektivity pro jednotlivé soli	93
Tab. 25 Parametry I - 1.část výparníku	94
Tab. 26 Parametry II - 1.část výparníku.....	95
Tab. 27 Parametry I - 2.část výparníku	96
Tab. 28 Parametry II - 2.část výparníku.....	97
Tab. 29 Parametry I - 3.část výparníku	98
Tab. 30 Parametry II - 3.část výparníku.....	99
Tab. 31 Parametry I - 4.část výparníku	100
Tab. 32 Parametry II - 4.část výparníku.....	101
Tab. 33 Celkový výkon a ztráty všech čtyř částí.....	102
Tab. 34 Porovnání parametrů mezitrubkového prostoru pro jednotlivé soli.....	109
Tab. 35 Porovnání tlakových ztrát a efektivity pro jednotlivé soli	113
Tab. 36 Účinnost skladování tepla a zpětné výroby elektřiny za 1 a 2 roky	118
Tab. 37 Porovnání nákladů podle doby akumulace	119

Seznam symbolů

\dot{Q}	[kW]	Tepelný výkon
t	[°C]	Teplota
c_p	[kJ/kg · K]	Měrná tepelná kapacita
ρ	[kg/m ³]	Hustota
λ	[W/m · K]	Tepelná vodivost
ϑ	[m ² /s]	Kinematická viskozita
μ	[Pa · s]	Dynamická viskozita
\dot{m}	[kg/s]	Hmotnostní průtok
m	[kg]	Hmotnost
\dot{V}	[m ³ /s]	Objemový průtok
V	[m ³]	Objem
v	[m ³ /kg]	Měrný objem
p	[bar]	Tlak
I	[kJ/kg]	Entalpie
P	[kWh], [kW]	Výkon
η	[-]	Účinnost
ε	[-]	Efektivita výměníku (v české literatuře nazývána jako účinnost)
D	[m]	Průměr
h	[m]	Výška
S	[m ²]	Plocha
s	[m]	Tloušťka
c	[m/s]	Rychlost
c_s	[m/s]	Skutečná rychlost
n	[ks]	Množství

n_t	[ks]	Počet trubek v 1 tahu
Re	[–]	Reynoldsovo číslo
Pr	[–]	Prandlovo číslo
Nu	[–]	Nusseltovo číslo
α	[$W/m^2 \cdot K$]	Součinitel přestupu tepla
k	[$W/m^2 \cdot K$]	Součinitel prostupu tepla
Δt_{ln}	[K]	Střední logaritmický spád
Δt	[$^{\circ}C$]	Rozdíl teplot
L	[m]	Délka
U	[m]	Výška segmentu
Δp	[Pa]	Tlaková ztráta
ξ	[–]	Součinitel místní ztráty
e	[μm]	Velikost drsnosti
N_L	[–]	Počet řad
$t_{lis} = S_T, S_L$	[m]	Rozteč zalisovaných trubek v trubkovnici
P_F, R_F	[–]	Pomocné parametry pro křížový proud
F	[–]	Součinitel pro výpočet křížového proudu
χ	[–]	Korekční faktor trubek v mezitrubkovém prostoru
f	[–]	Korekční faktor rozteče trubek v mezitrubkovém prostoru
P_T, P_L	[–]	Poměr rozteče a průměru trubky
NTU	[–]	Bezrozměrná veličina výměníku
C_{NTU}	[W/K]	Tepelná kapacita
C_r	[–]	Poměr tepelných proudů
ϵ	[$m^2 \cdot K/W$]	Fouling faktor
σ	[N/m]	Povrchové napětí
r	[kJ/kg]	Výparné teplo

q	$[W/m^2]$	Hustota tepelného toku
ΔT_{SAT}	$[K]$	Přehřátí
Δp_{SAT}	$[bar]$	Rozdíl saturačních tlaků
x	$[-]$	Kvalita páry
X	$[-]$	Martinelliho parametr
$F(X)$	$[-]$	Váhový faktor pro nucenou konvekci
$S(Re)$	$[-]$	Váhový faktor pro bublinkový var

Seznam indexů

PRE	Preheater
EVA	Evaporator
SUP	Superheater
aku	Akumulační nádrž
in	Vstup
out	Výstup
stř	Střední
min	Minimální
max	Maximální
w	Napájecí voda
P	Pára
sm	Parovodní směs
S	Sůl
v	Provozní
i	Vnitřní
e	Vnější
n	Nádrž
iz	Izolace
Tr	Trubka
o	Okolí
zt	Ztráta
pl	Plášť
vik	Víko (dno)
zat	Zatuhnutí
SAT	Saturační

hot	Horká
col	Studená
nab	Nabíjení
vyb	Vybíjení
cel	Celkem
tř	Tření
zv	Zrychlení
st	Hydrostatický
m	Místní
FZ	Bublinkový var dle Forster-Zuber
DB	Nucená konvekce dle Dittusovy Boelterovy
TP	Dvoufázový tok
b	Bublinkový var
c	Kapalinový film
pro	Protiproudý
B	Trubkovnice
D	Mezitrubkový
SEG	Segment ve výměníku
SSEG	Skutečná segmentu ve výměníku
gen	Generátor
kr	Křížový proud
shell	Shell and Tube
I	Dolní mezní křivka
II	Horní mezní křivka

Seznam zkratk

EES	Engineering Equation Solver
CT	Cycle-Tempo
VTO	Vysokotlaký ohřívák
NTO	Nízkotlaký ohřívák
TES	Thermal energy storage (tepelný výkon uložiště)
CSP	Concentrating solar thermal power (koncentrace solární energie)
PCM	Phase change materiál (materiál pro změnu fáze)
CRS	Central receiver system (systém s centrálním přijímačem)

1. Úvod

Poslední dobou je enormní tlak na snížení spotřeby energie, ať už se jedná o snížení tepelných ztrát budov nebo o snížení spotřeby elektřiny jednotlivých elektrických zařízení. Ačkoli se tyto spotřeby snižují, spotřeba elektrické energie stále narůstá, důvodem je zvýšení počtu obyvatelstva, ale také zvýšení počtu elektrických spotřebičů, každého člověka.

Ke vzrůstající spotřebě elektřiny, ale také k zachování stávající potřeby je nutné stavět a modernizovat elektrárny. Stavět nové velké elektrárny spalující fosilní paliva není reálné, neboť množství fosilních zdrojů se neustále zmenšuje. Stejně není reálné stavět velké elektrárny na biomasu, které není v našich podmínkách tak velké množství. Výhodné by bylo nahradit naše stávající tepelné zdroje jadernými zdroji, u nich je problém s délkou výstavby a investičními náklady na stavbu. Jaderné elektrárny představují pro mnohé obyvatele obavy z jaderné havárie.

Další „částečnou“ alternativou je použití obnovitelných zdrojů. „Částečná“ alternativa znamená, že není možné všechny naše zdroje tepelné nebo jaderné nahradit obnovitelnými zdroji, neboť výkonově ani dobou výroby elektřiny se nemohou rovnat. Do těchto obnovitelných zdrojů řadíme biomasu, sluneční, větrnou nebo vodní energii. Pro větrné elektrárny nemáme příliš vhodné podmínky. Vodní elektrárny v naší zemi máme, ale pro stavbu nových nemáme vhodné lokality. Sluneční elektrárny v naší zemi také jsou, ale problémem u nich a u větrných je v nestabilní výrobě, která je čistě závislá na klimatických podmínkách. Větším problémem je ve spotřebování jimi vyrobené elektřiny, protože většinou vyrábí elektřinu v čase, kdy není taková spotřeba a naopak.

Řešením zmíněných problémů s výrobou a spotřebou elektřiny je akumulace vyrobené elektřiny, která má nejvyšší uplatnění u obnovitelných zdrojů. V naší republice máme velké akumulátory, a to přečerpávací elektrárny, z toho dvě primárně vznikly pro krytí výroby a spotřeby jaderných elektráren. Každá elektrárna má jednu přečerpávací elektrárnu. Funkci „akumulace“ můžou plnit i vodní elektrárny, jen nemohou spotřebovat přebytek elektřiny, ale mohou vyrábět v době nedostatku elektřiny, pokud mají dostatek zásoby vody. Stejně jako nemáme vhodné lokality k vodním elektrárnám, tak nemáme vhodné lokality k přečerpávacím elektrárnám.

V této práci se zabýváme akumulací elektřiny do roztavených solí. V rešeršní části jsou zmíněné použité a vyzkoušené technologie této akumulace. V praktické části je navrhnout způsob akumulace do roztavených solí pro konkrétní parametry.

2. Vybrané druhy akumulace a jejich rozdělení:

- Přečerpávací elektrárny

Tvoří ji horní a spodní nádrž, potrubí a reverzibilní turbíny (čerpadla), spolu s generátory. Při nadbytku elektřiny je voda přečerpána čerpadlem ze spodní do horní nádrže a v době nedostatku je přes turbínu, pouštěna zpět do spodní nádrže. Pomocí potenciální energie, která roztočí turbínu je vyrobena zpětně elektřina. Velkou výhodou této akumulace je uložení elektřiny na dlouhou dobu, zároveň jsou zde i značné nevýhody v nedostatku vhodných lokalit a také velké počáteční investice na výstavbu.

- Akumulace do stlačeného vzduchu

Tento typ akumulace je možné využít u plynových nebo paroplynových elektráren a spočívá ve výrobě a následném uložení tlakového vzduchu do podzemních kaveren nebo zásobníků. Stlačený vzduch se vyrábí při nadbytku elektřiny v rozvodné síti, později při nedostatku elektřiny je stlačený vzduch veden do spalovací komory, vyrobené spaliny se vedou do plynové turbíny atd., podle typu elektrárny, buď přímo do komína nebo předtím do kotle na odpadní teplo. V době nedostatku elektřiny v rozvodné síti spustíme vybíjení zásobníku. Odebíraný akumulovaný stlačený vzduch dokáže ušetřit elektřinu, jinak potřebnou pro stlačovací kompresor. [1]

- Akumulace tepelné energie

V době nadbytku elektřiny v rozvodné síti nebo tepelné energie je tato energie předána akumulacím médiu ve formě tepla v případě elektřiny, uložené v zásobníku. V době nedostatku dané energie je akumulacím médium vedeno přes výměník, kde předá teplo do sekundárního okruhu např. parního, vodního, ORC oběhu. Akumulacím zařízení nemusí mít ani výměník v případě vhodného akumulacím média nebo pokud nedochází ke změně fáze. Pokud dochází ke změně fáze je umístěn v oběhu výměník a např. vzniklá pára v sekundárním okruhu vyrobí pomocí turbíny s generátorem elektřinu. Akumulacím médium nemusí být vždy jen voda, využívají se i jiná média pro své vlastnosti, které mají v porovnání s vodou lepší akumulacím schopnosti např. roztavené soli. [2]

- Akumulace ve vodíku

Přebytečná elektrická energie v síti je využita k výrobě vodíku např. elektrolýzou vody. Získaný vodík je uložen v zásobnících a je možné ho využít ke zpětné výrobě elektřiny nebo jako zkapalněné palivo. Výhoda této akumulace je uložení elektřiny na delší dobu nebo použití zkapalněného paliva pro provoz silničních vozidel. Nevýhoda je nepříliš vysoká účinnost přeměny a doposud nezvládnutá komerční výroba vodíku elektrolýzou z vody. [3]

- Setrvačnický

Jedná se o mechanické rotační zařízení velké hmotnosti otáčející se vysokou obvodovou rychlostí. Elektřina je uskladněna ve formě rotační (kinetické) energie. Při zpětném získání elektřiny je setrvačnický pomocí transformace energie v generátoru zpomalován. Výhodou je

velmi malá cena zařízení a vysoká účinnost uložení elektřiny (charakterizovaná vysokým výkonem). Značnou nevýhodou je uložení elektřiny na velmi krátkou dobu. [3]

- **Baterie**

Možnost záložního zdroje proudu při výpadku elektřiny v domácnostech, elektrárnách apod. Tento systém se v poslední době dosti využívá jako „ekologický“ pohon vozidel. Výhodou je vyšší účinnost přenosu a možnost autonomního systému, možnost jen krátkodobého uložení. [3]

- **Superkapacitory**

Elektřina je akumulována v elektrostatickém poli mezi dvěma elektrodami. Malé investiční náklady společně s vysokou účinností přenosu. Velkou nevýhodou je malá kapacita a pouze krátkodobé uložení elektřiny. [3]

V Tab. 1 jsou vybrané technologie akumulace porovnány, z hlediska účinnosti, investičních nákladů a podle doby akumulace. Uvedena účinnost zahrnuje pouze samotnou akumulaci, je snížena o ztráty po dobu akumulace.

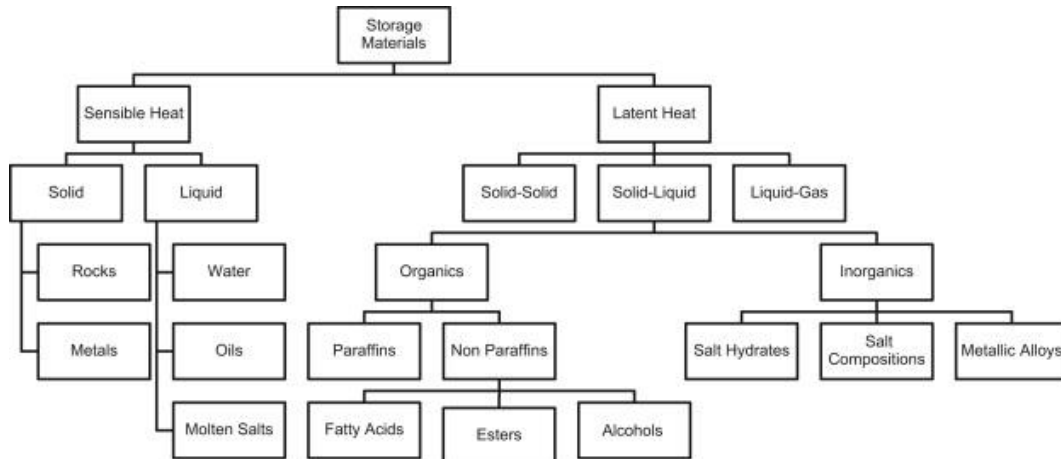
Tab. 1 Vlastnosti vybraných případů akumulace [3]

Technologie akumulace	Výstupní energie	Účinnost [%]	Investiční náklady [USD/kW]	Skladování
Přečerpávací elektrárny	e	50 – 85	500 – 4 600	Dlouhodobé
Stlačování vzduchu	e	27 – 70	500 – 1 500	Dlouhodobé
Roztavené soli	t	40 – 93	400 – 7 400	Vysokoteplotní
Tepelné energie	t	50 – 90	3 400 – 4 500	Dlouhodobé
Ve vodíku	e,t	22 – 50	500 – 750	Dlouhodobé
Setrvačníky	e	90 – 95	130 – 500	Krátkodobé
Baterie	e	75 – 95	300 – 3 500	Krátkodobé

Výstupní energie: e – elektrická, t – tepelná

3. Metody skladování tepelné energie TES (Thermal energy storage)

Na Obr. 1 je rozdělení akumulace tepelné energie, závislé na způsobu ukládání citelného nebo latentního tepla. Podrobnější rozdělení je do typu akumulovaného média, pevné nebo kapalné.



Obr. 1 Rozdělení způsobů ukládání energie [2]

3.1. Skladování citelného tepla SHS (Sensible heat storage)

Při skladování nedochází ke změně fáze, jen se zvýší teplota skladovacího média. Množství skladovaného tepla je dáno teplotou a skladovacím materiálem, respektive jeho hodnotou měrné tepelné kapacity.

$$\dot{Q} = \int_{T_i}^{T_f} \dot{m} \cdot c_p \cdot dT = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_f - T_i) [kW] \quad (3.1)$$

Skladovacím materiálem mohou být pevné látky např.: horniny a kovy nebo kapaliny např.: voda, olej, roztavená sůl. [2] Následně budou uvedeny příklady pevné a kapalné látky.

3.1.1. Horniny

Využívají ukládání citelného tepla do pevného média. Vybrané horniny by měly splňovat parametry jako je levné skladovací médium s dobrou tepelnou kapacitou, vodivostí. Pro otestování byli vybrány granit, jako jednoduše dostupná hornina i v České republice, beton nebo litá keramika. Postup nabíjení spočívá v nahřátí granitu, betonu, ... na určitou teplotu do 400 °C a vybíjení je uskutečněno prouděním média, např. vzduchu v trubičkách umístěných v nabitě hornině. [3]

3.1.2. Soli

V době nadbytku elektřiny nebo tepla je tato energie ukládána do roztavené soli, která je uložena ve dvou nádržích, dle konstrukce. V době nedostatku dané energie je roztavená sůl vedena přes výměník, kde předá teplo do parního nebo ORC oběhu. Vzniklá pára vyrobí pomocí turbíny s generátorem elektřinu. [3]

Tento typ skladování s použitím roztavených solí bude více popsán v následující kapitole.

3.2. Termochemické skladování

Spočívá v reverzibilní endotermické chemické reakci. Tento typ skladování se příliš nevyužívá, proto se o něm nebudeme dále zmiňovat. [2]

3.3. Latentní ukládání LHS (Latent heat storage)

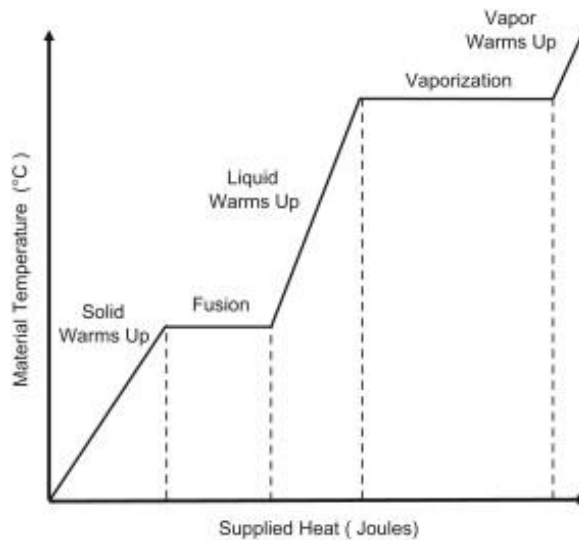
Větší energie je skladována v latentním teple, což je přeměna z pevného stavu na kapalný nebo z kapalného na plyný. Pro fázovou změnu z kapaliny na plyn je potřeba dodat velké množství latentního tepla, oproti fázové změně z pevného na kapalný stav, kde je zapotřebí menšího latentního tepla. U vypařování je problém s objemem plynu při expanzi a jsou nutné velké nádrže, které nejsou příliš praktické. [2]

Mohou se vyskytnout případy, kdy nedochází ke změně stavu, přesto se jedná o skladování latentního tepla viz. Obr. 1. Oproti SHS je zde uskladněno větší množství energie ve srovnatelném množství média. Zatímco ohřev nebo chlazení probíhají při proměnné teplotě tak latentní změna stavu probíhá při konstantní teplotě. V mnohých případech to může způsobit nežádoucí ztrátu teploty mezi nabíjením a vybíjením. [2]

3.3.1. Médium pro změnu fáze PCM (Phase change materials)

Vhodné PCM vybíráme podle termodynamických, fyzikálních a chemických kritérií. Jedním z hlavních parametrů je teplota, kde provozní teplota má být srovnatelná s teplotou fázové změny, latentní teplo by mělo být velké, důvodem je zmenšení skladovacího zařízení. Dalším významným parametrem je tepelná vodivost obou fází, která by měla být taktéž velká z důvodů rovnoměrného rozložení tepla v nádrži. Parametry ovlivňující velikost skladovacích nádrží jsou: velká hustota, malá změna objemu a nízký tlak par. Na rovnoměrné rozložení má vliv i shodné tavení, při rozdílném tavení by došlo k separaci jednotlivých částí a následkem toho ke ztrátě skladovací energie. Se změnou fáze přichází i podchlazení, které by mělo být nulové, popřípadě nepatrné. Důležitým parametrem je rychlost krystalizace. Z chemického hlediska by skladovací médium mělo být stabilní, nemělo degradovat po mnoha fázových změnách, rozkládat se nebo reagovat se stěnami nádrže. Splnění těchto požadavků povede k dlouhé životnosti média a k bezpečnému provozu s tímto médiem. Další požadavky na toto médium je, aby nebylo toxické, hořlavé nebo výbušné. Poslední je ekonomické hledisko, posuzující dostupnost a náklady na dané médium. [2]

Kromě velkého latentního tepla by mělo být i velké specifické teplo pro akumulaci citelného tepla, protože ve většině případů je ke změně stavu nutné dodat nejprve citelné teplo, ke zvýšení teploty, poté latentní teplo ke změně fáze a další citelné teplo ke zvýšení teploty, jinak by byl možný výskyt obou fází např.: kapaliny a plynu, jak je ukázáno na Obr. 2. První část rovnici (3.2) představuje citelné teplo, poté následuje latentní teplo ke změně fáze, v případě dalšího ohřevu následuje opět citelné teplo. [2]



Obr. 2 Průběh tepla s fázovými změnami [2]

$$\dot{Q} = \int_{T_i}^{T_m} \dot{m} \cdot c_p \cdot dT + m \cdot a_m \cdot \Delta h_m + \int_{T_m}^{T_f} \dot{m} \cdot c_p \cdot dT \quad [kW] \quad (3.2)$$

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot [c_{sp} \cdot (T_m - T_i) + a_m \cdot \Delta h_m + c_{lp} \cdot (T_f - T_m)] \quad [kW] \quad (3.3)$$

Média se dělí na organické a anorganické, při čemž mezi organické patří parafíny, neparafíny a mastné kyseliny. Mezi anorganické se řadí soli hydrátů, slané kompozity a kovové slitiny. Anorganické soli se vyznačují téměř dvojnásobnými skladovacími kapacitami na objemovou jednotku a vyššími provozními teplotami. Prakticky nelze najít médium, které by splňovalo všechny parametry termodynamických, fyzikálních a chemických kritérií. Nesplňující kritéria je nutné doladit, přidáním různých úprav jako jsou kovová žebra ke zvýšení teplosměnné plochy a tím i tepelné vodivosti nebo nukleací činidla zabráňující podchlazení. [2]

Vysokoteplotní PCM se vyznačují vysokými teplotami tání nad 300 °C s dobrými skladovacími kapacitami, používající solární elektrárny. Tomu musí odpovídat i používaná média, pracující s teplotami 300–550 °C. Pro takto vysoké teploty se používají anorganická média. V současné době se pracuje na použití alternativních médií, např. superkritický CO₂ nebo roztavené soli, které by měli být schopny pracovat s vyššími provozními teplotami a vyššími akumulacími teplotami nad 550 °C. [2]

V Tab. 2 je seznam vybraných používaných solí, v Tab. 3 je seznam vybraných používaných směsí pro fázové změny a množství tepla získaného z této změny. Zajímavě vycházejí chloridy a fluoridy, které mají velké množství tepla získaného při fázové změně, ale také z hlediska nízkých nákladů. [2]

Tab. 2 Termofyzikální vlastnosti vybraných anorganických solí pro PCM [2]

Materiál	Teplota tání [°C]	Teplo pro změnu fáze [kJ/kg]	Hustota [g/cm ³]	
			Pevné	Kapalina
NaNO ₃	306	182	2,26	1,908
KNO ₃	334	266	2,109	-
NaOH	323	170	2,13	-
KOH	380	149,7	2,044	1,49
CsNO ₃	409	71	2,5	-
LiOH	462	873	1,46	-
PbCl ₂	501	78,7	5,6	-

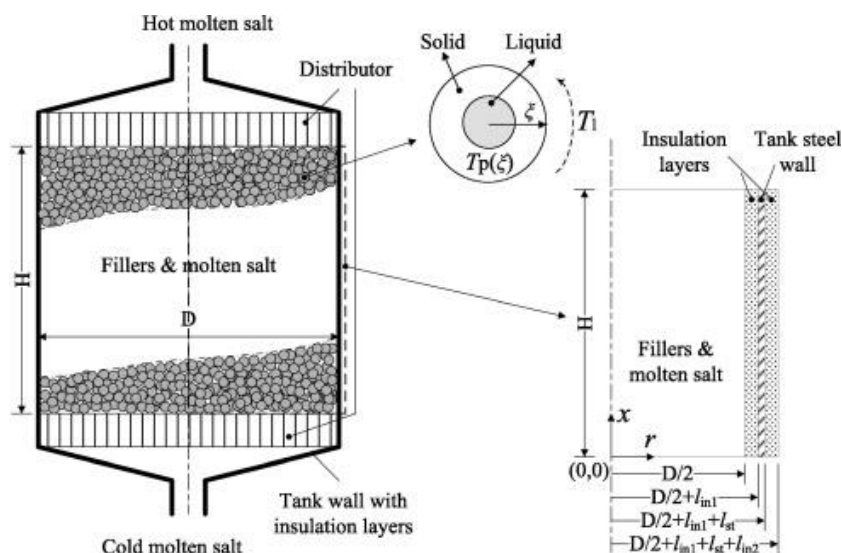
Tab. 3 Termofyzikální vlastnosti vybraných směsí pro PCM [2]

Směs	Složení	Bod tání [°C]	Teplo tavení [kJ/kg]
NaOH – NaCl – Na ₂ CO ₃	77,2 – 16,2 – 6,6	318	290
LiCl – LiCrO ₄ – LiVO ₃ - LiF	41,5 – 35,1 – 16,4 - 7	340	177
K ₂ CO ₃ – Na ₂ CO ₃ – Li ₂ CO ₃	34,5 – 33,4 – 32,1 a	397	276
NaCl – MgCl ₂	61,5 – 38,5 a	435	328
LiF – MgF ₂	67 - 33	746	947
NaF – CaF ₂	68 - 32		873

3.3.2. Akumulace pomocí kapslí PCM

Kromě systému s dvěma nádržemi je i systém s jednou nádrží termocline TES, kde lze nákladnou sůl částečně nahradit poměrně levnějšími pevnými plnidly. U „jednolůžkového“ kanálu se zabudovaným „lůžkem“ lze snížit náklady o 35 %, oproti systému s dvěma nádržemi. Médium v systému s jednou nádrží je dusičná sůl spolu s křemičitým pískem a křemenným kamenem, které jsou vzájemně kompatibilní a jsou nejvhodnějším výplňovým materiálem. [4]

Systém s jednou nádrží se skládá ze svislé válcové nádoby, která má na horní /dolní straně umístěn výstup/vstup pro horkou/studenou roztavenou sůl. Ve vnitřní část nádoby je roztavená sůl spolu s PCM kapslemi, mající stejný průměr. Za vstupem jsou umístěny rozváděcí kanálky pro rovnoměrné rozložení protékající soli „zabaleným ložem“ viz. Obr. 3. Během nabíjení protéká horká sůl horním vstupem a pozvolna uvolňuje teplo do kapslí PCM, naopak při vybíjení odebírá teplo z nabitých kapslí. Kapsle se při nabíjení, kdy absorbuje teplo taví a mění se z pevné látky na kapalinu a při vybíjení se naopak mění z kapaliny na pevnou látku. [4]



Obr. 3 Skladovací nádrž s použitím kapslí PCM [4]

4. Technologie pro skladování elektřiny pomocí tepla v roztavených solích

4.1. Solární elektrárny se skladováním citelného tepla ve dvou nádržích

Pomocí akumulace roztavené soli můžeme kontinuálně regulovat vyráběný elektrický výkon. Tento typ akumulace nám umožní pružně a bezpečně reagovat na klimatické podmínky spojené s velkým výkonem obnovitelných zdrojů např.: větrných, fotovoltaických, ... a tím pádem velkým nebezpečím přetížení elektrické sítě. [5]

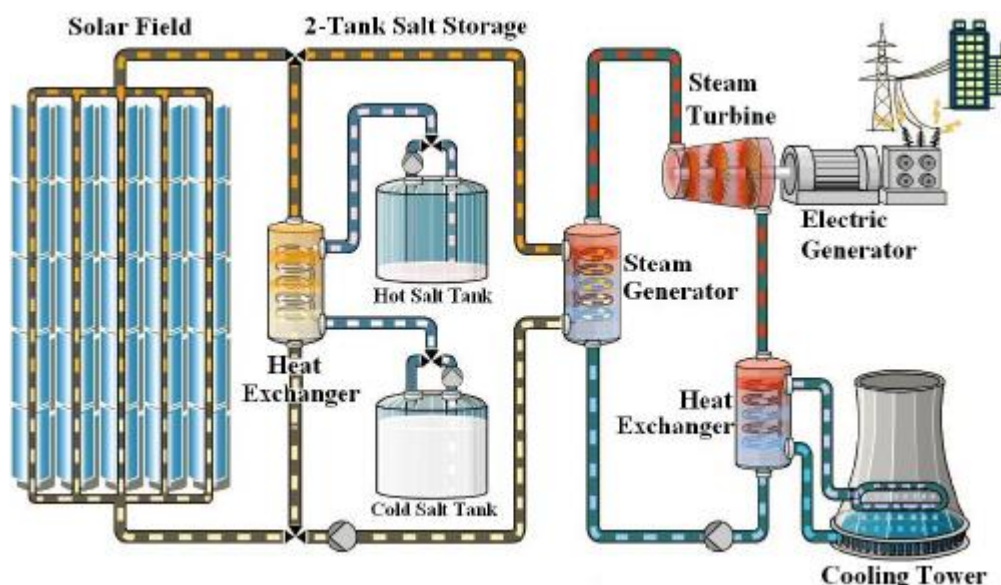
4.1.1. První použití skladování tepelné energie pomocí dvou nádrží

První použití bylo na elektrárně SEGS I postavené v roce 1984, byla schopna akumulovat teplo po dobu 3 hodin. Zařízení pracovalo s minerálním olejem a s použitím dvou nádrží, v jedné byl „studený“ olej o teplotě 300 °C a v druhé byl olej zahřátý na teplotu cca 385 °C. Doba, po kterou bylo teplo akumulováno, dokonale pokryla špičkové zatížení. Problém byl s použitým médiem, které je velmi hořlavé, a proto nemohlo být dále použito z bezpečnostních důvodů, protože se přešlo na vyšší teplotu média cca 400 °C. Výhodné není ani použití syntetického média z důvodu zvýšení nákladů a také vysoký tlak par média by vyžadoval zařízení umožňující provoz na vyšším tlaku. Byl proveden návrh počítající s 50 MW Rankine cyklem, umožňující skladování po dobu až 15 hodin při plné kapacitě. [6]

4.1.2. Porovnání solárních elektráren

„V současné době je systém TES s dvěma nádržemi roztavené soli jediný, který byl použit ve velkoplošné komercializaci, jako jsou parabolické elektrárny Andasol, tovární věž Gemasolar.“ Velkou nevýhodou této technologie jsou relativně vysoké náklady a omezení týkající se snižování nákladů v budoucnu. [4]

Doposud byla akumulace elektřiny v roztavených solích použita u velkých solárních elektráren viz. Obr. 4. [7] V případě solárních elektráren s modernizovaným uložením citelného tepla do dvou nádrží je médium pro přenos tepla HTF (heat transfer fluid) použito i k akumulaci tepla. [6]



Obr. 4 Schéma solární elektrárny se skladovacími nádržemi

Koncentrovaná solární energie CSP (concentrated solar power), neumožňuje oproti fotovoltaickému zařízení, přímou výrobu elektřiny. Zařízení CSP vyrábí elektřinu zahříváním protékajícího média přes kolektory, následně je získané teplo předáno ve výměníku do parního oběhu nebo ORC (Organic Rankine Cycle) a v něm zapojená turbína vyrábí spolu s generátorem elektřinu. [8]

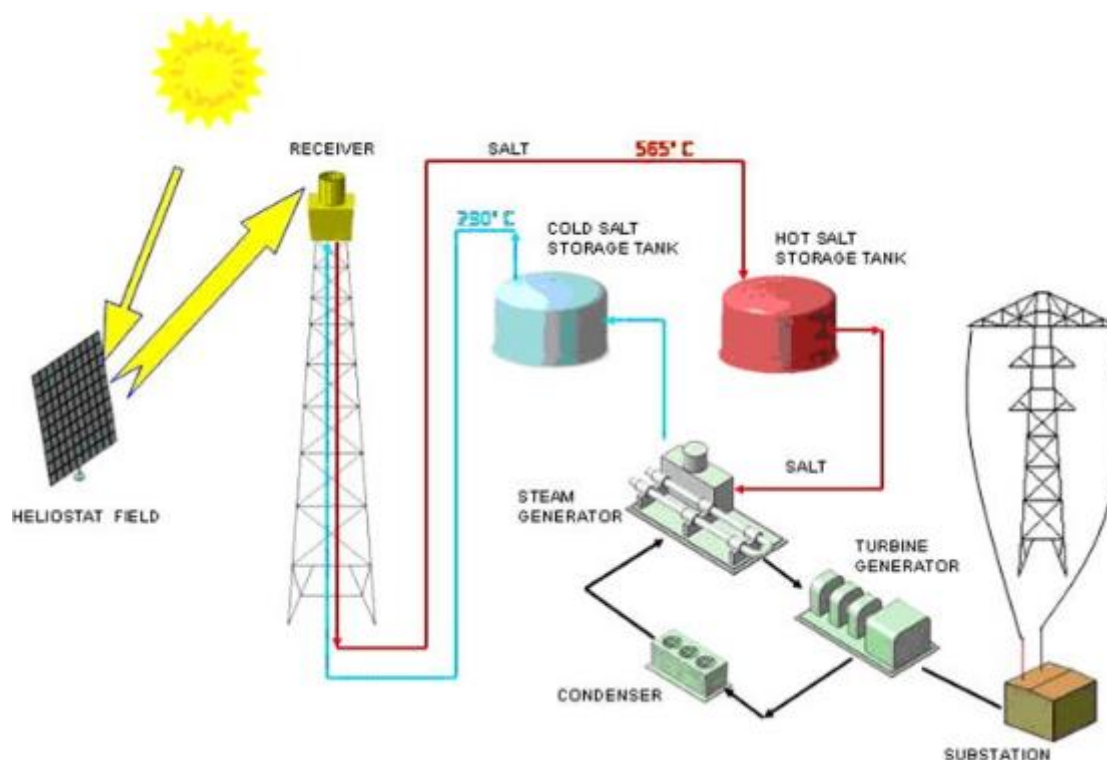
„Závody CSP se systémy TES měli mít do března 2015 celkovou kapacitu 5840 MW_e.“ Nejvíce používané TES médium je směs solí 60 % NaNO₃ – 40 % KNO₃, někdy označované jako sluneční soli. Tato sůl pracuje při teplotách 292 °C ve studené nádrži a 385 °C v horké nádrži, zvolení teplot je dáno teplotními limity tavení a teplotní stabilitou cca 400 °C této soli. Provozní stavy ukládání energie jsou stejné jako u předešlých poznatků: nabíjení, akumulace, vybíjení, přičemž nabíjecí teplota získaná na solárních kolektorech je 391 – 393 °C je vedena do výměníku, kde ohřívá sůl ze studené nádrže na teplotu horké nádrže. Teplonosné médium, které vede ze solárních kolektorů tepelnou energii do výměníku je syntetický termální olej Therminol VP-1, použitý pro svou tepelnou stabilitu za vysokých teplot. [9]

Parabolické elektrárny jsou složeny z polí jednotlivých parabolických žlabových kolektorů, tepelných výměníků generující páru, parních turbín s generátorem a systémem akumulující tepelnou energii. Teplosměnné médium je zahříváno při cirkulaci kolektory na teplotu až 393 °C, následně ve výměníku tepla se mění kapalina, tj. napájecí voda v přehřátou páru o tlaku 100 bar a teplotě 371 °C. Při vhodných letních dnech pracuje elektrárna 10 až 12 hodin. Při nabíjení je přes výměník ohřívána roztavená sůl na teplotu cca 385 °C a vedena do teplé nádrže. Při vybíjení naopak roztavená sůl proudí z teplé nádrže přes výměník, kde je ochlazena na teplotu cca 300 °C a vedena do studené nádrže. [6]

Parabolické žlaby jsou použity v jediné velké komerční elektrárně, která se nachází ve Spojených státech v poušti Kalifornie Mojava. Instalovaný výkon této velké elektrárny je 354 MW,

složena z devíti tepelných elektráren: jedna o výkonu 13,8 MW, šest o výkonu 30 MW a dvě o výkonu 80 MW. [6] [10]

U typu s centrálním přijímačem CRS (Central receiver systém) Obr. 5 se dosáhne cca 3x vyšších teplot a vyššího ročního kapacitního faktoru než u zařízení s parabolickými žlabovými systémy. To vede k nižším nákladům na akumulaci, zvýšený faktor je díky zmenšení rozdílu výkonů v letních a zimních obdobích. [5]



Obr. 5 Schéma solární elektrárny s centrální přijímačem [5]

V Tab. 4 jsou srovnány solární elektrárna s parabolickými žlaby a CRS s různými médii. Z této tabulky vychází nejlépe CRS s roztavenou solí, které má nejvyšší účinnost a nejnižší náklady na elektřinu.

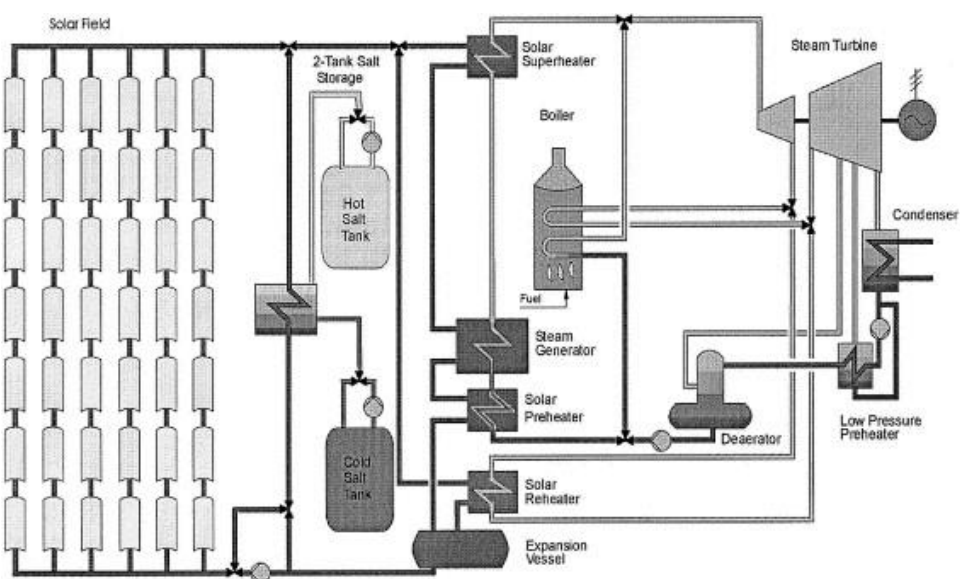
Tab. 4 Hodnocení technologie s 50MWe [5]

Technologie		Parabolické žlaby+olej	CRS+pára	CRS+roztavená sůl
Průměrná hrubá účinnost	[%]	15,4	14,2	18,1
Průměrná čistá účinnost	[%]	14	13,6	14
Specifická výroba energie	[kWh/m ² .rok]	308	258	375
Faktor kapacity	[%]	23 – 50	24	do 75
Jednotná investice	[€/kWh.rok]	1,54	1,43	1,29
Provoz a údržba	[c€/kWh]	3,2	4,1	3,7
Náklady na elektřinu	[€/kWh _e]	0,16 – 0,19	0,17–0,23	0,14 – 0,17

4.1.3. Solární elektrárny s dohříváním

V projektu SOLAR TWO se modifikací zařízení v oběhu zlepšila účinnost zařízení ve špičkách. Díky změně akumulčního systému, většímu poli heliostatu a nepatrnou změnou turbíny byl možný provoz v letním období 24 hodin denně, roční součinitel kapacity 64 - 71 % a z toho 15 % muselo být poskytnuto z jiných zdrojů (fosilních). To je v případě, kdy výkon získaný ze Slunce nestačí pro plný výkon turbíny a akumulční nádrže jsou vybyty, nutné je použít záložní zdroj viz. Obr. 6. Jak bylo uvedeno výše hlavním palivem pro záložní fosilní zdroje jsou zemní plyn, uhlí aj.. [5]

Parametry solární elektrárny s dohříváním viz. Obr. 6 jsou uvedeny v Tab. 5. Tato elektrárna o výkonu turbíny 10 - 20 MW_e umožňuje skladovat teplo 10 - 20 hodin. Provedená studie proveditelnosti ukázala možnost snížit náklady s vyšším výkonem turbíny 50 - 100 MW_e. [5]



Obr. 6 Schéma solární elektrárny s záložním zdrojem [6]

Tab. 5 Parametry solární elektrárny s dohříváním [5]

Počet heliostatik		2 480
Povrch pokrytý heliostaty	[m ²]	285 200
Povrch pokrytý heliostaty	[ha]	142,31
Výška věže	[m]	120
Napájení přijímače	[MW _{th}]	120
Výkon turbíny	[MW _e]	17
Akumulovaná kapacita	[hod]	15
Výkon kotle na zemní plyn	[MW _{th}]	16
Roční výroba elektrické energie (min.)	[MW _e]	96 400
CO ₂ zmenšení (nejlepší dostupná technologie)	[tun/rok]	23 000
CO ₂ zmenšení (uhelná elektrárna)	[tun/rok]	85 000

4.2. Zařízení v okruhu

Systém skladování je složen ze zásobníku dusičné soli, skladovací nádrže na dusičnou sůl, výměníku tepla olej-sůl a cirkulačního čerpadla dusičné soli. Parametry jednotlivých zařízení v okruhu jsou v Tab. 6. [6]

Nádrže na dusičné soli se používají vertikální konstrukce, pracující s atmosférickým tlakem. Nádrže jsou podobné nádržím na olej a jsou vyrobeny z uhlíkaté oceli. Nádrže jsou izolované minerální vlnou a vápenným křemičitanem. Dno nádrže je složeno z betonové desky, pěnové izolace, protipožárních cihel, ocelové desky a písku. Po obvodu je prstencová izolace z ohnivzdorných krytin, chránící proti požáru. [6]

Výměníky jsou navrženy pro malý teplotní rozdíl 3 - 10 °C a tlaku vysokotlakého média 10 bar při výstupní teplotě 390 °C. Z důvodu tlakových ztrát ve výměníku a potrubí je provoz při tlaku 20 bar. Naproti tomu k cirkulaci dusičné soli postačuje tlak asi 5 bar, z toho důvodu je na výměníku tepla tlaková diference cca 15 bar. Nejeekonomičtější výměník pro konvenční použití je kotlové (Shell & Tube) konstrukce. V trubkách proudí vysokotlaké médium a kolem trubek dusičná sůl. Trubky jsou do trubkovnice zaválcovány a následně přivařeny pro zabezpečení těsnosti. [6]

Oběhové čerpadla pro čerpání dusičné soli je vertikální konstrukce, z důvodu těsnosti, neboť u horizontálních by muselo být použito těsnění, odolávající oxidačním vlastnostem soli. Proto je těsnost čerpadel vytvořena škrtkou za posledním stupněm a následné gravitace, vracející sůl zpět do nádrže čerpadla. Ty jsou situovány pod nádrží z důvodu zaplavení čerpadla solí ze spodu nádrže. Motory čerpadel jsou na nosné konstrukci nad nádrží a přenos krouticího momentu je přes dlouhý hřídel. [6]

Modernizovaná čerpadla čerpající sůl přímo ze skladovací nádrže, což snižuje počet těchto víceúrovňových vertikálních čerpadel. Upraveny byli i mazací ložiska dlouhého hřídele spojující motor s čerpadlem. Došlo také ke snížení počtu čerpadel, regulačních ventilů a odstranění jímky původního čerpadla. [5]

Tab. 6 Parametry akumulčního zařízení podle doby akumulace [6]

Parametry tepelného akumulčního zařízení							
Doba akumulace	[hod]	1	3	6	9	12	15
Množství soli	[tun]	4 778	14 096	28 192	42 288	56 384	70 480
Rozměry nádrže výška x průměr							
Studená nádrž	[m x m]	12x16,6	14x26,3	14x37,2	14x45,5	14x37,2 ^a	14x41,6 ^a
Horká nádrž	[m x m]	12x16,8	14x26,7	14x37,7	14x46,2	14x37,7 ^a	14x42,2 ^a
Výměník tepla olej x sůl							
„Number of HX“		3	3	3	4	5	6
Teplosměnná plocha	[m ²]	8 635 ^b	8 635 ^b	8 635 ^b	8 419 ^c	9 067 ^c	9 499 ^c
Čerpadlo dusičné soli							
Průtok	[kg/s]	1 189 ^d	1 189 ^d	1 189 ^d	1 546 ^e	2 081 ^e	2 616 ^e
Výtlačná výška	[m]	19,2 ^d	19,2 ^d	19,2 ^d	25,6 ^e	32 ^e	38,4 ^e
Příkon	[kWe]	316 ^d	316 ^d	316 ^d	547 ^e	921 ^e	1 389 ^e

^a Vyžaduje dvě nádrže horké a dvě studené

^b Výměník tepla olej x sůl je určen k vypouštění akumulčního nádrže

^c Výměník tepla olej x sůl je určen k vypouštění akumulčního nádrže (kapacita nabíjení je vyšší než kapacita při vypouštění)

^d Výkonnost čerpadla horké soli

^e Výkonnost čerpadla studené soli

4.3. Médium pro skladování tepelné energie

Používané anorganické dusičné soli nabízí velmi dobré vlastnosti jako je hustota 1880 kg/m^3 , specifické teplo 1500 J/kg.K , nízkou chemickou reaktivitu a nízký tlak par. Hlavní tři používané soli jsou HITEC, termální směs NaNO_2 , NaNO_3 a KNO_3 s bodem tuhnutí $120 \text{ }^\circ\text{C}$, zatímco HITEC XL a NaNO_3 mají bod tuhnutí $130 \text{ }^\circ\text{C}$. V případě binární soli NaNO_3 a KNO_3 je bod tuhnutí $220 \text{ }^\circ\text{C}$. Teplota soli by neměla klesnout pod $80 \text{ }^\circ\text{C}$ nad bodem tuhnutí. Cena soli se pohybuje mezi $0,40$ až $0,90 \text{ USD/kg}$, z toho nejlevnější je KNO_3 . [6] Tyto soli můžeme zahřát až na teplotu $560 \text{ }^\circ\text{C}$ a díky tomu získat vysoko energetickou páru o teplotě $550 \text{ }^\circ\text{C}$ a tlaku $11,4 \text{ MPa}$. Vysoko energetická pára nám přinese vysokou účinnost termodynamického cyklu cca 40% s využitím moderních turbín. [11]

Výhodou Hitec solí je jejich stabilita do teploty $454 \text{ }^\circ\text{C}$, maximální provozní teplota $538 \text{ }^\circ\text{C}$, ovšem krátkodobě může být teplota nad $550 \text{ }^\circ\text{C}$. Tento typ teplotně nestálých solí se rozkládá na dusitany $\text{MNO}_3 - \text{MNO}_2$ a kyslík O_2 , při teplotě rozkladu cca $600 \text{ }^\circ\text{C}$ v kontaktu se vzduchem a nad $454 \text{ }^\circ\text{C}$ v kontaktu s inertním plynem. V případě překročení teploty $800 \text{ }^\circ\text{C}$ je reakce velmi rychlá a dochází nejspíše k varu za vzniku N_2 a NO_x . Výsledným produktem rozkladu jsou peroxidy a superoxidy, oba patří do skupiny silně oxidačních činidel. Zmíněné produkty mají korozivní účinky při vysokých teplotách. Při kontaktu soli se vzduchem dochází k oxidaci soli, to způsobuje změnu dusitanu na dusičnan a naopak. Kromě oxidace, může ze vzduchu absorbovat CO_2 , díky němu se ze soli mohou vysrážet vzniklé uhličitany. Dalším velkým problémem je i absorpce vzdušné vlhkosti, způsobující možnou pomalou hydrolyzaci soli na alkalické hydroxidy. Zmíněné reakce s CO_2 a H_2O , mění složení soli oxidů a uhličitánů, zvyšují teplotu tání, korozní potenciál a mění tepelné charakteristiky směsi solí. [11]

4.3.1. Způsoby čištění solí

Kontaminace kyslíkem je u dusitanů a dusičnanů menší, stejně to je s citlivostí k hydrolyze než např. u fluoridů a chloridů. K hydrolyze vody rozpuštěné v dusičnanech a dusitanech nedochází při zvýšené teplotní úrovni, ale až při teplotě $600 \text{ }^\circ\text{C}$ se nechá voda odstranit, bez známky hydrolyzy. Hitec soli je možné dehydratovat vakuovým sušením při teplotě $250 \text{ }^\circ\text{C}$ po dobu 10 hodin, konečný tlak $10 - 2 \text{ mm Hg}$. Dehydratovat lze soli i čistým dusíkem nebo proudem argonu při teplotách $150 - 350 \text{ }^\circ\text{C}$, pak se jedná o tzv. pomalou dehydrataci s konečným obsahem vody cca 200 ppm . [11]

4.4. Korozní mechanismy použitých materiálů

Pokud vystavíme roztavenou dusičnato - dusitanou sůl oceli, vznikne na ní ochranná komplexní vrstva oxidů. Na zprvu měkké oceli se vytvoří tenká přilnavá vrstvička Fe_2O_3 , takto vzniklá vrstvička není příliš ochranná a může způsobovat vznik pittingové koroze. S postupující oxidací se vzniklá zoxidovaná vrstva mění na duplexní nebo komplexnější strukturu, kde krajní vrstva Fe_2O_3 ve styku se solí a ochranou vnitřní vrstvou Fe_3O_4 , která je v kontaktu s kovem. Dochází k růstu oxidační vrstvy, která postupně více zpomaluje difúzi okysličovadla na kovovém rozhraní, až se nakonec sama omezuje. Použití chromových ocelí nebo chrom-niklových slitin, získáme mnohem komplexnější produkty koroze, které jsou oproti železným oxidům více odolné vůči korozi. Vzniklý směsný oxid chromu $(\text{Cr,Fe})_2\text{O}_3$ nebo oxidy austenitické oceli $\text{Ni}(\text{Cr,Fe})_2\text{O}_4$, které jsou více ochranné než prosté Fe_3O_4 . V případě Inconelu 800 se vytváří vícevrstvé, vysoce ochranné oxidované struktury $(\text{Ni,Cr})\text{N}$, $(\text{Cr,Fe})_2\text{O}_3$, $\text{Fe}(\text{Fe,Cr})_2\text{O}_4$, Fe_3O_4 a Fe_2O_3 . [11]

Dusičnany a dusitany jsou ke většině slitinám relativně benigní, oxidují s většinou slitin, dokud se netvoří zoxidovaná vrstva. Agresivita dusičnanů se zdá být větší než u např. fluoridů a chloridů, což může být způsobeno nekontrolovatelnými kontaminanty v solích. Dusičnany jsou omezeny na nižší provozní teploty, díky své teplotní nestabilitě než např. fluoridové a chloridové soli, proto výsledná rychlost koroze může být při nižších teplotách ekonomicky přijatelná. Nízkouhlíková ocel a jiné slitiny na bázi železa vytváří při kontaktu s dusičnými a dusitými solemi pasivační oxid Fe_3O_4 při teplotě 240 – 320 °C, který dále oxiduje na Fe_2O_3 . „Oxidační vrstvy jsou ochranné do cca 500 °C. Niklové nebo austenitické oceli jsou používány pro vyšší teploty nebo pro dlouhodobý provoz.“ Na Inconelu 800 a nerezové oceli 304, 304L a 316 při konvekci směsi solí $KNO_3 - NaNO_3$ vzniká při teplotách 375 – 600 °C a při působení argonu tenký oxidační film. Z toho vycházejí i teplotní rozsahy použitelnosti materiálu zařízení pro provoz směsí solí, jak je uvedeno v následující Tab. 7 je uveden i teplotní limit a rychlost koroze. [11]

Tab. 7 Materiály použitelné podle teploty a rychlosti koroze [11]

Materiál	Teplota [°C]	Rychlost koroze [mm/y]
Uhlíkové oceli ASTM A273, A274	538	0,6 – 3
Nerezová ocel SS 304	538	0,21
Nerezová ocel SS 304L	538	1,8
Nerezová ocel SS 309	454	<0,03
Nerezová ocel SS 309	570	0,2
Nerezová ocel SS 309Nb	570	0,29
Nerezová ocel SS 310	570	0,23
Nerezová ocel SS 316	538	<0,03
	430	0,007
	505	0,008
	550	0,074
Nerezová ocel SS 321	570	0,17
Nerezová ocel SS 347	538	0,12
Nerezová ocel SS 446	570	0,22
Legované oceli, 15% Cr	538	<0,03
Inconel 600	538	<0,03
Carpenter 20	570	0,18
Monel	538	0,03
Hastelloy N	430	0,003
	505	0,005
	550	0,007

5. Bezpečnost a ekonomika

5.1. Bezpečnostní aspekty

Akumulačním médiem je směs dusičnanu sodného a draselného. Pokud jsou v kontaktu s organickými materiály, při teplotě vyšší, než je teplota vznícení, může reakce probíhat rychleji a způsobit vznícení, hoření či výbuch. Médium přenášející teplo je syntetický olej složený z 75 % difenyloxydu/etheru a 25 % bifenyly. V případě netěsnosti výměníku olej - sůl hrozí smíchání oleje a soli, což může způsobit chemickou reakci nebo hoření. Z bezpečnostního hlediska byly provedeny

zkoušky, které prokázaly, že ani při smísení a teplotě 600 °C, nehrozí chemická reakce ani vznícení, či výbuch. Vzhledem k tomu, že nejvyšší teplota ve výměníku je 390 °C a nepřítomnosti kyslíku, nejsou možné předešle rizika při smísení oleje a soli. [6]

Na projekt SOLAR TWO navázal projekt SOLAR TRES, ve kterém se modernizovali elektrárny s centrálním přijímačem dle poznatků z předchozího projektu. V rámci modernizace došlo ke snížení počtu ventilů a k úpravám vedoucí ke zvýšení bezpečnosti. Ta se zvýšila i modernizací řídicího systému, který více kontroluje teplotu roztavené soli z důvodu nebezpečí zatuhnutí. Parametry modernizovaného akumulačního systému jsou: doba akumulace 15 hodin, akumulovaný výkon 647 MWh a množství dusičné soli je 6250 tun. Systém je navíc vybaven izolovanými ponornými topnými tělesy, díky kterým je použití dusičné soli v systému efektivní a bezpečné. V teplé nádrži je sůl o teplotě 565 °C a tepelná ztráta při stacionárním akumulaci je 1 - 2 °C/den. Kvůli riziku zamrznutí soli je studená nádrž udržována při teplotě vyšší než 285 °C, přičemž teplota tuhnutí je cca 240 °C. [5]

5.2. Účinnost

Nejúčinnější výroba elektřiny je, pokud mezi teplou a studenou nádrží je větší teplotní rozdíl. Zde je ovšem problém s odolností materiálu vůči vysokým teplotám u teplého zásobníku. [12]

Zdroj uvádí naměřenou účinnost solárních kolektorů 88 % za vhodných podmínek a nízkém větru, při zvýšení větru na provozní stav klesla účinnost na 86 %. Účinnost skladovacího systému byla naměřena přes 97 %, což splnilo požadavky návrhu skladovacích nádrží. Hrubá účinnost Rankine cyklu byla 34 % a s touto účinností bylo i v projektu počítáno. Zdroj dále uvádí špičkovou účinnost přeměny 13,5 %, což se mi jeví poněkud málo. Doba nepřetržitého chodu byla 154 hodin. [5]

U typu CRS je průměrná roční účinnost 38 %, projektovaná je 39,4 %, turbína pracuje s vyšším tlakem a teplotou, což je podmínkou pro její malou velikost. Taková účinnost je zaručena po dobu 30 let i při každodenním spouštění, odstavování nebo změnou zatížení [5].

5.3. Náklady

Snahou je postavit elektrárnu se skladováním solí ve dvou nádržích, která by mohla konkurovat poloviční cenou, než je u účinnějšího způsobu akumulace do baterií. Poloviční cena by vyrovnala uváděný pokles účinnosti akumulace o 20 %. Akumulace v roztavené soli by měla konkurovat i mnohem levnějšímu způsobu akumulace v přečerpávacích elektrárnách. [7]

Podle studie parabolických žlabových elektráren bylo prokázáno, že HTF zvyšuje náklady na větší akumulační systémy, oproti systémům s levnějším skladovacím médiem např. roztavenou solí. Ze zkušenosti z elektrárny SEGS a projektu SOLAR TWO, bylo možné stanovit náklady na akumulaci ve dvou nádržích s roztavenou solí na 30-40 USD/kWh_{th} v závislosti na velikosti akumulace. Parabolické žlabové elektrárny jsou nejlevnější velkoplošné a osvědčené solární technologie. [6]

V následující tabulce jsou uvedeny celkové náklady na materiál, instalaci a režii, které jsou spojeny s pozemní výstavbou. Náklady nezahrnují engineering, zadávání zakázky a věci s tím spojené. Uvedené náklady na dusičné soli a čerpadla byly použity (odvozeny) z projektu centrálního přijímače SOLAR TRES 15MWe v jižním Španělsku. Náklady na skladovací nádrže, izolace, základ stavby, byly

upraveny z nákladů na 10 MWe solární centrální přijímače v Jižní Kalifornii. Jednotková cena výměníku olej-sůl je odhadována na 147 USD/m². [6]

Z Tab. 8 je patrné, že pro jednotkové ceny vychází nejlépe vyšší skladovací kapacity, naopak nejhůře vychází skladování na 1 hodinu, kde není možné cenu výměníku rozpočítat do jednotlivých hodin. Jednotková cena pro 3 hodinové skladování je téměř poloviční vzhledem k 1 hodině. Nejnižší jednotková cena je při 9 hodinovém skladování, pochopitelně s delší dobou skladování klesá jednotková cena. Jenže od 9 hodinového skladování jednotková cena pozvolna narůstá a poté opět klesá. Z toho vyplývá, že maximální uvedená doba skladování, zatím 15 hodin není nejvýhodnější s ohledem na jednotkovou cenu. [6]

Tab. 8 Náklady na akumulární zařízení přepočtené na jednotkové náklady [6]

Náklady na akumulární zařízení v 1000 [USD]							
Akumulární kapacita	[hod]	1	3	6	9	12	15
Dusičné soli		2 208	6 512	13 025	19 537	26 049	32 562
Skladovací nádrže		838	2 405	4 638	6 842	9 275	11 484
Izolace nádrže		300	608	974	1 300	1 947	2 280
Základy nádrží		518	984	1 653	2 273	3 216	3 823
Tepelný výměník olej x sůl		4 195	4 195	4 195	5 453	7 340	9 228
Čerpadlo dusičné soli		692	812	1 383	1 647	2 063	2 629
Řídící systémy		875	1 551	2 587	3 705	4 989	6 201
Celkové náklady		9 626	17 066	28 453	40 757	54 880	68 206
Jednotková cena	[USD/kW _t]	65,63	38,79	32,33	30,88	31,18	31

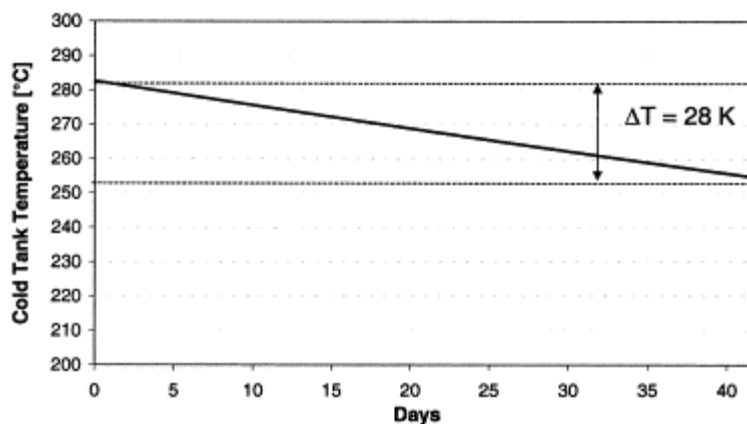
V solární elektrárně má nejvyšší prioritu parní turbína, což znamená, že primárně je pára získaná z kolektorů vedena přímo do turbíny, až v případě zvýšení parametrů (množství) páry nad navrhované hodnoty pro Rankine oběh se začne s nabíjením akumulárních zásobníků. Pokud není množství přicházející páry z kolektorů dostatečné, začne se odebírat potřebné množství energie z akumulárních zásobníků, pokud jsou nabity, pro dosažení optimálních parametrů páry, tzn. pro plně zatíženou turbínu. Poslední způsob odebírání částečného množství (dohřívání) z akumulární nádrže se obvykle používá při snížení slunečního svitu (západ Slunce), protože je snaha o co nejdelší možný provoz turbíny na plný výkon. Při akumulaci musíme uvažovat tepelné ztráty v nádržích. Ke zjištění ztrát byly experimentálně zjištěny ztráty na nádržích soli u Solar Two. Pomocí regresní analýzy byla sestavena empirická rovnice tepelných ztrát [6]:

$$q_{loss} = 0,00017 \cdot T_{salt} + 0,012 \text{ [kW/m}^2\text{]} \quad (5.1)$$

Výpočet tepelných ztrát slouží k vypočítání účinnosti akumulace, ale i k získání informací k ochraně před zamrznutím. Snížení teploty akumulované soli má za následek nižší teplotu vyrobené páry z uskladněné soli, oproti páře vyrobené přímo z kolektorů, díky tomu bude i menší výkon turbíny, při provozu na páru z akumulované soli. [6]

Musí být zaručeno, že i při odstavce nebo při nepříznivém počasí bude zajištěno, že teplota v nádrži neklesne k teplotě tuhnutí soli cca 220 °C. Na Obr. 7 je znázorněn graf, který byl vytvořen pro

možnost, že by po dobu 6 týdnů nebyly akumulční nádrže nabíjeny ani vybíjeny. Bylo prokázáno, že ani po takto dlouhou dobu neklesne teplota soli v nádrži pod teplotu cca 250 °C, což je vysoko nad teplotou tuhnutí. Tento případ dlouhého výpadku v praxi těžko nastane. [6]



Obr. 7 Graf poklesu teploty studené nádrže [6]

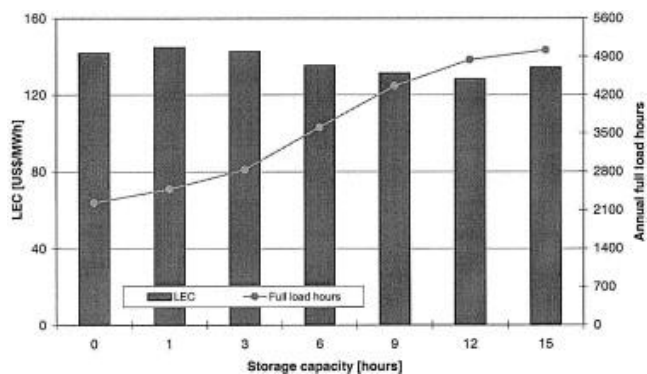
Přesto, že riziko zamrznutí soli je prakticky nemožné, bude na potrubí a výměníku sůl-olej instalovaný topný kabel a v nádržích ponorné ohřívače, pro případ kritické události.

„Ekonomika konceptu skladování roztavené soli byla posouzena výpočtem nákladů na levelized electricity cost (LEC)“. [6]

$$LECS/MWh_e = Investment\ cost\ Fixed\ charge\ rate + Fuel\ cost + O\&M\ cost\ Net\ electric\ output \quad (5.2)$$

„Pevná sazba přeměňuje kapitálové náklady na roční náklady.“ Na Obr. 8 je znázorněn LEC a počet hodin plného zatížení při různé kapacitě. Vstupní hodnoty pro výpočet výkonu a LEC jsou uvedeny na příkladu skladování tepla v solární elektrárně viz. Tab. 9. [6]

V systémech akumulace roztavené soli je ekonomicky výhodné použití dvou nádrží, pokud má akumulční systém minimální velikost. Používá se skladování na dobu delší než 3 hodiny, uskladnění na dobu kratší se neprovádí. Na Obr. 8 je vidět, že nejnižší LEC je pro skladování na 12 hodin a při tomto skladování klesne LEC o cca 10 %, o stejnou hodnotu poklesne při srovnatelném referenčním systému. Větší akumulční systémy vedou k vyšším LEC a kromě toho je není možné plně využít z důvodu, že při dobrých slunečních dnech vyrábí kolektory páru 12 hodin a zbylý půl den je pokryt z akumulčních nádrží. Jenže horká nádrž se nesmí zcela vybit, musí v ní zůstat cca 20 % kapacity, což prodražuje akumulaci. Společně s ekonomickým zlepšením se i „kapacitní faktor“ zvyšuje. Třeba u 9 hodinového skladování se doba, při kterém je plné zatížení dvojnásobné oproti systému bez akumulace a dokonce u 15 hodinové akumulace je plné zatížení cca 5000 hodin. [6]



Obr. 8 Cena x doba akumulace [6]

Tab. 9 Výkony a ekonomická analýza akumulace do roztavených solí [6]

Výkony a ekonomická analýza akumulace roztavené soli do dvou nádrží								
Akumulační kapacita	[hod]	0	1	3	6	9	12	15
DNR	[kWh/m ² .rok]	2717						
Nominální výkon	[MW]	50						
Velikost solárního pole	[m ²]	305200	340080	374960	479600	584240	619120	654000
Bloková účinnost	[%]	37,5						
Výkonové								
Provoz		pouze solární						
Solární termální	[GWh/rok]	378	421	484	602	718	789	817
Parní turbína, hrubá	[GWh/rok]	119	133	154	196	238	267	278
„Parasitics“	[GWh/rok]	8	9	12	16	20	25	27
Doba plného zatížení	[hod/rok]	2238	2480	2836	3607	4361	4840	5019
Faktor kapacity	[%]	26	28	32	41	50	55	57
Čistá elektrická energie	[GWh/rok]	111,8	124	141,8	180,4	218	242	250,9
Ekonomika								
Celkové náklady na projekt	[v 1 000 US \$]	118774	138360	155564	192726	229786	253882	277365
Roční náklady na O & M	[za 1 000 USD]	3514	3652	3843	4181	4498	4710	4877
LEC	[US \$/MWh]	141,7	145,2	140,9	134	129,9	128,2	134

6. Experimentální analýza vybíjení a nabíjení

V této kapitole je popsán provedený experiment skladovacího zařízení odkazující se na jediný nalezený zdroj, zabývající se touto problematikou.

Experiment byl proveden na experimentální smyčce Obr. 9 a slouží k nalezení dalších provozních charakteristik solárních elektráren. Pro experiment bylo zvoleno zařízení s dvěma nádržemi určené pro TES, s množstvím 1000 kg obíhající roztavené soli. Zapojení výměníku bylo měněno na protiproudé a souproudé. Typ použitého výměníku je deskový „AlfaNova HP 76-38H“ o parametrech Tab. 10 a navrhnutým na malý teplotní přestup ($3 - 10$ °C). Typ výměníků používaných v CSP je „Shell and tube“, ale v poslední době se začalo s používáním deskových výměníků, důvodem je lepší tepelná účinnost, kompaktnost a pružnost při změnách zatížení. Kromě toho mají deskové výměníky lepší výkon za stejných podmínek, ovšem větší problém je s geometrií, která je na obou stranách stejná. [9]

Při experimentu byli provedeny stejné procesy nabíjení jako u CSP, jen v menším měřítku. Jednou z hlavních částí je topný systém, pro který byl použit elektrický kotel o výkonu 24 kW_e, ohřívající teplotnosné médium. Důležitou částí je chladicí systém složený z výměníku vzduch-teplotnosné médium o výkonu 20 kW, simulující vybíjení pomocí chlazení teplotnosného média. Ve skutečném závodu je výměník teplotnosné médium – voda/pára „parní generátor“, vyrábějící páru pro pohon parní turbíny. Skladovací nádrže, každá o objemu 0,57 m³, které jsou vyrobeny z nerezové oceli 316L. Tvarově jsou nádrže identické se skutečnými nádržemi v závodě CSP. Přecherpaní 1000 kg roztavené soli celou smyčkou zajišťují 2,5 kW čerpadla, umístěna v horní části každé nádrže. Kvůli riziku snížení teploty v potrubí a tím způsobené ochlazení s možným zatuhnutím soli v potrubí, je na potrubí celé smyčky instalované sledovací zařízení spolu s výhřevnými kabely. Poslední důležitou částí je systém sběru dat, kde jsou teplotní, tlakové snímače, průtokoměry a různé jiné systémy, které mají za úkol vyhodnocovat naměřená data. Celý systém je izolovaný minerální vlnou, dna nádrží izoluje „foamglass“ a žáruvzdorný cement, pro co největší snížení tepelných ztrát. [9]

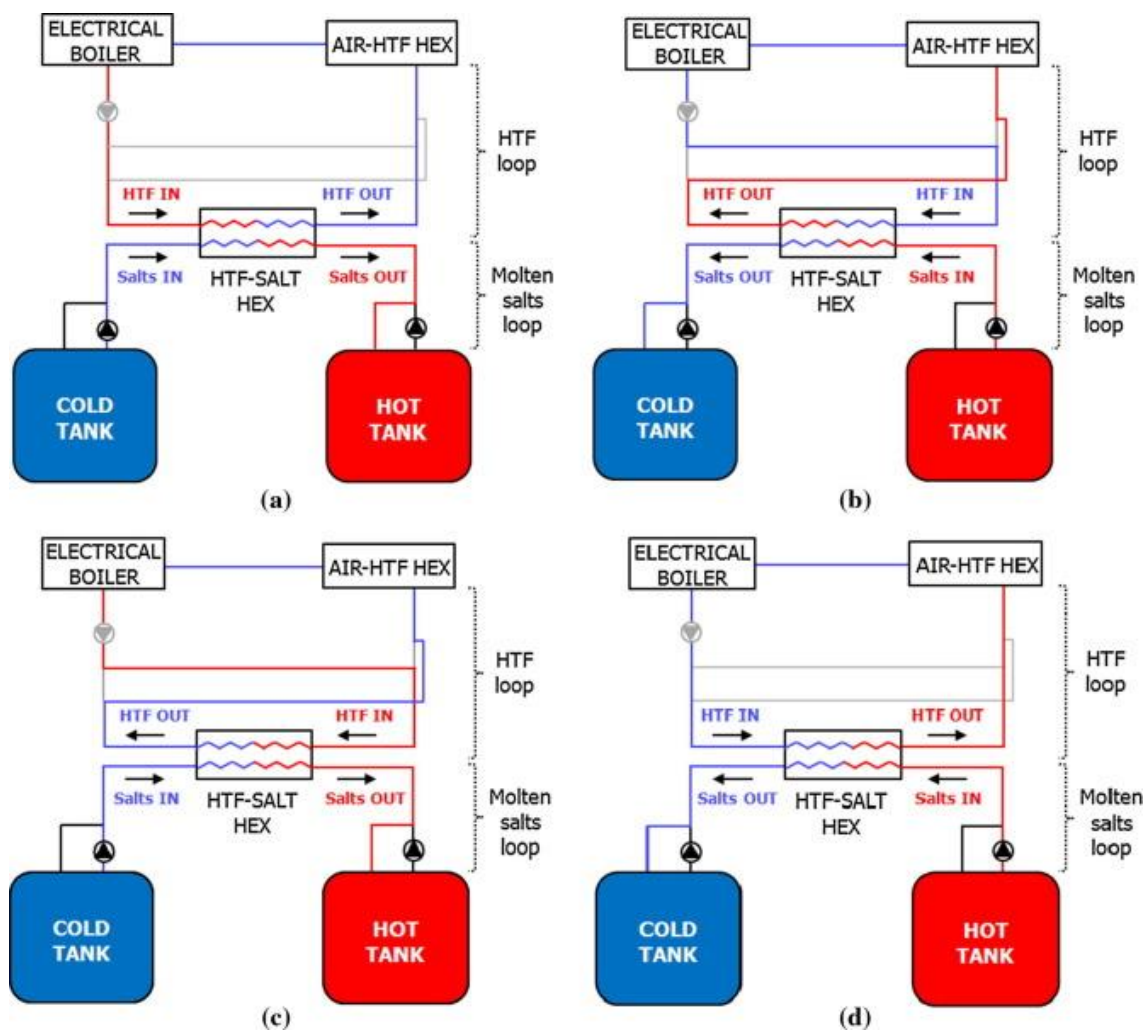


Obr. 9 Experimentální smyčka [9]: (a) elektrický kotol, (b)výměník vzduch-teplonosné médium, (c) horká nádrž roztavené soli, (d) studená nádrž roztavené soli, (e) výměník teplonosné médium-roztavená sůl, (f) smyčka teplonosného média, (g) smyčka roztavené soli, (h) systém vyhodnocení naměřených dat

Tab. 10 Charakteristika deskového výměníku olej x roztavená sůl [9]

Charakteristiky výměníku		Strana tepelného oleje	Strana roztavené soli
Návrhový tlak	[bar]	20	10
Zkušební tlak	[bar]	26	13
Návrhová teplota	[°C]	400	400
Směr proudění		Oba směry	
Rozměry délka x šířka x výška	[mm]	208 x 191 x 618	
Materiál desek		Nerezová ocel 316	
Tloušťka desek	[mm]	0,4	
Počet průchodů		10 (na obou stranách)	
Počet desek	[ks]	38	
Plocha k přenosu tepla A_{Exch}	[m ²]	3,8	

Na Obr. 10 jsou znázorněny čtyři provozní režimy se zapojeným zařízením a viditelným směrem proudění.



Obr. 10 Provozní režimy [9]: (a) nabíjení – souprroudé zapojení, (b) vybíjení – souprroudé zapojení, (c) nabíjení – protiproudé zapojení, (d) vybíjení – protiproudé zapojení

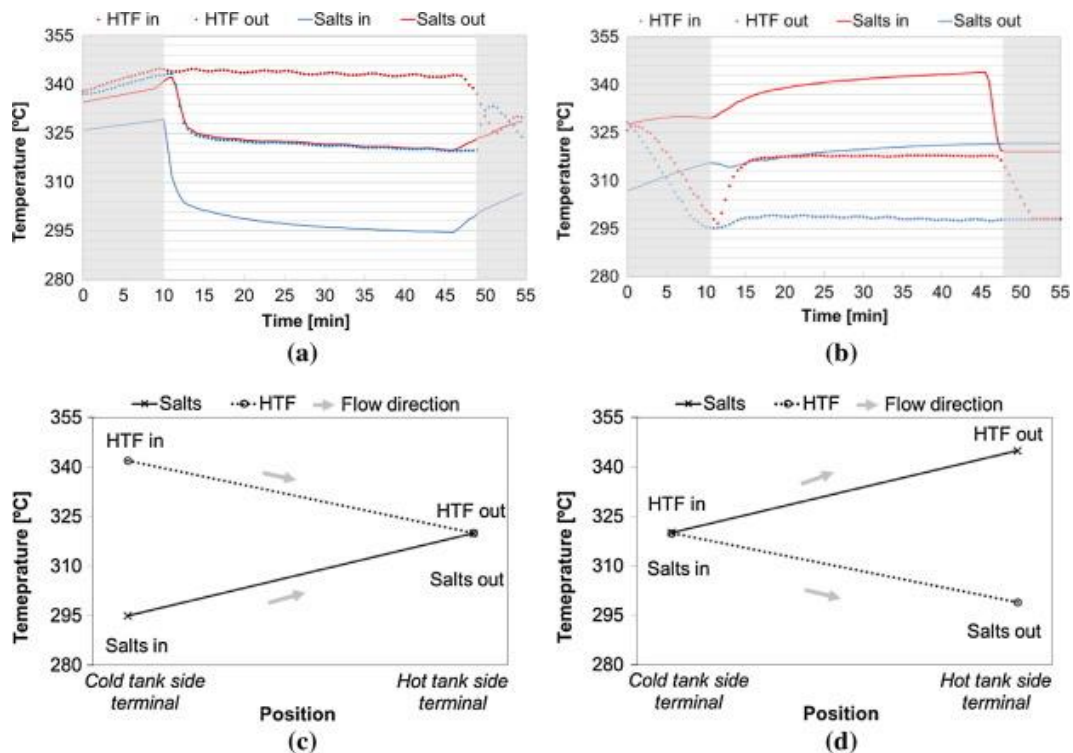
Experimentální měření proběhlo s konstantními hmotnostními průtoky 0,09 kg/s a 0,11 kg/s pro HTF a roztavené soli. Zapojení výměníku, jak už bylo zmíněno bylo souprroudé a protiproudé se vstupními teplotami na výměník 343 ± 3 °C a 373 ± 2 °C. HTF proudí kontinuálně, oproti roztaveným solím, z toho důvodu roztavené soli proudí jen při nabíjení a vybíjení. Tímto opatřením se zabrání ucpání „vzniku špuntu“ způsobené recirkulací soli. [9]

Na Obr. 11, Obr. 12 jsou znázorněny průběhy teplot HTF a roztavené soli na studené nebo horké nádrži. Tečkovanou čarou je v grafu znázorněno HTF a roztavené soli jsou znázorněny plnou čarou. Při procesu nabíjení je horké HTF znázorněno červeně a roztavená „studená“ sůl modře. V případě vybíjení je to naopak červeně je značena roztavená „horká“ sůl a modře studené HTF. [9]

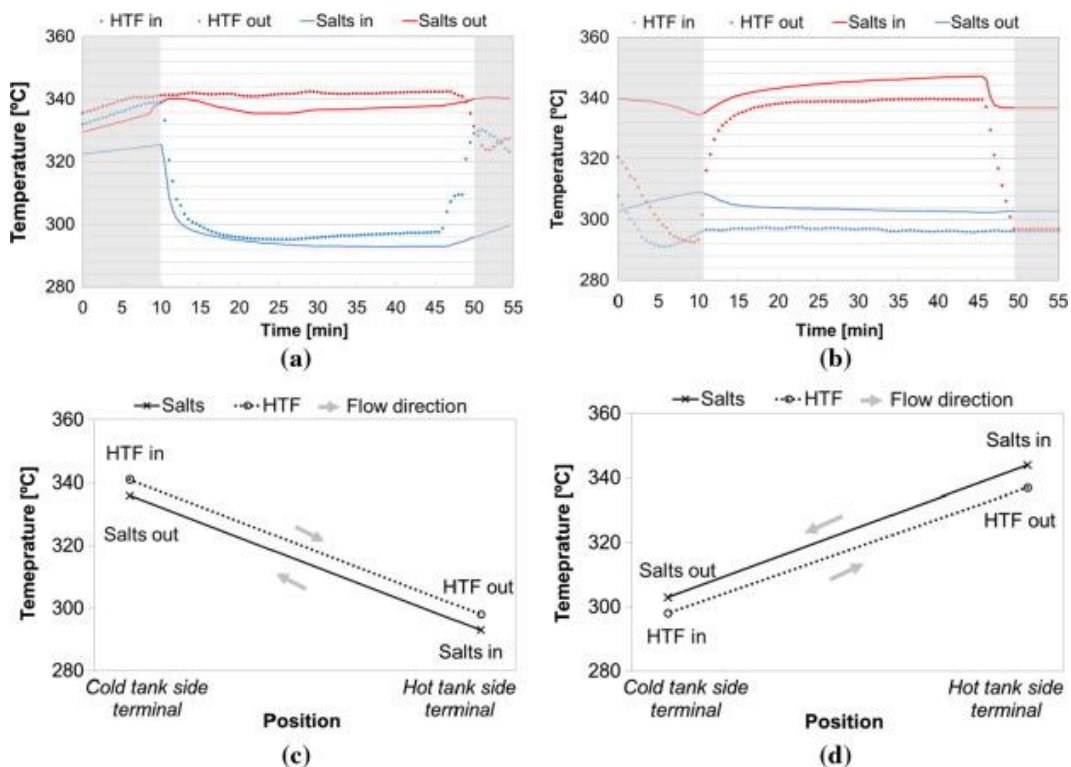
Na Obr. 11 je souprroudé zapojení výměníku s průměrným teplotním rozdílem 46 °C. U nabíjení Obr. 11a,c je teplotní rozdíl 40 °C mezi HTF in a Salts (roztavené soli) in, tedy vstup HTF a soli. Postupem času se rozdíl zvýšil o 6 °C až na konečný teplotní rozdíl 46 °C, z důvodu poklesu vstupní teploty soli Salts in. Teplotní rozdíl u HTF out a Salts out je nepatrný, vlivem tepelných ztrát, které mají klesající tendenci. V případě vybíjení Obr. 11b,d je teplotní rozdíl 32 °C mezi HTF in a Salts in, rozdíl se ještě zvýšil o 12 °C na konečných 46 °C, před dosažením ustáleného stavu, vlivem zvýšení teploty na vstupu soli do výměníku. Na výstupech ze souprroudého výměníku byl teplotní rozdíl cca 10 °C mezi

HTF out a Salts out, ale rychle se snížil na rozdíl 2 °C před dosažení ustáleného stavu, snížení rozdílu je způsobeno rychlým zvýšením teploty výstupního teplotního média. [9]

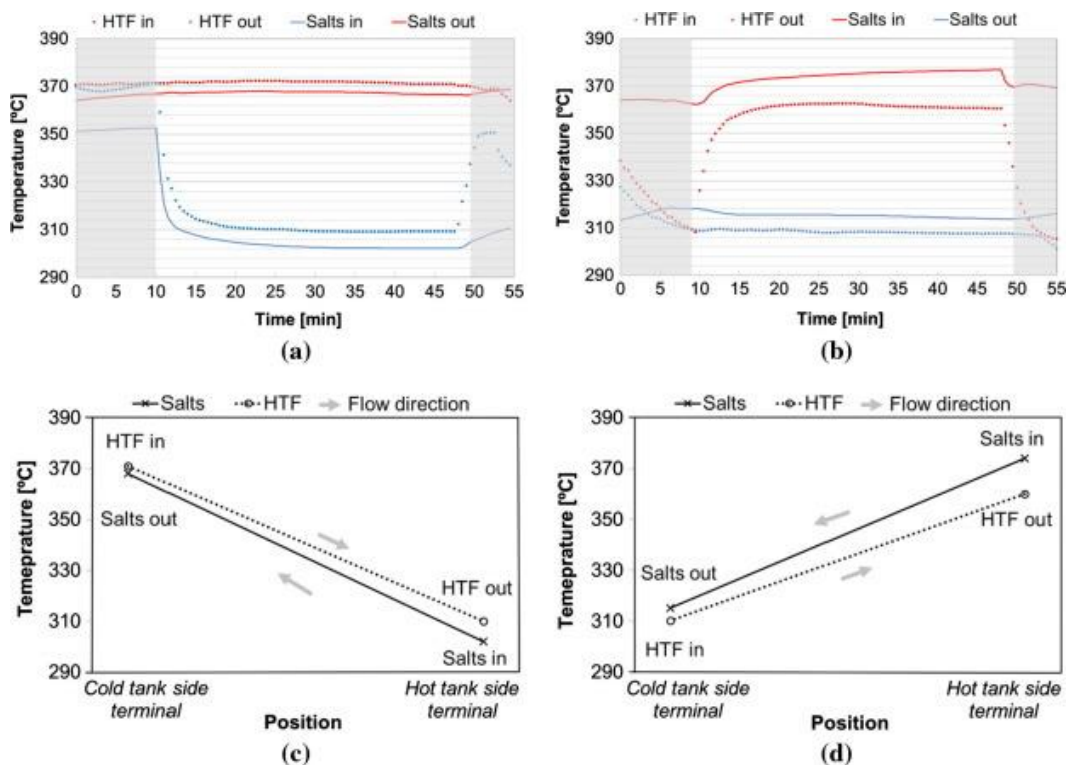
Na Obr. 12 protiproudé zapojení výměníku je průměrný teplotní rozdíl 46 °C jako u souproutého výměníku. Po nějaké době nabíjení obr. 13a,c došlo ke zvýšení teplotního rozdílu o 5 °C mezi HTF out a Salts in, z důvodu snížení teploty vstupující soli. Stejně to je mezi HTF in a Salts out, kde po kratší době došlo také ke zvýšení teplotního rozdílu o 5 °C, vlivem snížení teploty výstupní soli. Vybíjení Obr. 12b,d protiproudé zapojení výměníku probíhá při teplotním rozdílu 15 °C za ustáleného stavu mezi HTF in a Salts out. Mezi HTF out a Salts in je počáteční teplotní rozdíl 5 °C, který vzrostl na konečný 10 °C, vlivem zvýšení teploty na vstupu soli. Na Obr. 13 je stejné protiproudé zapojení výměníku i jednotlivé průběhy probíhali stejně jako v předešlém protiproudém zapojení, jen průměrný teplotní rozdíl je 68 °C. V obou případech zapojení je možné, dosáhnout u chladných médií HTF a soli, vyšších výstupních teplot cca o 7 %. „Teplotní rozdíl mezi HTF a solemi je více jednotný a může dosáhnout většího potenciálního využití energie.“ [9]



Obr. 11 Vývoj teploty podle časového a průměrného rozložení teploty v souproutém zapojení: Experiment 1, 2 [9]: (a) a (c) nabíjení, (b) a (d) vybíjení

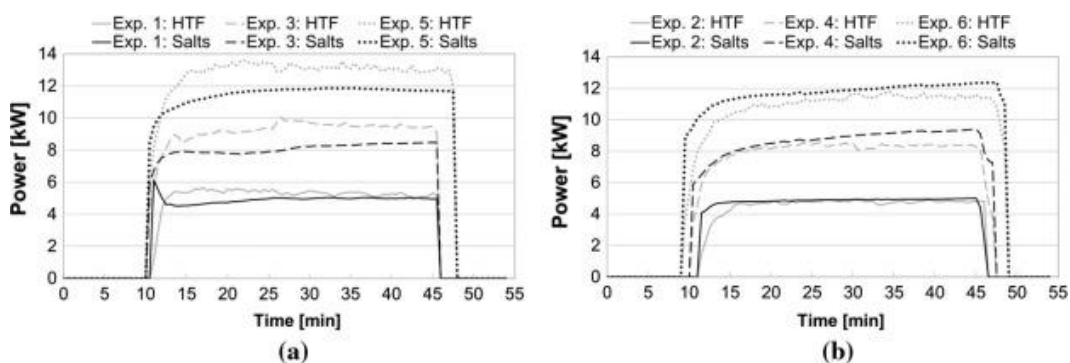


Obr. 12 Vývoj teploty podle časového a průměrného rozložení teploty v protiproudém zapojení: Experiment 3, 4 [9]: (a) a (c) nabíjení, (b) a (d) vybíjení



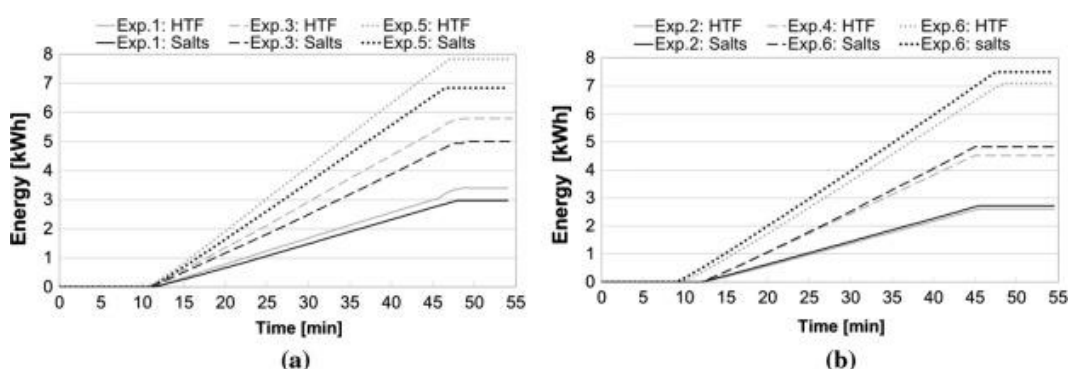
Obr. 13 Vývoj teploty podle časového a průměrného rozložení teploty v protiproudém zapojení: Experiment 5, 6 [9]: (a) a (c) nabíjení, (b) a (d) vybíjení

Na Obr. 14 je patrné, že pro vyšší výkony je jednoznačně vhodnější protiproudé zapojení výměníku. Oproti souprůdému (exp. 1, 2) zapojení je protiproudé (exp. 3, 4) skoro 2x větší a v případě protiproudého s vyšším (exp. 5, 6) teplotním rozdílem skoro 3x větší. [9]



Obr. 14 Grafy výkonů kW jednotlivých zapojení [9]: (a) nabíjení, (b) vybíjení

U výkonu Obr. 14 jednotlivých zapojení je samozřejmé, že i u výkonu na Obr. 15 jsou nejnižší hodnoty pro souproudé zapojení a vyšší hodnoty pro protiproudé zapojení a v případě protiproudého s vyšším teplotním profilem jsou i tyto hodnoty vyšší. [9]



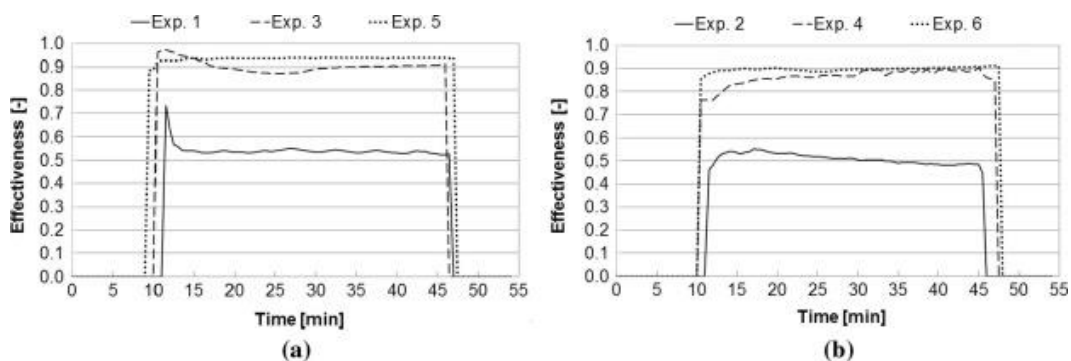
Obr. 15 Grafy výkonu kWh jednotlivých zapojení [9]: (a) nabíjení, (b) vybíjení

Jak je vidět v Tab. 11 nejlepších účinností výměny tepla η se dosáhlo při protiproudém zapojení výměníku. Podobně jsou výsledky energie získané E a výkon Q , který je také cca 2x větší u protiproudého zapojení a v případě protiproudého s vyšším teplotním rozdílem je skoro 3x větší oproti souproudému zapojení.

Tab. 11 Výsledky experimentu [9]

Exp.	Proces	Tok	ΔT [°C]	Q_{HTF} [kW]	Q_{Salts} [kW]	E_{HTF} [kWh]	E_{Salts} [kWh]	η [-]	ϵ [-]	
1	Nabíjení	Souproud	46 ± 3	5,34	4,9	3,4	2,97	0,92	0,54	
2	Vybíjení			4,72	4,85	2,61	2,72	0,97	0,57	
3	Nabíjení	Protiproud		9,35	8,11	5,8	4,94	0,87	0,91	
4	Vybíjení			8,16	8,67	4,52	4,93	0,94	0,87	
5	Nabíjení	Protiproud		68 ± 1	13,03	11,59	7,84	6,84	0,89	0,94
6	Vybíjení				11,12	11,75	7,09	7,5	0,94	0,9

Na Obr. 16 je vidět efektivita jednotlivých typů zapojení. Nejnižší efektivita je pro souproudé zapojení, oproti oběma protiproudým zapojení mající prakticky stejnou efektivitu. U protiproudého zapojení je vidět, že na efektivitě nemá velký vliv velikost teplotního rozdílu. [9]

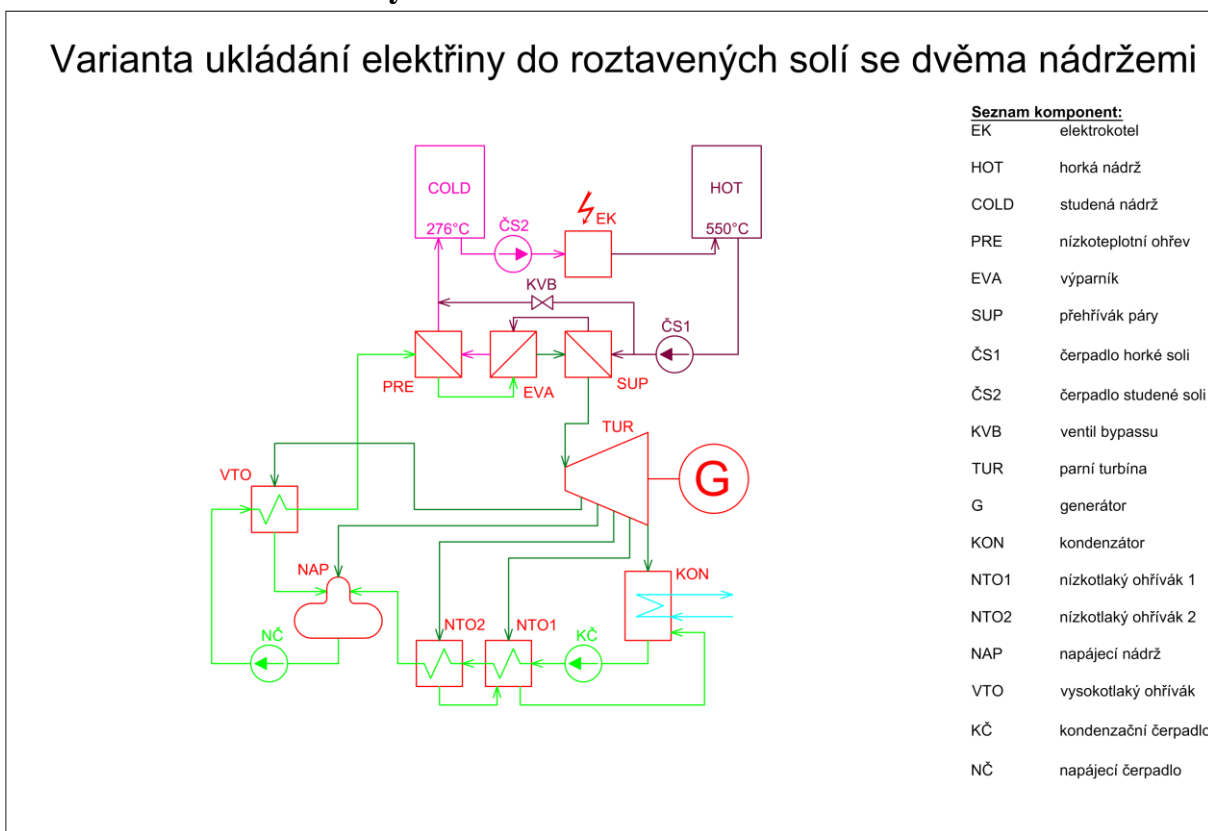


Obr. 16 Grafy efektivity jednotlivých zapojení [9]: (a) nabíjení, (b) vybíjení

7. Koncepční návrh zařízení pro skladování elektrické energie v roztavených solích

Navrhnutý oběh Obr. 17 je složen ze solného a parního okruhu. Solný okruh je primární a teplonosným médiem je roztavená sůl, která proudí přes svazek výměníků a předává teplo do parního (sekundárního) okruhu, kde teplonosným médiem je pára/voda. Na kondenzátor je připojen chladicí (terciální) okruh, ale ten nebudeme dále řešit.

7.1. Okruhy



Obr. 17 Varianta oběhu pro ukládání elektřiny do roztavených solí se dvěma nádržemi

7.1.1. Solný okruh

Solný okruh je složen ze dvou podobně velkých skladovacích nádrží, elektrokotle, svazku výměníků, čerpadel, V době přebytku elektřiny v rozvodné síti je médium přečerpáno pomocí čerpadla ze studené nádrže do elektrokotle, ohřívající primární médium na admisní parametry. Ohřáté médium proudí z elektrokotle do horké nádrže, kde je skladováno, než přijde čas na jeho zpětné využití energie. Pokud je v rozvodné síti nedostatek elektřiny, začne se přečerpávat ohřáté médium z horké nádrže pomocí čerpadla přes svazek výměníků. Ve výměnících předá médium akumulovanou energii a proudí do studené nádrže. Ve studené nádrži je médium skladováno při emisních parametrech dostatečně vysokých, aby nemohlo nastat zatuhnutí média v nádrži. Pro případ, že by nebylo potřeba delší dobu vyrábět elektřinu a nemohlo tak dojít k významnému poklesu teploty, způsobující zatuhnutí média ve studené nádrži je udělán „bypass“ výměníků. Tento „bypass“ umožňuje přepouštět médium z horké nádrže do studené nádrže, aniž by prošlo výměníky.

7.1.2. Parní okruh

Parní okruh je složen ze svazku výměníků, turbíny s generátorem, kondenzátorem, napájecí nádrží, nízkotlakými a vysokotlakým ohřívákem, kondenzátním a napájecím čerpadlem, Teplo je předáno ze solné do parní části výměníků, proudí ve formě přehřáté páry na parní turbínu. Turbína transformuje tlakovou energii na rotační energii, která je předána přes spojovací hřídel se spojkou generátoru. Ten transformuje rotační energii na elektrickou energii. Použitá turbína je odběrová pro odběry páry pro ohříváky a napájecí nádrž. Pára, která předala energii proudí ve formě vlhké páry do kondenzátoru, kde zkondenzuje, pomocí chladicího okruhu kondenzátoru. Chladicí část kondenzátoru je tvořena trubkovým svazkem, přes který proudí chladicí voda terciálního okruhu, odvádějící kondenzační teplo. Z kondenzátoru je kondenzát čerpán kondenzátním čerpadlem do prvního nízkotlakého ohříváku NTO1 a poté do NTO2. Oba NTO ohříváky jsou ohřívány odběrovou parou z turbíny, kde jednotlivé odběry odebírají páru o jiných parametrech. Odběrová pára v NTO zkondenzuje a předá kondenzační teplo napájecí vodě, procházející daným NTO. Z NTO2 proudí kondenzát o značném citelném teple do NTO1, který ještě přehřeje a díky tomu nemusí být odběr páry pro NTO1 tak velký. Z NTO1 proudí kondenzát, který v tomto NTO zkondenzoval spolu s kondenzátem z předešlého NTO do kondenzátoru. Napájecí voda ohřátá dvěma NTO jde do napájecí nádrže s „odplyňovákem“, kde dojde k termickému odplynění napájecí vody. Termické odplynění je pomocí odběrové páry z turbíny a vzniklý kondenzát se smísí s napájecí vodou, a proto napájecí nádrž počítáme také do NTO ohříváku. Dále slouží jako zásobárna napájecí vody o teplotě minimálně 105 °C, při které probíhá termické odplynění. Z napájecí nádrže je napájecí voda čerpána napájecím čerpadlem přes vysokotlaký ohřívák VTO, v něm je stejně jako NTO ohříván odběrovou parou z turbíny. Vzniklý kondenzát proudí z VTO do napájecí nádrže. Napájecí voda přehřátá tímto VTO proudí přes výměníky a cyklus se opakuje.

7.2. Médium primárního okruhu

Pomocí odlišných vlastností jednotlivých solí jde při různém množství dané soli, ovlivnit konečné vlastnosti vzniklé směsi. My budeme dále používat tři směsi solí, používané nejvíce v solárních elektrárnách s akumulací. Čísla před jednotlivými chemickými značkami značí procentní složení jednotlivých složek v dané směsi. Průběh parametrů směsí solí při různých teplotách jsou zobrazeny na Obr. 18 až Obr. 21.

7.2.1. Směs 60NaNO₃ - 40KNO₃

Jde o směs dusičnanu sodného a dusičnanu draselného, používané v rozsahu provozní teploty směsi 260 – 550 °C. Výhodou této směsi je vysoký koeficient přenosu tepla, vysoká tepelná kapacita, vysoká hustota a provoz za nízkých tlaků. Z hlediska bezpečnosti jsou tyto směsi nehořlavé a netoxické, což zvyšuje jejich nasazení v primárním okruhu.

Pro výpočty v následujících kapitolách bude tato sůl nazývána solí A.

Vzhledově je tato látka krystalicky bílá v pevném skupenství a jasně žlutá v kapalném skupenství. Bod tání této látky je při teplotě 238 – 241 °C. [10] Do následujících korelací pro tuto sůl dosazujeme teplotu T ve °C.

Hustota vypočítáme přes následující korelaci [9]:

$$\rho = 0,636 \cdot T + 2089,905 \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (7.1)$$

Pro výpočty jsem použil hustotu pro tuto sůl získanou z programu Engineering Equation Solver EES, protože z této korelace vychází hustota s velkou odchylkou od hustoty získané z programu EES. U této korelace hodnota hustoty roste s rostoucí teplotou. V EES to vychází naopak s rostoucí teplotou klesá hustota a stejný průběh mají i podobné soli.

Měrná tepelná kapacita získáme z následující korelaci [9]:

$$c_p = 1,723 \cdot 10^{-4} \cdot T + 1,443 \text{ [kJ/kg} \cdot \text{K]} \quad (7.2)$$

Tepelnou vodivost získáme z následující korelaci [9]:

$$\lambda = 1,9 \cdot 10^{-4} \cdot T + 0,443 \text{ [W/m} \cdot \text{K]} \quad (7.3)$$

Kinematikou viskozitu vypočítáme přes následující korelaci [9]:

$$\vartheta = -6,557 \cdot 10^{-14} \cdot T^3 + 1,05 \cdot 10^{-10} \cdot T^2 - 5,706 \cdot 10^{-8} \cdot T + 1,112 \cdot 10^{-5} \text{ [m}^2\text{/s]} \quad (7.4)$$

7.2.2. Směs 45NaNO₃-55KNO₃

Tato směs je dosti podobná svými vlastnostmi směsi 60NaNO₃ - 40KNO₃, jen jde o jiné složení směsi. Použité hodnoty této směsi jsou vzaty z výpočtového programu EES.

Pro výpočty v následujících kapitolách bude tato sůl nazývána solí B.

7.2.3. Směs 7NaNO₃-49 NaNO₂-44 KNO₃

Jedná se o směs tří solí: dusičnan sodný, dusitan sodný a dusičnan draselný. U této směsi dosazujeme do následujících korelací teplotu T v K.

Pro výpočty v následujících kapitolách bude tato sůl nazývána solí C.

Hustota vypočítáme přes následující korelaci [11]:

$$\rho = 2293,6 - 0,7497 \cdot T \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (7.5)$$

Korelace je platná v rozmezí teplot 470–870 K s nejistotou $\pm 2 \%$

Měrná tepelná kapacita se vypočítá přes následující korelaci [11]:

$$c_p = 5806 - 10,833 \cdot T + 7,2413 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 \text{ [J/kg} \cdot \text{K]} \quad (7.6)$$

Korelace je platná v rozmezí teplot 426–776 K s nejistotou $\pm 5 \%$.

Dynamickou viskozitu získáme z následující korelace [11]:

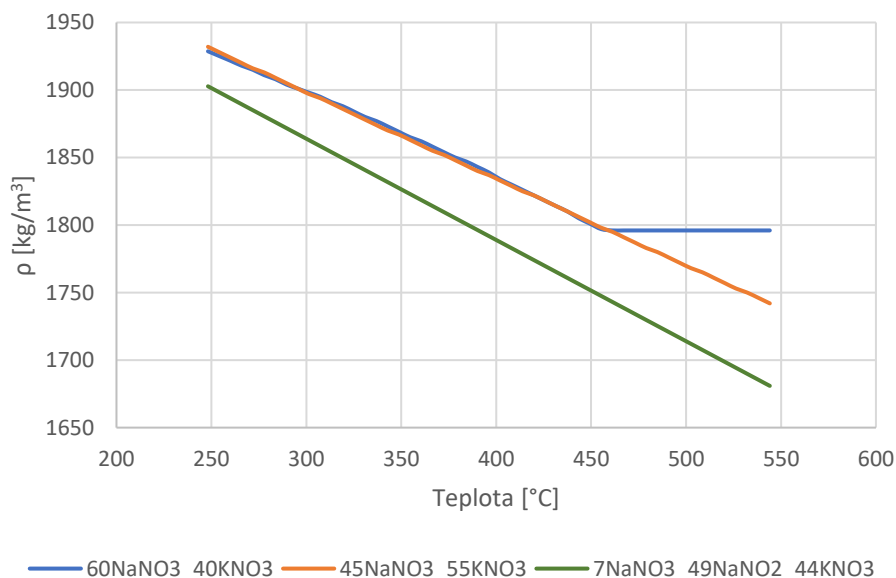
$$\mu = 0,4737 - 2,297 \cdot 10^{-3} + 3,731 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 - 2,019 \cdot 10^{-9} \cdot T^3 \text{ [Pa} \cdot \text{s]} \quad (7.7)$$

Korelace je platná v rozmezí teplot 420–710 K s nejistotou $\pm 16 \%$.

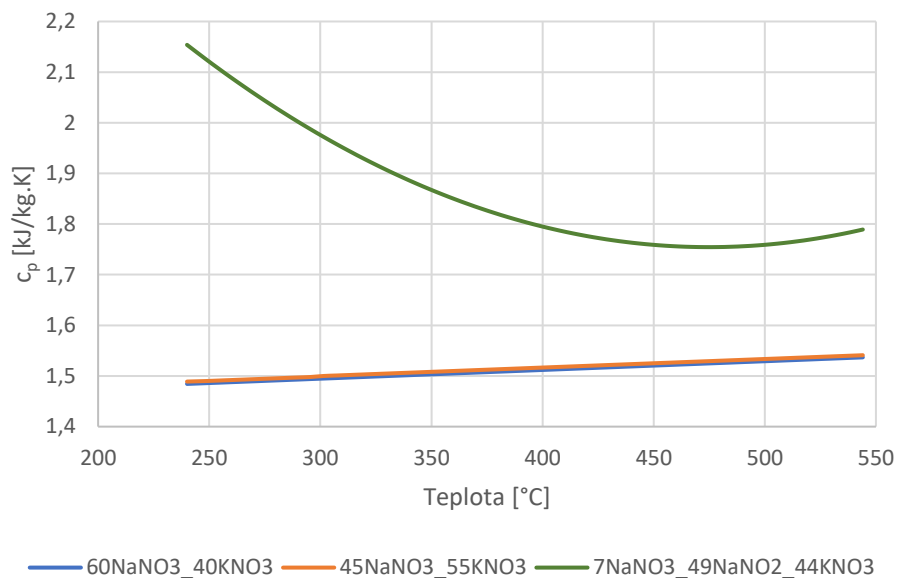
V této korelaci (7.7) je chyba, podle ní vychází dynamická viskozita velmi velká oproti jiným solím. Následující korelace je opravena o chybějící člen T.

$$\mu = 0,4737 - 2,297 \cdot 10^{-3} \cdot T + 3,731 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 - 2,019 \cdot 10^{-9} \cdot T^3 \text{ [Pa} \cdot \text{s]} \quad (7.8)$$

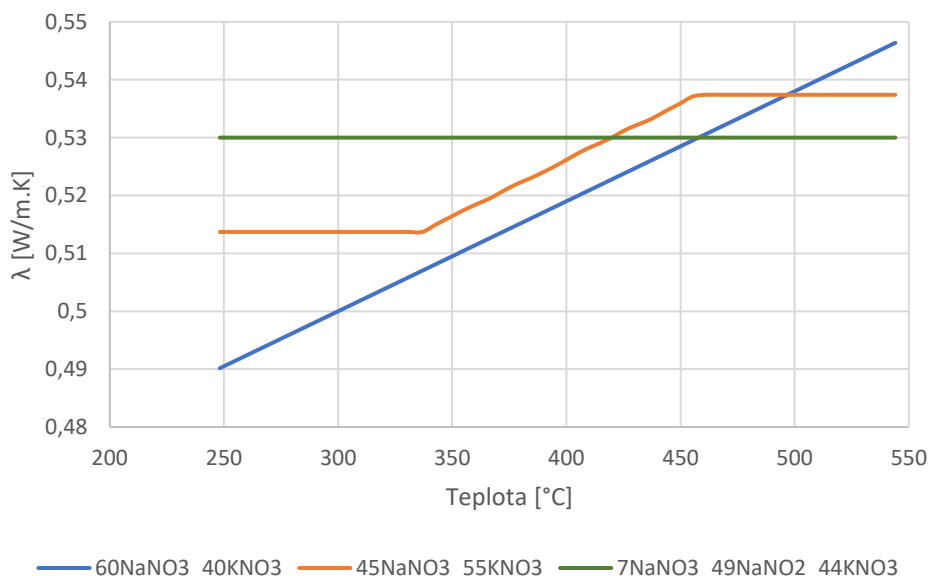
V podkladech pro tuto sůl není korelace pro výpočet tepelné vodivosti, z tohoto důvodu jsem použil konstantní hodnotu $\lambda = 0,53 \text{ W/m} \cdot \text{K}$. Tato hodnota patří do oblasti tepelné kapacity pro tuto sůl $\lambda = 0,51 - 0,61 \text{ W/m} \cdot \text{K}$. [11]



Obr. 18 Závislost hustoty na teplotě a typu směsi

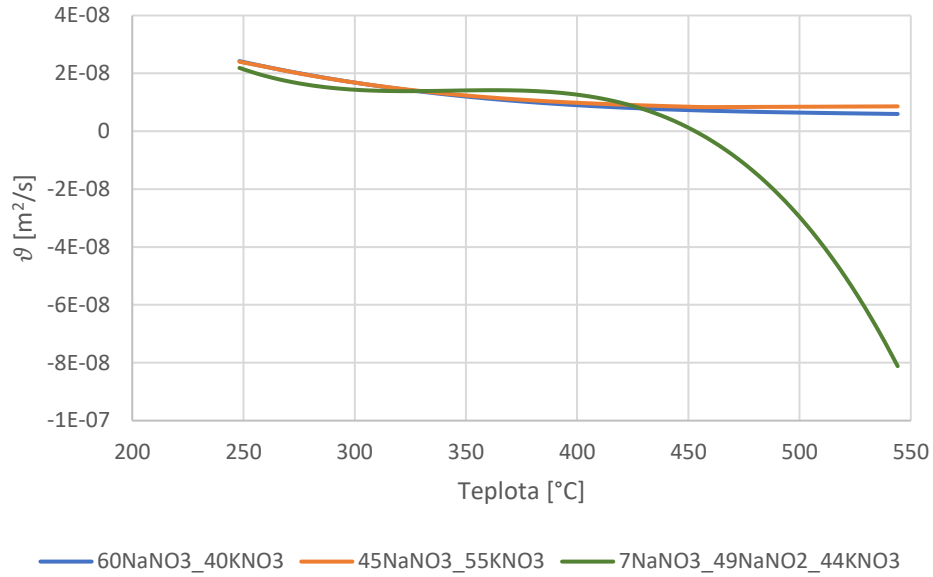


Obr. 19 Závislost měrné tepelné kapacity na teplotě a typu směsi



Obr. 20 Závislost tepelné vodivosti na teplotě a typu směsi

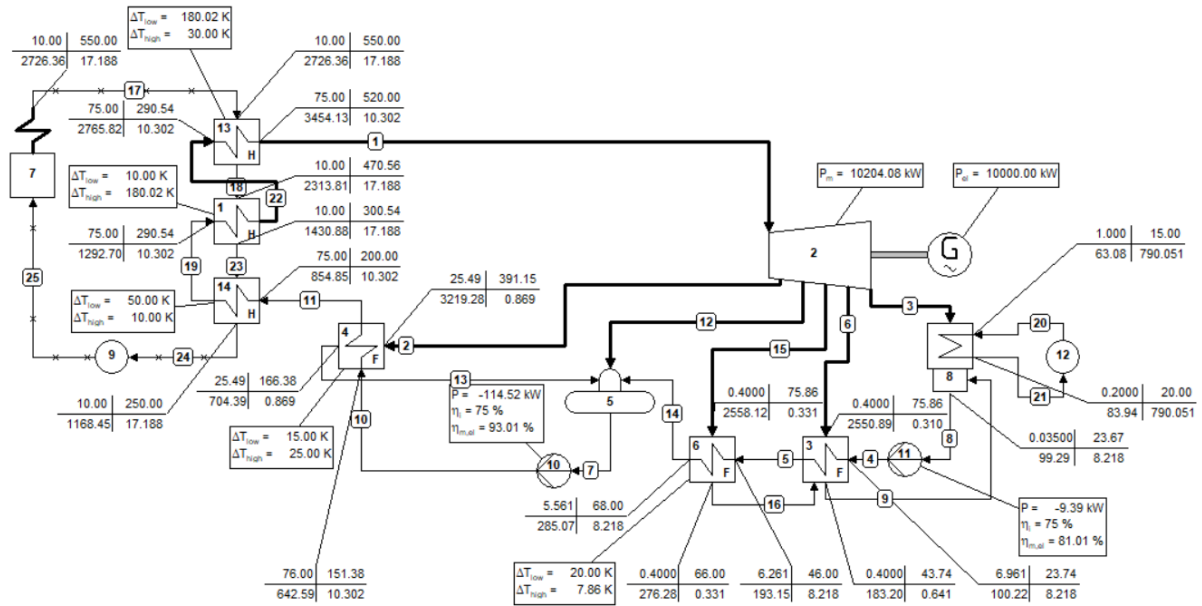
Na Obr. 21 kinematické viskozity směsi je vidět, že křivka pro sůl 7NaNO₃-49 NaNO₂-44 KNO₃ přechází do záporných hodnot při cca 450 °C. Je možné, že kromě již zmíněné chyby v korelaci pro dynamickou viskozitu, to není jediná již zmíněná chyba. Pro další výpočty je uvažovaná kinematické viskozity $\nu = 7,16 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, odpovídající teplotě 431,6 °C, která je před prudkým poklesem do záporných hodnot kinematické viskozity. Zvolená náhradní hodnota kinematické viskozity se nachází v oblasti zbývajících směsí.



Obr. 21 Závislost kinematické viskozity na teplotě a typu směsi

7.3. Výpočtový model

Model oběhu Obr. 22 je vytvořen v programu Cycle-Tempo CT a slouží ke zjištění tlaků, teplot na jednotlivých zařízení oběhu. Vstupní hodnoty pro návrh a hodnoty výstupní jsou v Tab. 12. Oběh se skládá z reálného parního okruhu a ideálního okruhu, kde médium je 100 % Argon, sloužící pouze k získání teplot na výměnících.



Obr. 22 Model celého oběhu

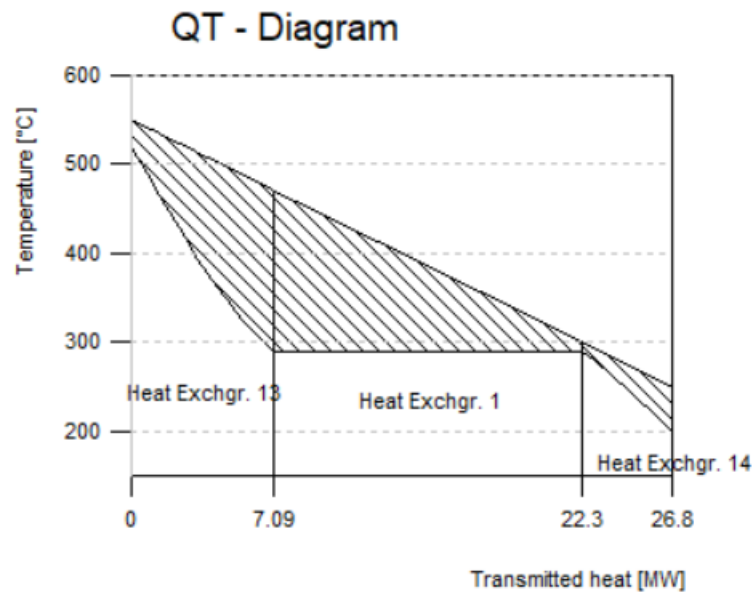
Tab. 12 Hodnoty zadané a získané ze CT

Zařízení solné části						
Číslo CT	Zařízení	P_{out} [bar]	t_{out} [°C]	Δp [bar]	P_{jmen} [MW]	η [%]
7	Elektrokotel	10	550	0		80
13	Superheater		470,56	0		
1	Evaporator		300,54	0		
14	Preheater		250	0		
9	Čerpadlo okruh.		250			
Zařízení parní části						
13	Superheater	75	520	0		
1	Evaporator		290,54	0		
14	Preheater		290,54	0		
2	Turbína	0,035	26,67		10	84 98(mech)
8	Kondenzátor	0,035	23,67	0		
8 (12)	Kondenzátor terciální okruh	0,2	20	0,8		
11	Kondenzátní čerpadlo	6,96	23,74			75
3	NTO 1	6,26	46	0,7		
	NTO 1 - odběr.	0,4	43,74	0		
6	NTO 2	5,56	68	0,7		
	NTO 2 - odběr.	0,4	66	0		
5	Napájecí nádrž s oplyněním		150	0,8		
10	Napájecí čerpadlo	76	151,38			75
4	VTO		200	1		
	VTO - odběr.	25,49	166,38	0		

Hodnoty v modrých buňkách jsou zadané (vstupní) a hodnoty bílých buněk jsou získané (výstupní).

Diagram přeneseného tepla výměníky:

Q-T diagram na Obr. 23 je z programu CT a je na něm vidět ohřev napájecí vody ve výměníku č. 14, poté fázová změna - var ve výměníku č. 1 a v posledním výměníku č. 13 ohřev páry na výstupní teplotu. Kromě teploty výstupní a vstupní v jednotlivých výměnících je i na horizontální ose zobrazeno převedené teplo jednotlivými výměníky.



Obr. 23 QT - diagram svazku výměníků

8. Návrh akumulčních nádrží

V následující části je proveden návrh akumulčních nádrží pro různou dobu skladování roztavených směsí. Jedná se o vertikální nádrže vyrobené z nerezové oceli 316. Pro výpočet byla uvažována plochá dna nádrží, z důvodu zjednodušení geometrie při výpočtu. Dalším hlediskem pro použití plochých dnů je nízký provozní tlak, při kterém je zbytečné použití klenutých dnů.

Ve výpočtech akumulčních nádrží a výměníku není uvažován přestup tepla sáláním, důvodem je zjednodušení výpočtů. Větší vliv má přestup tepla vedením, oproti sálání, které bývá uvažováno při teplotě vyšší než 500 °C. V naší aplikaci je max. teplota soli 550 °C v horké nádrži a SUPERHEATERU.

Požadovaná doba výroby elektřiny:

Doba kontinuální výroby elektřiny na generátoru při plném zatížení turbíny a plné nabytí horké nádrže.

$$\text{doba výroby} = 4, 8, 12, 24 \text{ [hod]} \quad (8.1)$$

Množství napájecí vody/přehřáté páry v sekundárním okruhu:

$$\dot{m}_w = \dot{m}_p = 10,302 \text{ [kg/s]} \quad (8.2)$$

Provozní tlak napájecí vody:

$$p_v = 75 \text{ [bar]} \quad (8.3)$$

Vstupní teplota napájecí vody PREHEATRU:

$$t_{inPREw} = 200 \text{ [°C]} \quad (8.4)$$

Vstupní entalpie při teplotě vstupující napájecí vody do PREHEATRU:

$$p_v = 75 \text{ [bar]}, t_{in_{PREw}} = 200 \text{ [}^\circ\text{C]} \rightarrow I_{in_{PREw}} = 854,848 \text{ [kJ/kg]} \quad (8.5)$$

Výstupní teplota přehřáté páry SUPERHEATRU:

$$t_{out_{SUPp}} = 520 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (8.6)$$

Výstupní entalpie při teplotě vystupující přehřáté páry z SUPERHEATRU:

$$p_v = 75 \text{ [bar]}, t_{out_{SUPp}} = 520 \text{ [}^\circ\text{C]} \rightarrow I_{out_{SUPp}} = 3\,454,13 \text{ [kJ/kg]} \quad (8.7)$$

Výkon výměníku SUP, EVA, PRE:

Tento výkon je nutné přenést přes výměníky ze solného okruhu do parního okruhu, pro získání požadovaného výkonu $P_{gen} = 10 \text{ [MWe]}$ na generátoru.

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{PRE,SUP,EVA} &= \dot{m}_{w,P} \cdot (I_{out_{SUPp}} - I_{in_{PREw}}) = 10,302 \cdot (3\,454,13 - 854,848) \\ &= 26\,777,8 \text{ [kW]} \end{aligned} \quad (8.8)$$

Účinnost sekundárního okruhu:

V této účinnosti je zahrnuto převedení tepla na výměnících, účinnost turbíny a generátoru.

$$\eta_{w,P} = \frac{P_{gen}}{\dot{Q}_{PRE,SUP,EVA}} = \frac{10 \cdot 10^3}{26\,777,8} = 0,373 \text{ [-]} \rightarrow \eta_{w,P} = 37,3 \text{ [%]} \quad (8.9)$$

Potřebná akumulovaná kapacita soli:

$$\begin{aligned} P_{aku_{hot}} &= \text{doba výroby} \cdot \dot{Q}_{PRE,SUP,EVA} \cdot (1 + \eta_{w,P}) = 4 \cdot 26\,777,8 \cdot 10^{-3} \cdot (1 + 0,373) \\ &= 147 \text{ [MWh]} \end{aligned} \quad (8.10)$$

Při výpočtu jsme akumulovanou kapacitu zvětšily, o účinnost sekundárního okruhu, z důvodu požadavku na plynulou dobu vybíjení, nejméně 4 hodiny.

Zvolená teplota horké nádrže:

$$t_{hot_s} = 550 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (8.11)$$

Teplota studené nádrže:

$$t_{col_s} = 250 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (8.12)$$

Střední teplota roztavené soli ve výměnících (mezi nádržemi):

$$t_{stř_{aku_s}} = \frac{t_{hot_s} + t_{col_s}}{2} = \frac{550 + 250}{2} = 400 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (8.13)$$

Měrná tepelná kapacita roztavené soli při střední teplotě ve výměnících:

$$t_{stř_{aku_s}} = 400 \text{ [}^\circ\text{C]} \rightarrow c_{p_{stř_{aku_s}}} = 1,5111 \text{ [kJ/kg} \cdot \text{K]} \quad (8.14)$$

8.1.1. Akumulované množství soli

Akumulované množství soli v nádrži:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta t \text{ [kW]} \quad (8.15)$$

$$P_{aku_{hot}} = m_S \cdot \frac{c_{p_{střaku_S}}}{3600} \cdot \Delta t_S \text{ [kWh]} \quad (8.16)$$

$$m_S = \frac{P_{aku_{hot}}}{c_{p_{střaku_S}} \cdot (t_{hot_S} - t_{col_S})} = \frac{147 \cdot 10^3 \cdot 3600}{1,5111 \cdot (550 - 250)} = 1\,167\,247 \text{ [kg]} \quad (8.17)$$

Hustota soli a objem horké nádrže:

$$t_{hot_S} = 550 \text{ [}^\circ\text{C]} \rightarrow \rho_{hot_S} = 1796 \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (8.18)$$

$$V_{hot_S} = \frac{m_S}{\rho_{hot_S}} = \frac{1\,167\,247}{1796} = 650 \text{ [m}^3\text{]} \quad (8.19)$$

Hustota soli a objem studené nádrže:

$$t_{col_S} = 250 \text{ [}^\circ\text{C]} \rightarrow \rho_{col_S} = 1929 \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (8.20)$$

$$V_{col_S} = \frac{m_S}{\rho_{col_S}} = \frac{1\,167\,247}{1929} = 605 \text{ [m}^3\text{]} \quad (8.21)$$

8.1.2. Rozměry nádrží

Rozměry studené nádrže:

Rozměry horké nádrže určíme zvolením průměru nádrže a dopočítáním výšky. Snahou je, aby výška se rovnala nebo byla blízká průměru.

$$\text{volím } D_{i_{hot_S}} = 9 \text{ [m]} \quad (8.22)$$

Výška nádrže:

$$V_{hot_S} = S_{hot_S} \cdot h_{i_{hot_S}} \rightarrow h_{i_{hot_S}} = \frac{V_{hot_S}}{S_{hot_S}} = \frac{V_{hot_S} \cdot 4}{\pi \cdot D_{i_{hot_S}}^2} = \frac{605 \cdot 4}{\pi \cdot 9^2} = 10 \text{ [m]} \quad (8.23)$$

Rozměry studené nádrže:

Stejně jako u horké nádrže, tak i u studené nádrže zvolíme průměr a dopočítáme výšku.

$$\text{volím } D_{i_{col_S}} = 9 \text{ [m]} \quad (8.24)$$

Výška nádrže:

$$V_{colS} = S_{colS} \cdot h_{i_{colS}} \rightarrow h_{i_{colS}} = \frac{V_{colS}}{S_{colS}} = \frac{V_{colS} \cdot 4}{\pi \cdot D_{i_{colS}}^2} = \frac{605 \cdot 4}{\pi \cdot 9^2} = 10 [m] \quad (8.25)$$

V Tab. 13 jsou porovnány vypočítané parametry množství soli a rozměry nádrží pro jednotlivou dobu akumulace.

Tab. 13 Parametry akumulčních nádrží I

Doba akumulace		[hod]	4	8	12	24
$P_{aku_{hot}}$	Akumulovaný výkon	[MWh]	147	294	441	883
$t_{stř_{aku_S}}$	Střední teplota nádrží	[°C]	400			
$c_{p_{stř_{aku_S}}}$	sůl A	[kJ/kg.K]	1,511			
	sůl B		1,516			
	sůl C		1,799			
Akumulované množství soli						
m_S	sůl A	[kg]	1 167 247	2 334 494	3 501 742	7 011 424
	sůl B		1 163 588	2 327 177	3 490 765	6 989 446
	sůl C		980 348	1 960 696	2 941 044	5 888 758
t_{hot_S}	Teplota horké nádrže	[°C]	550			
ρ_{hot_S}	sůl A	[kg/m ³]	1 796			
	sůl B		1 738			
	sůl C		1 676			
Akumulované množství v horké nádrži						
V_{hot_S}	sůl A	[m ³]	650	1 300	1 950	3 904
	sůl B		669	1 339	2 008	4 022
	sůl C		585	1 170	1 754	3 513
t_{col_S}	Teplota studené nádrže	[°C]	250			
ρ_{col_S}	sůl A	[kg/m ³]	1 928,67			
	sůl B		1 932			
	sůl C		1 902,74			
Akumulované množství ve studené nádrži						
V_{col_S}	sůl A	[m ³]	605	1 210	1 816	3 635
	sůl B		602	1 205	1 807	3 618
	sůl C		515	1 030	1 546	3 095
$D_{i_{hot_S}}$	Vnitřní průměr nádrže	[m]	9	12	14	17
Výška nádrže						
$h_{i_{hot_S}}$	sůl A	[m]	10	11	13	17
	sůl B		11	12	13	18
	sůl C		9	10	11	15
$D_{i_{col_S}}$	Vnitřní průměr nádrže	[m]	9	12	14	17
Výška nádrže						
$h_{i_{col_S}}$	sůl A	[m]	10	11	12	16
	sůl B		9	11	12	16
	sůl C		8	9	10	14

8.1.3. Tepelné ztráty izolovaných nádrží

Z důvodu velikosti nádrží uvažujeme přestup tepla rovinou stěnou a výpočet vztahujeme k vnějším rozměrům nádrže (obvod nádrže bez izolace).

Nádrže jsou izolovány Kamennou vlnou, která odolává vysoké teplotě do 700 °C, bod tání této izolace je při 960 °C. Tepelná vodivost této izolace je 0,03 – 0,05 [W/m.K] [13].

Vedení tepla složenou rovinou stěnou [14]:

$$\dot{Q} = \dot{q} \cdot S = \frac{t_i - t_e}{\frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{s_n}{\lambda_n}} \cdot S [W] \quad (8.26)$$

Tepelná vodivost nádrže (nerez) [15]:

$$\lambda_n = 33 [W/m \cdot K] \quad (8.27)$$

Volím tepelnou vodivost izolace:

$$\lambda_{iz} = 0,04 [W/m \cdot K] \quad (8.28)$$

Volím tloušťku stěny nádrže:

$$s_n = 10 [mm] \quad (8.29)$$

Volím tloušťku izolace:

$$s_{iz} = 1\,200 [mm] \quad (8.30)$$

Teplota okolí:

$$t_o = 20 [^\circ C] \quad (8.31)$$

Tepelné ztráty horké nádrže:

Dosadíme do rov. (8.26).

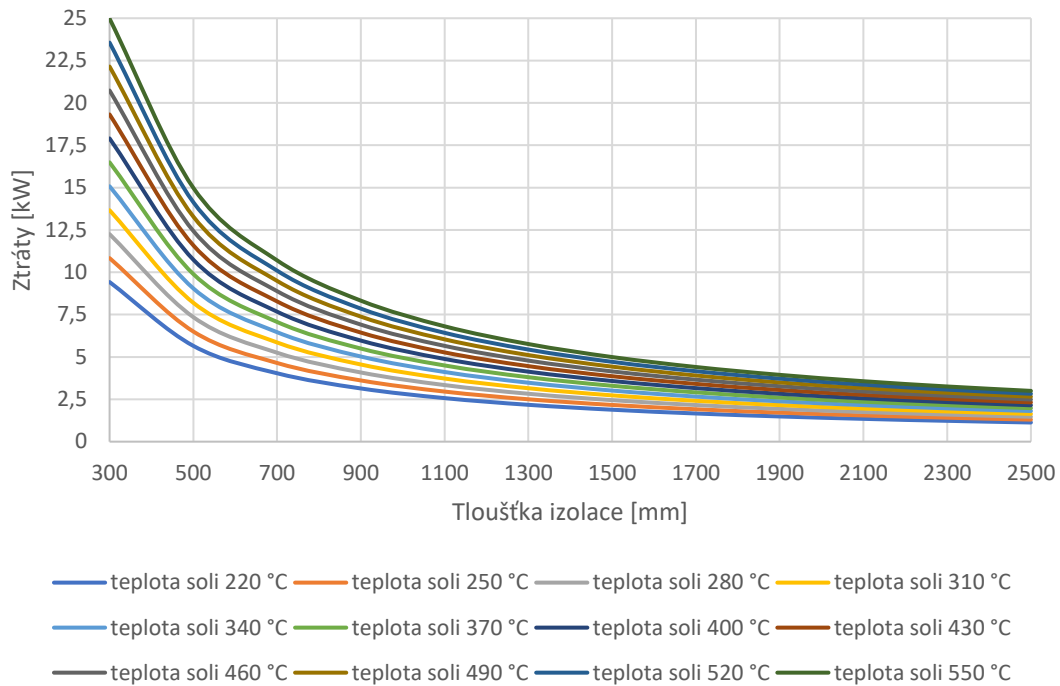
$$\begin{aligned} \dot{Q}_{zt_{hot}} &= \frac{t_{hots} - t_o}{\frac{s_n}{\lambda_n} + \frac{s_{iz}}{\lambda_{iz}}} \cdot (S_{pl_{hot}} + S_{vik_{hot}}) [kW] \\ \dot{Q}_{zt_{hot}} &= \frac{t_{hots} - t_o}{\frac{s_n}{\lambda_n} + \frac{s_{iz}}{\lambda_{iz}}} \cdot \pi \cdot \left((D_{i_{hots}} + 2 \cdot s_n) \cdot h_{i_{hots}} + \frac{(D_{i_{hots}} + 2 \cdot s_n)^2}{4} \right) [kW] \end{aligned} \quad (8.32)$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{zt_{hot}} &= \frac{550 - 20}{\frac{10 \cdot 10^{-3}}{33} + \frac{1\,200 \cdot 10^{-3}}{0,04}} \cdot \pi \cdot \left((9 + 2 \cdot 10 \cdot 10^{-3}) \cdot 10 + \frac{(9 + 2 \cdot 10 \cdot 10^{-3})^2}{4} \right) \\ &= 6\,200 \cdot 10^{-3} [W] = 6,2 [kWh/1hod] \end{aligned}$$

Ve výpočtech tepelných ztrát není započítána tepelná ztráta spodního dna, zde je výpočet komplikovanější z důvodu více různých vrstev beton, izolace, písek, zemina,... Dnem bude také unikat menší množství tepla vlivem umělé, ale i přirozené izolace např. zemina.

Na Obr. 24 tepelných ztrát horké nádrže jsou pochopitelně největší tepelné ztráty při použití malé tloušťky izolace a při největší teplotě soli v nádrži, při konstantní teplotě okolí. Ostrý zlom křivky je při tloušťce izolace 0,5 m a u tloušťky izolace 1,1 m není prakticky rozdíl mezi jednotlivými

ztrátami a teplotami patrný. U tlustších izolací např. 2 m a 1,5 m je rozdíl tepelných ztrát zanedbatelný max. cca 0,5 kW, zato enormně narostla pořizovací cena izolace.



Obr. 24 Tepelné ztráty horké nádrže o skladovací kapacitě 147 MWh

Tepelné ztráty studené nádrže:

Dosadíme do rov. (8.26).

$$\dot{Q}_{zt_{col}} = \frac{t_{col_s} - t_o}{\frac{s_n}{\lambda_n} + \frac{s_{iz}}{\lambda_{iz}}} \cdot (S_{pl_{col}} + S_{vik_{col}}) [kW]$$

$$\dot{Q}_{zt_{col}} = \frac{t_{col_s} - t_o}{\frac{s_n}{\lambda_n} + \frac{s_{iz}}{\lambda_{iz}}} \cdot \pi \cdot \left((D_{i_{col_s}} + 2 \cdot s_n) \cdot h_{i_{col_s}} + \frac{(D_{i_{col_s}} + 2 \cdot s_n)^2}{4} \right) [kW] \quad (8.33)$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{zt_{col}} &= \frac{250 - 20}{\frac{10 \cdot 10^{-3}}{33} + \frac{1200 \cdot 10^{-3}}{0,04}} \cdot \pi \cdot \left((9 + 2 \cdot 10 \cdot 10^{-3}) \cdot 10 + \frac{(9 + 2 \cdot 10 \cdot 10^{-3})^2}{4} \right) \\ &= 2,6 [kW] = 2,6 [kWh/1hod] \end{aligned}$$

Tepelné ztráty obou nádrží:

Stanovené tepelné ztráty jsou zároveň ztráty za 1 hod.

$$\dot{Q}_{zt} = \dot{Q}_{zt_{hot}} + \dot{Q}_{zt_{col}} = 6,2 + 2,6 = 8,8 [kW] = 8,8 [kWh/1hod] \quad (8.34)$$

8.1.4. Doba do zatuhnutí soli ve studené nádrži

Výpočtovou teplotu tuhnutí volím o 10 °C větší, než je minimální udávaná teplota tuhnutí 220 °C. Při této uvažované teplotě tuhnutí 230 °C je stále dostatečná bezpečnostní rezerva 20 °C od teploty studené nádrže.

$$t_{zat_S} = 230 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (8.35)$$

Střední teplota roztavené soli před zatuhnutím ve studené nádrži:

$$t_{stř_{zat_S}} = \frac{t_{col_S} + t_{zat_S}}{2} = \frac{250 + 230}{2} = 240 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (8.36)$$

Měrná tepelná kapacita před zatuhnutím ve studené nádrže:

$$t_{stř_{zat_S}} = 240 \text{ [}^\circ\text{C]} \rightarrow c_{p_{stř_{zat_S}}} = 1,484 \text{ [kJ/kg} \cdot \text{K]} \quad (8.37)$$

$$P_{aku_{col}} = m_S \cdot \frac{c_{p_{stř_{zat_S}}}}{3600} \cdot \Delta t_{zat_S} = m_S \cdot \frac{c_{p_{stř_{zat_S}}}}{3600} \cdot (t_{col_S} - t_{zat_S}) \text{ [kWh]} \quad (8.38)$$

$$P_{aku_{col}} = 1\,167\,247 \cdot \frac{1,484}{3600} \cdot (250 - 230) \cdot 10^{-3} = 9,626 \text{ [MWh]}$$

Doba do zatuhnutí:

$$\text{doba do zatuhnutí} = \frac{P_{aku_{col}}}{\dot{Q}_{zt_{col}}} = \frac{9,626 \cdot 10^3}{2,6} = 3\,764,9 \text{ [hod]} = 156,9 \text{ [dny]} \quad (8.39)$$

Jde o dobu s konstantním množstvím soli ve studené nádrži, tzn., že po tuto dobu nebude docházet k nabíjení a vybíjení, přivádějící nebo odvádějící teplo do studené nádrže. Tato vypočtena doba je pouze pro studenou nádrž mající nejmenší teplotní rozdíl mezi provozní teplotou této nádrže a teplotou zamrznutí.

8.1.5. Nabíjení a vybíjení nádrže

Nabíjení horké nádrže:

Ze získaných naměřených hodnot jsme si zvolily „přibližný průměrný“ nabíjecí výkon předávající elektrokotlem soli. Současně jsme stanovily dobu, za kterou dojde k nabití horké nádrže na max. akumulovanou kapacitu, při zvoleném průměrném nabíjecím výkonu

$$\dot{Q}_{nab} = 4 \text{ [MW]} \quad (8.40)$$

$$\text{doba nabíjení} = \frac{P_{aku_{hot}}}{\dot{Q}_{nab}} = \frac{147}{4} = 36,75 \text{ [hod]} \quad (8.41)$$

Vybíjení horké nádrže:

Vybíjecí výkon je výkon přenášený přes výměníky z primárního okruhu do sekundárního okruhu.

$$\dot{Q}_{PRE,SUP,EVA} = \dot{Q}_{vyb} = 26\,777,8 \text{ [kW]} \quad (8.42)$$

$$\text{doba vybíjení} = \frac{P_{aku_{hot}}}{\dot{Q}_{vyb}} = \frac{147}{26\,777,8} = 5,49 \text{ [hod]} \quad (8.43)$$

8.1.6. Maximální využití při nepřetržitém provozu

Délka celého procesu akumulace:

Dobu akumulace jsem si zvolil pro tento výpočet stejnou jako je doba výroby, ale může být pochopitelně odlišná.

$$\text{doba využití} = \text{doba nabíjení} + \text{doba akumulace} + \text{doba vybíjení} \text{ [hod]} \quad (8.44)$$

$$\text{doba využití} = 36,75 + 4 + 5,49 = 46,2 \text{ [hod]} = 1,9 \text{ [dne]}$$

Jedná se o „ideální“ dobu, při které by došlo k nabití, ihned po nabití k akumulaci na stanovenou dobu a poté k vybití horké nádrže. Pochopitelně v reálném procesu nebude doba využití souhlasit.

Maximální využití akumulace za rok:

Počet hodin za rok 8 765,8.

$$\text{použití za rok} = \frac{\text{počet hodin}}{\text{doba využití}} = \frac{8\,765,8}{46,2} = 189,6 \text{ [-]} \quad (8.45)$$

Zmíněnou dobu využití procesu jsme potřebovali pro výpočet opět „ideálního“ počtu použití za rok při plynulém nabití, dobou akumulace a vybitím. Z toho důvodu se jedná pouze pro informativní počet použití za rok.

V Tab. 14 jsou porovnány vypočítané parametry tepelných ztrát, doby zatuhnutí soli, doby nabíjení, vybíjení a max. nepřetržitého provozu pro jednotlivé doby akumulace.

Tab. 14 Parametry akumulčních nádrží II

Doba akumulace		[hod]	4	8	12	24
$P_{aku_{hot}}$	Akumulovaný výkon	[MWh]	147	294	441	883
λ_n	Tepelná vodivost nádoby	[W/m.K]	33			
s_n	Tloušťka stěny nádoby	[mm]	10			
	Vnější průměr nádrže	[m]	9,02	12,02	14,02	17,02
λ_{iz}	Tepelná vodivost izolace	[W/m.K]	0,04			
t_o	Teplota okolí	[°C]	20			
s_{iz}	Tloušťka izolace	[mm]	1200			
	Vnější průměr s izolací	[m]	11,42	14,42	16,42	19,42
Tepelné ztráty izolované horké nádoby						
$\dot{Q}_{zt_{hot}}$	sůl A	[kW]	6,2	9,7	12,6	20,3
	sůl B		6,4	9,9	12,9	20,8
	sůl C		5,7	8,9	11,6	18,6
Tepelné ztráty izolované studené nádoby						
$\dot{Q}_{zt_{col}}$	sůl A	[kW]	2,6	4	5,2	8,3
	sůl B		2,5	4	5,1	8,3
	sůl C		2,2	3,5	4,6	7,3
Ztráty nádrží po dobu akumulace						
\dot{Q}_{zt}	sůl A	[kWh]	8,8	13,6	17,7	28,6
	sůl B		8,9	13,9	18	29
	sůl C		8	12,4	16,2	26
t_{zat_s}	Teplota zatuhnutí soli	[°C]	230			
$t_{stř_{zat_s}}$	Střední teplota studenou	[°C]	240			
$c_{p_{stř_{zat_s}}}$	sůl A	[kJ/kg.K]	1,484			
	sůl B		1,489			
	sůl C		2,154			
Akumulovaný výkon studené nádrže						
$P_{aku_{col}}$	sůl A	[MWh]	9,626	19,251	28,877	57,819
	sůl B		9,625	19,251	28,876	57,818
	sůl C		11,731	23,461	35,192	70,464
Doba do zatuh. studení nádrže	sůl A	[hod]	3 764,92	4 851,14	5 589,46	6 957,9
	sůl B		3 779,7	4 869,54	5 610,39	6 984,6
	sůl C		5 215,08	6 688,49	7 693,68	9 608,23
	sůl A	[dny]	156,9	202,1	232,9	289,9
	sůl B		157,5	202,9	233,8	291
	sůl C		217,3	278,7	320,6	400,3
\dot{Q}_{nab}	Průměrný nabíjecí výkon	[MW]	4			
	Doba nabíjení	[hod]	36,75	73,5	110,25	220,75
\dot{Q}_{vyb}	Vybíjecí výkon	[MW]	26,778			
Doba vybíjení	sůl A	[hod]	5,49	10,98	16,47	32,98
	sůl B		5,49	10,98	16,47	32,98
	sůl C		5,49	10,98	16,47	32,98

Ideální možné využití aku					
Celková provozu nab+aku+vyb	[hod]	46,2	92,5	138,7	277,7
Celková provozu nab+aku+vyb	[den]	1,9	3,9	5,8	11,6
Počet použití za rok	[-]	189,6	94,8	63,2	31,6

9.Návrh výměníků tepla

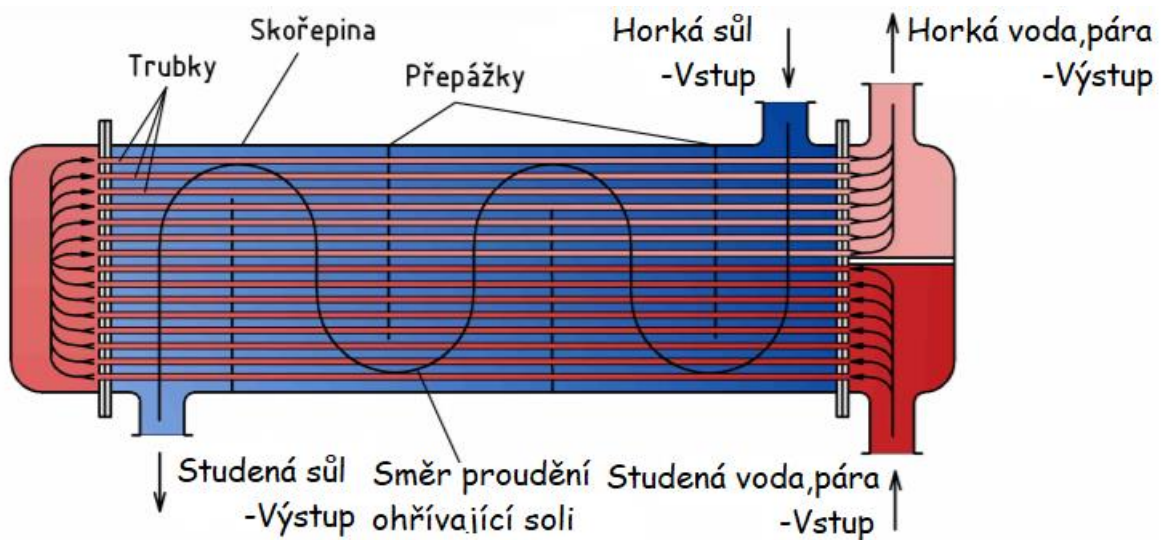
Pro dané provozní parametry byl zvolen dle Tab. 15 trubkový výměník, splňující jako jediný zadané provozní parametry. Výhody trubkového výměníku jsou robustnost, opravitelnost, snadná údržba a čištění. Nyní je nutné určit, které médium bude protékat trubkovým a mezitrubkovým prostorem. Obecně se volí do trubkového prostoru médium o vysokém tlaku, špinavý proud, agresivnější, při fázových změnách,... . Trubkový svazek bude mít uspořádání trubek do čtverce, při kterém jde použít menší počet trubek oproti trojúhelníkovému, ale je více prostoru pro čištění mezitrubkového prostoru.

V naší aplikaci budou použity tři trubkové výměníky tepla Obr. 25, kde roztavená sůl proudí v mezitrubkovém prostoru, voda a následná pára proudí v trubkovém prostoru. Z horké nádrže proudí roztavená sůl do SUPERHEATRU, poté do EVAPORATORU a následně do PREHEATERU. V PREHEATERU se voda v trubce ohřeje, v EVAPORATORU dojde k odpaření vody a vzniklá pára se v SUPERHEATRU přehřeje na požadovanou teplotu.

Pro vlastnosti vody a vodní páry byl u výpočtů výměníků použit doplněk excelu XSteam.

Tab. 15 Výběr typu výměníku dle jejich charakteristik [16]

Typ výměníku	Tlaky [MPa]	Teploty [°C]	Kompaktnost	Fouling	Čistitelnost	Použití
Trubkový	> 4	> 300	+	+	+	univerzální
Spirálový	1,8	400	++	+++	+	Univerzální
Deskový	2,5 těsn. 4 svař.	100 – 200 300 svař.	+++	++	++ -	Ne pro plyny (s výjimkou odpařování)
Stíraný povrch	2	230		++++	+	Vazké kapaliny, pasty



Obr. 25 Trubkový výměník tepla s dvojitým tahem [17]
Na tomto obr. jsou změněny názvy médií vstupujících a vystupujících

9.1. Množství obíhající soli v primárním okruhu

Vstupní teplota roztavené soli SUPERHEATERU:

$$t_{in_{SUP_S}} = 550 [^{\circ}C] \quad (9.1)$$

Výstupní teplota roztavené soli PREHEATERU:

$$t_{out_{PRE_S}} = 250 [^{\circ}C] \quad (9.2)$$

Měrná tepelná kapacita roztavené soli při střední teplotě SUP a PRE:

$$t_{stř_S} = t_{stř_{aku_S}} = 400 [^{\circ}C] \rightarrow c_{p_{stř_S}} = c_{p_{stř_{aku_S}}} = 1,5111 [kJ/kg \cdot K] \quad (9.3)$$

Množství napájecí vody/přehřáté páry v sekundárním okruhu:

$$\dot{m}_w = 10,302 [kg/s] \quad (9.4)$$

Provozní tlak napájecí vody:

$$p_v = 75 [bar] \quad (9.5)$$

Vstupní teplota napájecí vody PREHEATERU:

$$t_{in_{PRE_w}} = 200 [^{\circ}C] \quad (9.6)$$

Vstupní entalpie při teplotě vstupující napájecí vody do PREHEATERU:

$$p_v = 75 [bar], t_{in_{PRE_w}} = 200 [^{\circ}C] \rightarrow I_{in_{PRE_w}} = 854,848 [kJ/kg] \quad (9.7)$$

Výstupní teplota přehřáté páry SUPERHEATERU:

$$t_{out_{SUP_P}} = 520 [^{\circ}C] \quad (9.8)$$

Výstupní entalpie při teplotě vystupující přehřáté páry z SUPERHEATERU:

$$p_v = 75 [bar], t_{out_{SUP_P}} = 520 [^{\circ}C] \rightarrow I_{out_{SUP_P}} = 3\,454,132 [kJ/kg] \quad (9.9)$$

Hmotnostní průtok roztavené soli v primárním okruhu:

$$\dot{m}_S \cdot c_{p_{st\dot{S}}} \cdot (t_{in_{SUP_S}} - t_{out_{PRE_S}}) = \dot{m}_W \cdot (I_{out_{SUP_W}} - I_{in_{PRE_W}}) \quad (9.10)$$

$$\dot{m}_S = \frac{\dot{m}_W \cdot (I_{out_{SUP_W}} - I_{in_{PRE_W}})}{c_{p_{st\dot{S}}} \cdot (t_{in_{SUP_S}} - t_{out_{PRE_S}})} = \frac{10,302 \cdot (3\,454,132 - 854,848)}{1,5111 \cdot (550 - 250)} = 59,1 [kg/s]$$

Výpočet množství obíhající roztavené soli v okruhu se liší oproti výpočtu množství obíhajícího média jakéhokoli výměníku, důvodem je měrná tepelná kapacita soli. Korelace měrné tepelné kapacity má nejistotu cca 5 % a z toho důvodu spíše počítáme obíhající množství soli z entalpie vody a páry. V Tab. 16 jsou uvedeny hmotnostní průtoky vybraných solí, přičemž největší rozdíl průtoku jednotlivých solí je cca 9,5 kg/s.

Tab. 16 Hmotnostní průtok soli v primárním okruhu

Médium			sůl A	sůl B	sůl C
\dot{m}_S	Průtok soli v okruhu	[kg/s]	59,1	58,9	49,6

9.2. Návrh PREHEATERU

Pro trubkový svazek volím bezešvé trubky Tr 42,4 x 4,05 z materiálu 316 [18].

9.2.1. Návrh vodní strany

Výstupní teplota napájecí vody:

$$t_{out_{PRE_W}} = 290,54 [^{\circ}C] \quad (9.11)$$

Výstupní entalpie napájecí vody:

$$t_{out_{PRE_W}} = 290,54 [^{\circ}C] \rightarrow I_{out_{PRE_W}} = 1\,292,7 [kJ/kg] \quad (9.12)$$

Střední teplota napájecí vody:

$$t_{st\dot{P}RE_W} = \frac{t_{out_{PRE_W}} + t_{in_{PRE_W}}}{2} = \frac{290,54 + 200}{2} = 245,27 [^{\circ}C] \quad (9.13)$$

Měrný objem napájecí vody při střední teplotě:

$$p_v = 60 [bar], t_{st\dot{P}RE_W} = 245,27 [^{\circ}C] \rightarrow v_{PRE_W} = 0,00124 [m^3/kg] \quad (9.14)$$

Zvolená rychlost napájecí vody:

$$c_{PREw} = 3 [m/s] \quad (9.15)$$

Vnitřní průměr trubky napájecí vody výměníku:

$$d_{iPREw} = 34,3 [mm] \quad (9.16)$$

Počet trubek výměníku v jedné cestě:

$$\dot{m}_w = \frac{\dot{V}_w}{v_{PREw}} = \frac{S_{iPREw} \cdot n_{tPREw} \cdot c_{PREw}}{v_{PREw}} \rightarrow n_{tPREw} = \frac{\dot{m}_w \cdot v_{PREw}}{S_{iPREw} \cdot c_{PREw}} [ks] \quad (9.17)$$

$$n_{tPREw} = \frac{4 \cdot \dot{m}_w \cdot v_{PREw}}{\pi \cdot d_{iPREw}^2 \cdot c_{PREw}} = \frac{4 \cdot 10,302 \cdot 0,00124}{\pi \cdot (34,3 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 3} = 4,61 \doteq 5 [ks] \quad (9.18)$$

Skutečná rychlost napájecí vody pro reálný počet trubek na výstupu:

$$c_{SPREw} = \frac{\dot{m}_w \cdot v_{PREw}}{S_{iPREw} \cdot n_{tPREw}} = \frac{4 \cdot \dot{m}_w \cdot v_{PREw}}{\pi \cdot d_{iPREw}^2 \cdot n_{tPREw}} = \frac{4 \cdot 10,302 \cdot 0,00124}{\pi \cdot (34,3 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 5} = 2,77 [m/s] \quad (9.19)$$

Dynamická viskozita napájecí vody při střední teplotě:

$$p_v = 75 [bar], t_{střPREw} = 245,27 [°C] \rightarrow \mu_{PREw} = 0,000109 [Pa \cdot s] \quad (9.20)$$

Kinematická viskozita napájecí vody při střední teplotě:

$$\vartheta_{PREw} = \mu_{PREw} \cdot v_{PREw} = 0,000109 \cdot 0,00124 = 1,3571 \cdot 10^{-7} [m^2/s] \quad (9.21)$$

Tepečná vodivost napájecí vody při střední teplotě:

$$p_v = 75 [bar], t_{střPREw} = 245,27 [°C] \rightarrow \lambda_{PREw} = 0,6279 [W/m \cdot K] \quad (9.22)$$

Reynoldsovo číslo napájecí vody [14]:

Podle velikosti Re se rozhodne, zda se jedná o laminární nebo turbulentní proudění. Přejchod mezi laminární a turbulentní oblastí je při hodnotě $Re = 2\,300$. Laminární oblast $Re < 2\,300$ a turbulentní $Re > 2\,300$.

$$Re = \frac{c \cdot d_i}{\vartheta} [-] \quad (9.23)$$

$$Re_{PREw} = \frac{c_{SPREw} \cdot d_{iPREw}}{\vartheta_{PREw}} = \frac{2,77 \cdot 34,3 \cdot 10^{-3}}{1,3571 \cdot 10^{-7}} = 699\,373 [-] \quad (9.24)$$

Z vypočítaného $Re > 2\,300$ je zřejmé, že jde o turbulentní proudění.

Prandtlovo číslo napájecí vody:

$$p_v = 75 [bar], t_{střPREw} = 245,27 [°C] \rightarrow Pr_{PREw} = 0,8309 [-] \quad (9.25)$$

Nusseltovo číslo pro turbulentní proudění v trubce podle Colburna [19]:

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{1/3} [-] \quad (9.26)$$

Platnost této rovnice: $3 \cdot 10^4 < Re < 10^6$

$$0,7 < Pr < 160$$

Hydraulicky hladké potrubí $L/D > 60$

Nusseltovo číslo pro napájecí vodu:

Podmínka platnosti Re a Pr je v daném rozsahu splněna, použijeme rov. (9.26).

$$Nu_{PRE_w} = 0,023 \cdot Re_{PRE_w}^{0,8} \cdot Pr_{PRE_w}^{1/3} = 0,023 \cdot 699\,373^{0,8} \cdot 0,8309^{1/3} = 1\,024,9 [-] \quad (9.27)$$

Součinitel přestupu tepla napájecí vody [19]:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d_i}{\lambda} [-] \quad (9.28)$$

$$Nu_{PRE_w} = \frac{\alpha_{PRE_w} \cdot d_{iPRE_w}}{\lambda_{PRE_w}} \rightarrow \alpha_{PRE_w} = \frac{Nu_{PRE_w} \cdot \lambda_{PRE_w}}{d_{iPRE_w}} = \frac{1\,024,9 \cdot 0,6279}{34,3 \cdot 10^{-3}} = 18\,762,7 [W/m^2 \cdot K] \quad (9.29)$$

9.2.2. Návrh solné strany

Provozní tlak roztavené soli:

$$p_v = 10 [bar] \quad (9.30)$$

Vstupní teplota roztavené soli:

$$t_{inPRE_S} = 300,54 [^\circ C] \quad (9.31)$$

Hustota roztavené soli na vstupu:

$$t_{inPRE_S} = 300,54 [^\circ C] \rightarrow \rho_{inPRE_S} = 1901 [kg/m^3] \quad (9.32)$$

Měrná tepelná kapacita roztavené soli na vstupu:

$$t_{inPRE_S} = 300,54 [^\circ C] \rightarrow c_{p_{inPRE_S}} = 1,494 [kJ/kg \cdot K] \quad (9.33)$$

Kinematická viskozita roztavené soli na vstupu:

$$t_{inPRE_S} = 300,54 [^\circ C] \rightarrow \vartheta_{inPRE_S} = 1,7355 \cdot 10^{-6} [m^2/s] \quad (9.34)$$

Tepelná vodivost roztavené soli na vstupu:

$$t_{inPRE_S} = 300,54 [^\circ C] \rightarrow \lambda_{inPRE_S} = 0,4992 [W/m \cdot K] \quad (9.35)$$

Prandtl roztavené soli na vstupu:

$$Pr_{inPRE_S} = \frac{\vartheta_{inPRE_S} \cdot c_{p_{inPRE_S}} \cdot \rho_{inPRE_S}}{\lambda_{inPRE_S}} = \frac{1,7355 \cdot 10^{-6} \cdot 1,494 \cdot 10^3 \cdot 1901}{0,4992} = 9,874[-] \quad (9.36)$$

Výstupní teplota roztavené soli:

$$t_{outPRE_S} = 250 [^{\circ}C] \quad (9.37)$$

Hustota roztavené soli na výstupu:

$$t_{outPRE_S} = 250 [^{\circ}C] \rightarrow \rho_{outPRE_S} = 1929 [kg/m^3] \quad (9.38)$$

Měrná tepelná kapacita roztavené soli na výstupu:

$$t_{outPRE_S} = 250 [^{\circ}C] \rightarrow c_{p_{outPRE_S}} = 1,486 [kJ/kg \cdot K] \quad (9.39)$$

Kinematická viskozita roztavené soli na výstupu:

$$t_{outPRE_S} = 250 [^{\circ}C] \rightarrow \vartheta_{outPRE_S} = 2,4235 \cdot 10^{-6} [m^2/s] \quad (9.40)$$

Tepelná vodivost roztavené soli na výstupu:

$$t_{outPRE_S} = 250 [^{\circ}C] \rightarrow \lambda_{outPRE_S} = 0,4902 [W/m \cdot K] \quad (9.41)$$

Prandtl roztavené soli na výstupu:

$$Pr_{outPRE_S} = \frac{\vartheta_{outPRE_S} \cdot c_{p_{outPRE_S}} \cdot \rho_{outPRE_S}}{\lambda_{outPRE_S}} = \frac{2,4235 \cdot 10^{-6} \cdot 1,486 \cdot 10^3 \cdot 1929}{0,4902} = 14,168[-] \quad (9.42)$$

Vnější průměr trubky napájecí vody:

$$d_{ePRE_w} = 42,4 [mm] \quad (9.43)$$

Koeficient rozteče trubek v trubkovnici:

Trubky budou do trubkovnice zaválcovány a následně zavařeny, kvůli snížení rizika netěsnosti lisovaného spoje. Z tohoto důvodu volím koeficient pro lisování.

$$t_{lis} = \langle 1,25 \div 1,5 \rangle \cdot d_e \quad (9.44)$$

$$volím \rightarrow t_{lis} = 1,4 \cdot d_e$$

$$t_{lisPRE} = 1,4 \cdot d_{ePRE_w} = 1,4 \cdot 42,4 = 59,36 [mm] \quad (9.45)$$

Volím 12 tahů trubek, kvůli zmenšení délky výměníku.

$$n_{t_{PRE}} = n_{t_{PREW}} \cdot tahy = n_{t_{PREW}} \cdot 12 = 5 \cdot 12 = 60 [-] \quad (9.46)$$

$$n_{t_{PRE}} \cdot t_{liSPRE}^2 \leq S_{B_{PRE}}$$

$$n_{t_{PRE}} \cdot t_{liSPRE}^2 \leq \frac{\pi \cdot D_{B_{PRE}}^2}{4} \rightarrow D_{B_{PRE}} = \sqrt[2]{\frac{4 \cdot n_{t_{PRE}} \cdot t_{liSPRE}^2}{\pi}} = 2 \cdot \sqrt[2]{\frac{60 \cdot 59,36^2}{\pi}} \quad (9.47)$$

$$= 518,8 [mm]$$

$$volím \rightarrow D_{B_{PRE}} = 558 [mm]$$

Rychlost roztavené soli na vstupu:

$$c_{in_{PRE_S}} = 2 [m/s] \quad (9.48)$$

Max. rychlost roztavené soli v mezitrubkovém systému [20]:

$$c_{max} = \frac{S_T}{2 \cdot (S_T - D)} \cdot c [m/s] \quad (9.49)$$

$$c_{max_{PRE_S}} = \frac{t_{liSPRE}}{2 \cdot (t_{liSPRE} - d_{e_{PREW}})} \cdot c_{in_{PRE_S}} = \frac{59,36 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot (59,36 - 42,4) \cdot 10^{-3}} \cdot 2 = 3,5 [m/s] \quad (9.50)$$

Reynoldsovo číslo pro mezitrubkový prostor [20]:

$$Re_{D,max} = \frac{c_{max} \cdot D}{\vartheta} \quad (9.51)$$

$$Re_{D,PRE_S} = \frac{c_{max_{PRE_S}} \cdot d_{e_{PREW}}}{\vartheta_{in_{PRE_S}}} = \frac{3,5 \cdot 42,4 \cdot 10^{-3}}{1,7355 \cdot 10^{-6}} = 85\,509,2 [-] \quad (9.52)$$

Nusseltovo číslo pro mezitrubkový prostor [20]:

V Tab. 17 určím koeficienty pro velikost $Re_{D,max} = Re_{D,PRE_S}$ spadající do rozmezí $10^3 \div 2 \cdot 10^5$. Pro náš případ jsou koeficienty $C_1 = 0,27$ a $m = 0,63$.

Tab. 17 Koeficienty C_1 a m pro výpočet Nusseltova čísla [20]

Uspořádání	$Re_{D,max}$	C_1	m
Za sebou	$10 \div 10^2$	0,80	0,40
Za sebou	$10^2 \div 10^3$	Aproximace jako izolovaný válec	
Za sebou $\frac{S_T}{S_L} > 0,7$	$10^3 \div 2 \cdot 10^5$	0,27	0,63
Za sebou	$2 \cdot 10^5 \div 2 \cdot 10^6$	0,021	0,84

$$\overline{Nu}_D = C_1 \cdot Re_{D,max}^m \cdot Pr^{0,36} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_s}\right)^{1/4} \quad (9.53)$$

$$\overline{Nu}_{PRE_S} = C_{1PRE_S} \cdot Re_{D,PRE_S}^{m_{PRE_S}} \cdot Pr_{inPRE_S}^{0,36} \cdot \left(\frac{Pr_{inPRE_S}}{Pr_{outPRE_S}}\right)^{1/4} \quad (9.54)$$

Při počtu řad N_L menším než $N_L < 20$ se \overline{Nu}_D vynásobit opravným koeficientem C_2 viz. Tab. 18. V našem případě máme 12 tahů a 9 řad. Z toho jsme určily přibližný koeficient $C_2 = 0,966 = C_{2PRE_S}$.

Tab. 18 Koeficienty C_2 pro $N_L < 20$ ($Re_{D,max} > 10^3$) [20]

N_L	1	2	3	4	5	7	10	13	16
Za sebou	0,7	0,8	0,86	0,9	0,92	0,95	0,97	0,98	0,99

$$\overline{Nu}_{PRE_S} = C_{2PRE_S} \cdot C_{1PRE_S} \cdot Re_{D,PRE_S}^{m_{PRE_S}} \cdot Pr_{inPRE_S}^{0,36} \cdot \left(\frac{Pr_{inPRE_S}}{Pr_{outPRE_S}}\right)^{1/4} \quad (9.55)$$

$$\overline{Nu}_{PRE_S} = 0,966 \cdot 0,27 \cdot 85\,509,2^{0,63} \cdot 9,874^{0,36} \cdot \left(\frac{9,874}{14,168}\right)^{\frac{1}{4}} = 459,2 [-]$$

Součinitel přestupu tepla pro roztavenou sůl:

Dosadíme do rov.(9.28).

$$\overline{Nu}_{PRE_S} = \frac{\alpha_{PRE_S} \cdot d_{ePREW}}{\lambda_{inPRE_S}} \rightarrow \alpha_{PRE_S} = \frac{\overline{Nu}_{PRE_S} \cdot \lambda_{inPRE_S}}{d_{ePREW}} = \frac{459,2 \cdot 0,4992}{42,4 \cdot 10^{-3}} = 5\,405,8 [W/m^2 \cdot K] \quad (9.56)$$

Součinitel prostupu tepla materiálu výměníku [15]:

$$\lambda_{Tr} = 33 [W/m \cdot K] \quad (9.57)$$

V Tab. 19 jsou uvedeny hodnoty foulingu pro dané médium.

Tab. 19 Fouling faktor (faktor zanesení) [21]

Médium		Napájecí voda	Pára	Sůl
ϵ	Fouling faktor	$[m^2 \cdot K/W]$	0,00009	0,00009

Součinitel prostupu tepla trubkou [22]:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{d_i \cdot \alpha_i} + \frac{\epsilon_i}{d_i} + \frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot \ln \frac{d_e}{d_i} + \frac{\epsilon_e}{d_e} + \frac{1}{d_e \cdot \alpha_e}} [W/m^2 \cdot K] \quad (9.58)$$

$$k_{PRE} = \frac{1}{\frac{1}{d_{iPREw} \cdot \alpha_{PREw}} + \frac{\epsilon_{iPREw}}{d_{iPREw}} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{Tr}} \cdot \ln \frac{d_{ePREw}}{d_{iPREw}} + \frac{\epsilon_{ePREs}}{d_{ePREw}} + \frac{1}{d_{ePREw} \cdot \alpha_{PREs}}} \quad (9.59)$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{34,3 \cdot 10^{-3} \cdot 18\,762,7} + \frac{9 \cdot 10^{-5}}{34,3 \cdot 10^{-3}} + \frac{1}{2 \cdot 33} \cdot \ln \frac{42,4 \cdot 10^{-3}}{34,3 \cdot 10^{-3}} + \frac{9 \cdot 10^{-5}}{42,4 \cdot 10^{-3}} + \frac{1}{42,4 \cdot 10^{-3} \cdot 5\,405,8}}$$

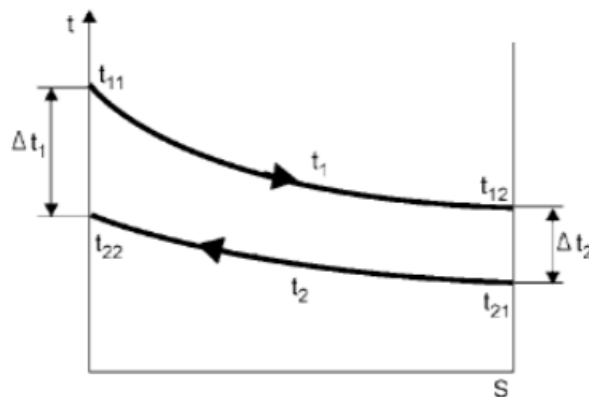
$$= 1\,699,8 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{K]}$$

Výkon výměníku:

$$\dot{Q}_{PRE} = \dot{m}_w \cdot (I_{outPREw} - I_{inPREw}) = 10,302 \cdot (1\,292,7 - 854,8) = 4\,510,9 \text{ [kW]} \quad (9.60)$$

Střední logaritmický spád výměníku:

Pro náš případ jsme se rozhodly k porovnání výměníku s křídlovým proudem a výměníku typu Shell and Tube, což je i náš případ výměníku. Nejdříve musíme vypočítat střední logaritmický spád u protiproudého zapojení výměníku Obr. 26, výhoda oproti souprůdému zapojení je v nižší délce výměníku, díky lepšímu přenosu energie.



Obr. 26 Graf průběhu teplot v protiproudém výměníku [23]

Střední logaritmický spád výměníku v protiproudém zapojení [23]:

$$\Delta t_{ln_{pro}} = \frac{(t_{11} - t_{22}) - (t_{12} - t_{21})}{\ln \frac{(t_{11} - t_{22})}{(t_{12} - t_{21})}} \text{ [K]} \quad (9.61)$$

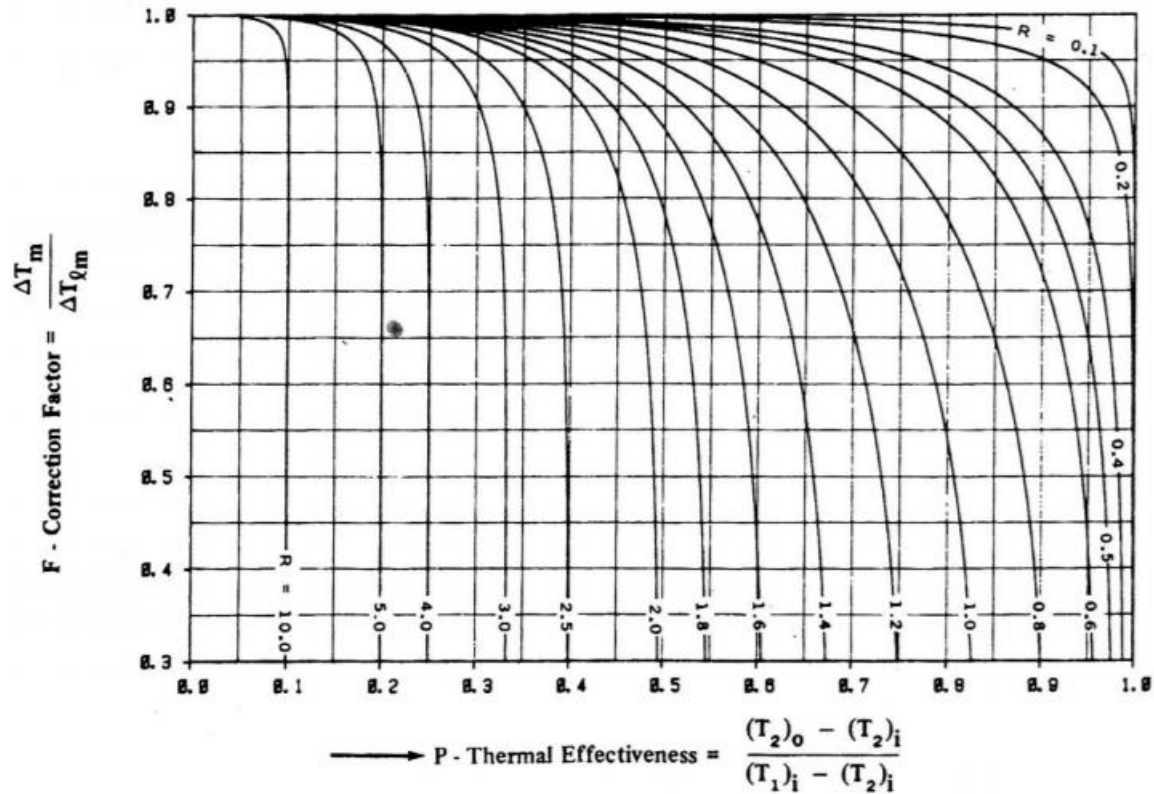
Pomocné parametry pro určení součinitele křížového proudu F z Obr. 27 [23]:

$$P_F = \frac{(t_{22} - t_{21})}{(t_{11} - t_{21})} \text{ [-]} \quad (9.62)$$

$$R_F = \frac{(t_{11} - t_{12})}{(t_{22} - t_{21})} \text{ [-]} \quad (9.63)$$

Střední logaritmický spád výměníku s křížlovým proudem:

$$\Delta t_{ln} = F \cdot \Delta t_{ln_{pro}} [K] \quad (9.64)$$



Obr. 27 Součinitel F pro výměníky s křížlovým proudem [24]

Střední logaritmický spád „čistého“ protiproudého zapojení:

$$\Delta t_{ln_{PRE_{pro}}} = \frac{(t_{in_{PRE_S}} - t_{out_{PRE_W}}) - (t_{out_{PRE_S}} - t_{in_{PRE_W}})}{\ln \left(\frac{t_{in_{PRE_S}} - t_{out_{PRE_W}}}{t_{out_{PRE_S}} - t_{in_{PRE_W}}} \right)} [K] \quad (9.65)$$

$$\Delta t_{ln_{PRE}} = \Delta t_{ln_{PRE_{pro}}} \frac{(300,54 - 290,54) - (250 - 200)}{\ln \frac{(300,54 - 290,54)}{(250 - 200)}} = 134,46 [K]$$

Pro výměník Shell and Tube použijeme střední teplotní spád protiproudého zapojení a pro výměník s křížlovým proudem volíme $F = 1$, odpovídající také protiproudému zapojení pro křížlový proud mající více jak čtyři obraty [22].

Výměnná plocha výměníku:

$$\dot{Q}_{PRE} = k_{PRE} \cdot S_{PRE} \cdot \Delta t_{ln_{PRE}} [kW] \quad (9.66)$$

$$S_{PRE} = \frac{\dot{Q}_{PRE}}{k_{PRE} \cdot \Delta t_{ln_{PRE}}} = \frac{4\,510,9 \cdot 10^3}{1\,699,8 \cdot 134,46} = 19,74 [m^2] \quad (9.67)$$

Délka trubek napájecí vody:

$$S = \pi \cdot d \cdot L \cdot n [m^2] \quad (9.68)$$

$$S_{PRE} = \pi \cdot d_{e_{PREw}} \cdot L_{PREw} \cdot n_{t_{PRE}} \rightarrow L_{PREw} = \frac{S_{PRE}}{\pi \cdot d_{e_{PREw}} \cdot n_{t_{PRE}}} = \frac{19,74}{\pi \cdot 42,4 \cdot 10^{-3} \cdot 60} = 2,47 [m] \quad (9.69)$$

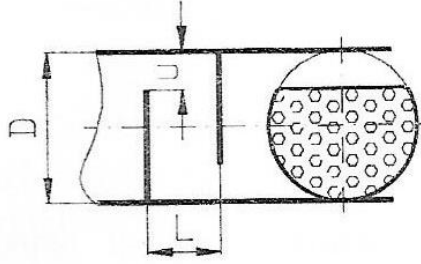
V Tab. 20 jsou porovnány hlavní parametry mezitrubkového prostoru pro jednotlivé soli. Pro dané parametry vychází výměníky dosti podobně, nepatrně se liší v teplotné délce.

Tab. 20 Porovnání parametrů jednotlivých solí

Médium		sůl A	sůl B	sůl C	
Vstupní parametry					
c_{inPREs}	Rychlost soli	[m/s]	2		
t_{inPREs}	Teplota soli	[°C]	300,54		
ρ_{inPREs}	Hustota soli	[kg/m ³]	1 901	1 901	1 867
$c_{p,inPREs}$	Měrná tep. kapacita	[kJ/kg.K]	1,494	1,498	1,987
ϑ_{inPREs}	Kinematická viskozita	[m ² /s]	1,7355E-06	1,7333E-06	1,4585E-06
λ_{inPREs}	Tepelná vodivost	[W/m.K]	0,4992	0,5137	0,53
Pr_{inPREs}	Prandtlovo číslo	[-]	9,874	9,609	10,212
Výstupní parametry					
$t_{outPREs}$	Teplota soli	[°C]	250		
$\rho_{outPREs}$	Hustota soli	[kg/m ³]	1 929	1 932	1 903
$c_{p,outPREs}$	Měrná tep. kapacita	[kJ/kg.K]	1,486	1,490	2,126
$\vartheta_{outPREs}$	Kinematická viskozita	[m ² /s]	2,4235E-06	2,4028E-06	2,1875E-06
$\lambda_{outPREs}$	Tepelná vodivost	[W/m.K]	0,490158	0,5137	0,53
$Pr_{outPREs}$	Prandtlovo číslo	[-]	14,168	13,465	16,7
Vypočítané parametry					
$c_{maxPREs}$	Max. rychlost mezitr.	[m/s]	3,5		
$Re_{D,PREs}$	Reynolds mezitr.	[-]	85 509,2	85 617,1	101 750,4
$C_{1,PREs}$	Koeficient C ₁	[-]	0,27	0,27	0,27
m_{PREs}	Koeficient m	[-]	0,63	0,63	0,63
$C_{2,PREs}$	Koeficient C ₂	[-]	0,966	0,966	0,966
$N_{L,PRE}$	Počet řad	[-]	9		
\overline{Nu}_{PREs}	Nusseltovo č. mezitr.	[-]	459,19	470,39	431,86
α_{PREs}	Souč. přestupu soli	[W/m ² .K]	5 405,8	5 699	5 398,2
λ_{Tr}	Souč. prostupu trubkou	[W/m.K]	33		
$\epsilon_{i,PREw}$	Fouling koefi. vody	[m ² .K/W]	0,00009		
$\epsilon_{e,PREs}$	Fouling koefi. soli	[m ² .K/W]	0,00009		
k_{PRE}	Souč. prostupu tepla	[W/m ² .K]	1 699,8	1 727,7	1 699
\dot{Q}_{PRE}	Výkon výměníku	[kW]	4 510,89		
$\Delta t_{In,PRE}$	Střed. log. tep. spád	[K]	134,46		
S_{PRE}	Teplosměnná plocha	[m ²]	19,74	19,42	19,75
L_{PREw}	Teplonosná délka	[m]	2,47	2,43	2,47

9.2.3. Počet a velikost segmentů výměníku:

Pro zabezpečení příčného proudění mezi segmenty se volí vzdálenost mezi jednotlivými segmenty L a U výška od konce segmentu k plášti Obr. 28. Doporučené velikosti $\frac{L}{D} = 0,3 \div 0,6$ a $\frac{U}{D} = 0,2 \div 0,35$ [16], ke správnému rozvržení přepážek umožňující správné obtékání trubkového svazku.



Obr. 28 Návrhové rozměry segmentových přepážek [16]

Rozteč segmentových přepážek:

$$\text{volím} \rightarrow \frac{L_{SEG,PRE}}{D_{BPRE}} = 0,5 \rightarrow L_{SEG,PRE} = 0,5 \cdot 558 = 279 \text{ [mm]} \quad (9.70)$$

Mezera segmentové přepážky:

$$\text{volím} \rightarrow \frac{U_{SEG,PRE}}{D_{BPRE}} = 0,28 \rightarrow U_{SEG,PRE} = 0,28 \cdot 558 = 156,2 \text{ [mm]} \quad (9.71)$$

Počet segmentových přepážek ve výměníku:

$$\text{počet přepážek} = \frac{L_{PREw}}{L_{SEG,PRE}} = \frac{2,47}{279 \cdot 10^{-3}} = 8,85 \text{ [ks]} \quad (9.72)$$

Skutečný počet segmentových přepážek a skutečná rozteč segmentů:

$$\begin{aligned} \text{volím} \rightarrow \text{skut. počet přepážek} = 9 \rightarrow L_{SSEG,PRE} &= \frac{L_{PREw}}{\text{skut. počet přepážek}} = \frac{2,47}{9} \\ &= 0,274 \text{ [m]} \end{aligned} \quad (9.73)$$

9.2.4. Tlakové ztráty

Tlaková ztráta trubkového prostoru [20] [22]:

Třecí ztráty:

Tlakovou ztrátu trubkového systému určíme jako tlakové ztráty potrubí. Délku potrubí určíme jako délku všech trubek trubkové části.

$$\Delta p_{tř} = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{c^2}{2} \cdot \rho \text{ [Pa]} \quad (9.74)$$

Místní ztráty:

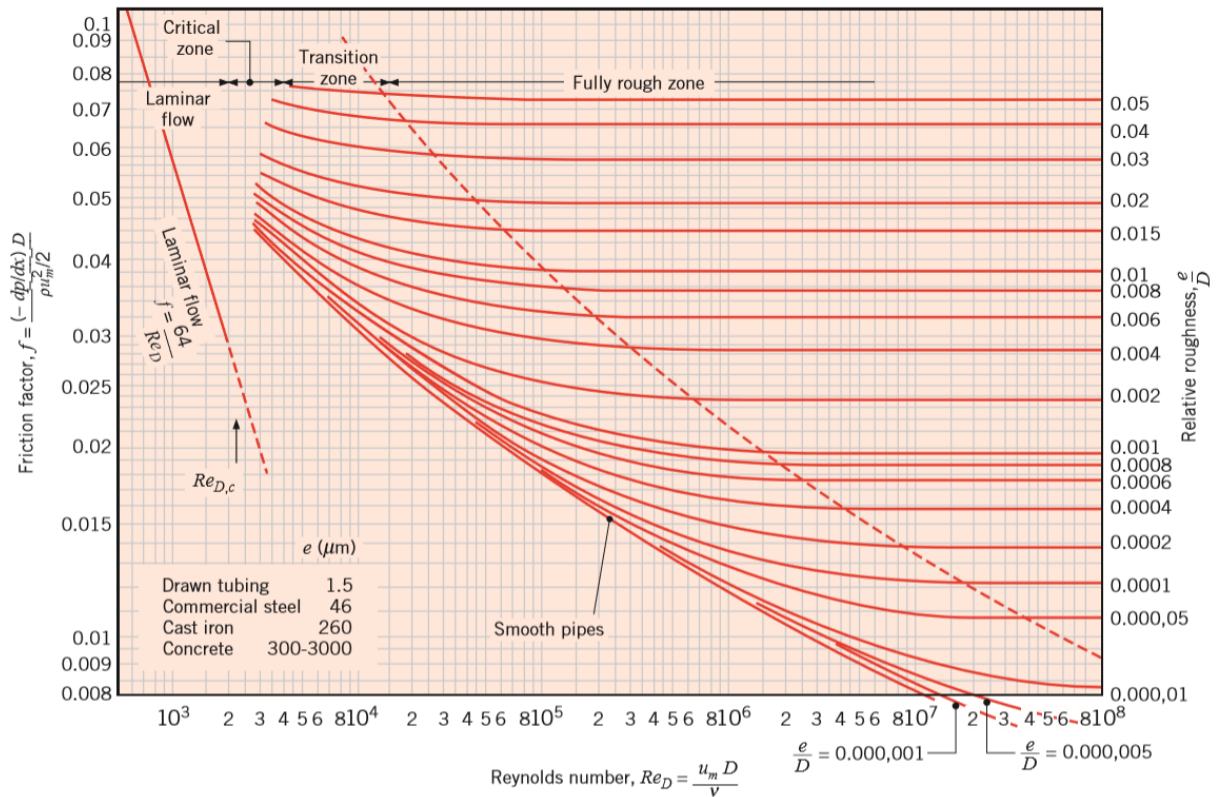
$$\Delta p_m = \xi \cdot \frac{c^2}{2} \cdot \rho \text{ [Pa]} \quad (9.75)$$

Celková ztráta trubkového prostoru:

$$\Delta p = \Delta p_{tř} + \Delta p_m \text{ [Pa]} \quad (9.76)$$

Třecí ztráty trubkového svazku:

Součinitel tření získáme z Moodyho diagramu Obr. 29 pro Re a $\frac{e}{d}$, kde k značí drsnost obtékané plochy. Pro nerezový materiál je $e = e_{PRE_w} = 46 [\mu m]$.



Obr. 29 Moodyho diagram pro určení součinitele tření [20]

$$\frac{e_{PRE_w}}{d_{i_{PRE_w}}} = \frac{46 \cdot 10^{-3}}{34,3} = 0,00131 \quad (9.77)$$

Součinitel tření [25]:

Pro přesnější určení součinitele tření použijeme místo diagramu Moodyho rovnici. Platnost rovnice je pro $4 \cdot 10^3 < Re < 10^7$ a $\frac{e}{d} < 10^{-1}$.

$$\lambda = 0,0053 \cdot \left[1 + \left(20000 \cdot \frac{e}{d} + \frac{10^6}{Re} \right)^{1/3} \right] \quad (9.78)$$

Re i poměr $\frac{e}{d}$ jsou v daném rozsahu platný.

$$\lambda_{PRE_w} = 0,0053 \cdot \left[1 + \left(20000 \cdot \frac{e_{PRE_w}}{d_{i_{PRE_w}}} + \frac{10^6}{Re_{PRE_w}} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \quad (9.79)$$

$$\lambda_{PRE_w} = 0,0053 \cdot \left[1 + \left(20000 \cdot \frac{42,4 \cdot 10^{-3}}{34,3} + \frac{10^6}{699\,373} \right)^{\frac{1}{3}} \right] = 0,0213$$

Dosadíme do rov.(9.74).

$$\Delta p_{tř_{PRE_w}} = \lambda_{PRE_w} \cdot \frac{L_{PRE_w} \cdot n_{t_{PRE}}}{d_{i_{PRE_w}}} \cdot \frac{c_{SPRE_w}^2}{2} \cdot \frac{1}{v_{PRE_w}} [Pa] \quad (9.80)$$

$$\Delta p_{tř_{PRE_w}} = 0,0213 \cdot \frac{2,47 \cdot 60}{34,3 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{2,77^2}{2} \cdot \frac{1}{0,00124} \cdot 10^{-5} = 2,84 [bar]$$

Místní ztráty trubkového svazku:

Součinitel místní ztráty pro vstup a výstup z trubkového svazku dohromady $\xi_{PRE} = 0,7$. Neřeším ztrátu na otočení proudu ve dnech. Dosadíme do rov. (9.75).

$$\Delta p_{m_{PRE_w}} = \xi_{PRE} \cdot \frac{c_{SPRE_w}^2}{2 \cdot v_{PRE_w}} = 0,7 \cdot \frac{2,77^2}{2 \cdot 0,00124} \cdot 10^{-5} = 0,025 [bar] \quad (9.81)$$

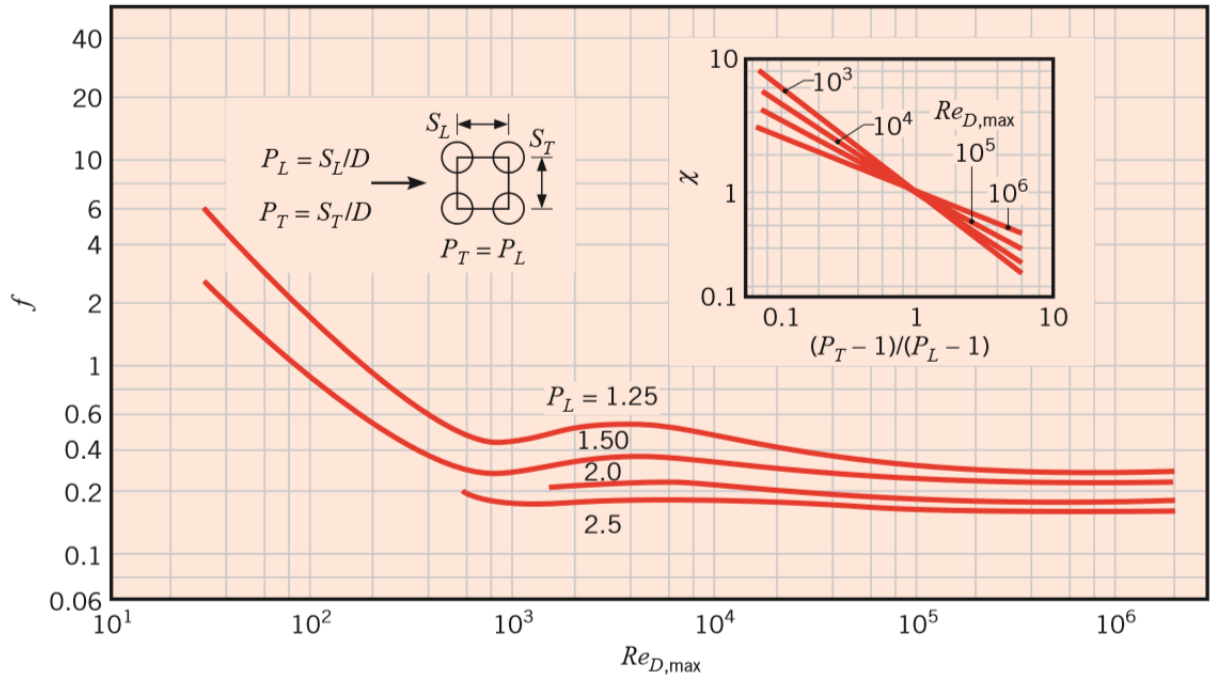
Celkové ztráty trubkového svazku:

$$\Delta p_{PRE_w} = \Delta p_{tř_{PRE_w}} + \Delta p_{m_{PRE_w}} = 2,84 + 0,025 = 2,87 [bar] \quad (9.82)$$

Tlakovou ztrátu mezitrubkové části určím z následujícího vztahu [20]:

$$\Delta p = N_L \cdot \chi \left(\frac{\rho \cdot V_{max}^2}{2} \right) \cdot f [N/m^2] \quad (9.83)$$

V našem případě pro čtvercové uspořádání $S_T = S_L \rightarrow P_T = P_L = \frac{S_T}{D}$ vychází faktory z diagramu na Obr. 30. Počet řad trubek trubkového svazku jsme stanovily na $N_{L_{PRE}} = 9$.



Obr. 30 Diagram pro určení faktoru tření f a korekčního faktoru χ [20]

$$Re_{D,PRE_S} = 85\,509,2 [-], P_{L,PRE} = \frac{t_{liSPRE}}{d_{ePRE_w}} = \frac{59,36}{42,4} = 1,4 [-] \rightarrow f_{PRE} = 0,3 [-] \quad (9.84)$$

$$\frac{(P_{L,PRE} - 1)}{(P_{L,PRE} - 1)} = \frac{(1,4 - 1)}{(1,4 - 1)} = 1 [-], Re_{D,PRE_S} = 85\,509,2 [-] \rightarrow \chi_{PRE} = 1 [-] \quad (9.85)$$

$$\Delta p_{PRE_S} = N_{L,PRE} \cdot (\text{skut. počet segmentů} + 1) \cdot \chi_{PRE} \left(\frac{\rho_{inPRE_S} \cdot c_{maxPRE_S}^2}{2} \right) \cdot f_{PRE} [N/m^2] \quad (9.86)$$

$$\Delta p_{PRE_S} = 9 \cdot (9 + 1) \cdot 1 \left(\frac{1901 \cdot 3,5^2}{2} \right) \cdot 0,3 \cdot 10^{-5} = 3,14 [bar]$$

9.2.5. Efektivita výměníku metodou ϵ - NTU

V této metodě se efektivita výměníku počítá pomocí základních parametrů proudícího média přes výměníky. Ve výpočtu se počítá pomocí bezrozměrného čísla NTU popisující výkon výměníku, který je závislý na parametrech výměníku.

Bezrozměrné kritérium NTU charakterizující velikost výměníku [16]:

$$NTU = \frac{k \cdot S}{C_{min}} [-] \quad (9.87)$$

Měrná tepelná kapacita slabšího proudu C_{min} .

$$C_{min} = \dot{m}_i \cdot c_{pi} [W/K] \quad (9.88)$$

Měrná tepelná kapacita napájecí vody:

$$C_{PRE_w} = \dot{m}_{PRE_w} \cdot c_{p_{PRE_w}} = 10,302 \cdot 4,7709 = 49,149 [W/K] \quad (9.89)$$

Střední měrná tepelná kapacita ve výměníku:

$$c_{p_{stř_{PRE_S}}} = \frac{c_{p_{out_{PRE_S}}} + c_{p_{in_{PRE_S}}}}{2} = \frac{1,486 + 1,494}{2} = 1,49 [kJ/kg \cdot K] \quad (9.90)$$

Měrná tepelná kapacita soli při střední teplotě ve výměníku:

$$C_{PRE_S} = \dot{m}_{PRE_S} \cdot c_{p_{stř_{PRE_S}}} = 59,1 \cdot 1,49 = 87,994 [W/K] \quad (9.91)$$

Měrná tepelná kapacita slabšího proudu:

$$C_{PRE_{min}} = C_{PRE_w} = 49,149 [W/K] \quad (9.92)$$

Měrná tepelná kapacita silnějšího proudu:

$$C_{PRE_{max}} = C_{PRE_S} = 87,994 [W/K] \quad (9.93)$$

Bezrozměrné kritérium NTU pro výměník:

$$NTU_{PRE} = \frac{k_{PRE} \cdot S_{PRE}}{C_{PRE_{min}}} = \frac{1\,699,8 \cdot 19,74}{49,149} = 0,683 [-] \quad (9.94)$$

Poměr tepelných kapacit proudů [16]:

Podmínkou pro použití tohoto vztahu je $C_r \neq 1$. V případě nesplnění tohoto vztahu je třeba použít jiný vztah.

$$C_r = \frac{C_{min}}{C_{max}} [-] \quad (9.95)$$

$$C_{r_{PRE}} = \frac{C_{PRE_{min}}}{C_{PRE_{max}}} = \frac{49,149}{87,994} = 0,559 [-] \quad (9.96)$$

Efektivita výměníku pro křížový proud [16]:

$$\varepsilon_{kr} = 1 - e^{\frac{-(1-e^{-NTU-C_r})}{C_r}} [-] \quad (9.97)$$

$$\varepsilon_{kr_{PRE}} = 1 - e^{\frac{-(1-e^{-NTU_{PRE}-C_{r_{PRE}}})}{C_{r_{PRE}}}} = 1 - e^{\frac{-(1-e^{-0,683-0,559})}{0,559}} = 0,72 [-] \quad (9.98)$$

Efektivita výměníku shell and tube [20]

$$\varepsilon_{shell} = 2 \cdot \left\{ 1 + C_r + (1 + C_r^2)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{1 + e^{\left[-(NTU) \cdot \left((1 + C_r^2)^{\frac{1}{2}} \right) \right]}}{1 - e^{\left[-(NTU) \cdot \left((1 + C_r^2)^{\frac{1}{2}} \right) \right]}} \right\}^{-1} \quad [-] \quad (9.99)$$

$$\varepsilon_{shellPRE} = 2 \cdot \left\{ 1 + C_{rPRE} + (1 + C_{rPRE}^2)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{1 + e^{\left[-(NTU_{PRE}) \cdot \left((1 + C_{rPRE}^2)^{\frac{1}{2}} \right) \right]}}{1 - e^{\left[-(NTU_{PRE}) \cdot \left((1 + C_{rPRE}^2)^{\frac{1}{2}} \right) \right]}} \right\}^{-1} \quad (9.100)$$

$$\varepsilon_{shellPRE} = 2 \cdot \left\{ 1 + 0,559 + (1 + 0,559^2)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{1 + e^{\left[-(0,683) \cdot \left((1 + 0,559^2)^{\frac{1}{2}} \right) \right]}}{1 - e^{\left[-(0,683) \cdot \left((1 + 0,559^2)^{\frac{1}{2}} \right) \right]}} \right\}^{-1} = 0,43 \quad [-]$$

V Tab. 21 jsou porovnány tlakové ztráty mezitrubkového prostoru a efektivita výměníků dle použitých solí. Pro dané parametry vychází tlakové ztráty dosti podobně, efektivitu výměníku budeme dále používat pro shell and tube .

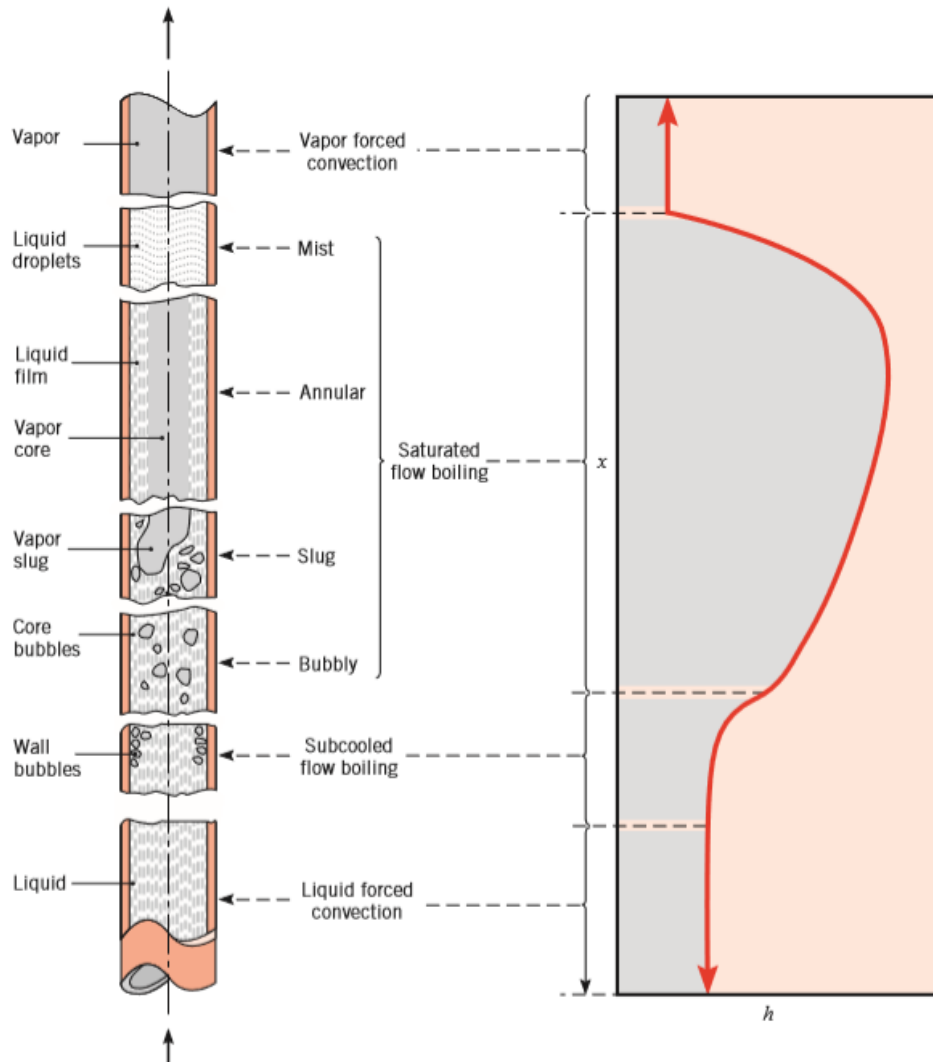
Tab. 21 Porovnání tlakových ztrát a efektivit

Médium			sůl A	sůl B	sůl C
P_{LPRE}	Stoupání	[-]	1,4		
f_{PRE}	Koeficient tření	[-]	0,3		
χ_{PRE}	Korekční faktor	[-]	1		
Δp_{PREs}	Tlak. ztráty mezi.	[bar]	3,14	3,14	3,09
Efektivita					
C_{PREw}	Měrná kap. vody	[kW/K]	49,149		
C_{PREs}	Měrná kap. soli	[kW/K]	87,994	87,964	101,842
C_{PREmin}	Min. měrná kap.	[kW/K]	49,149		
C_{PREmax}	Max. měrná kap.	[kW/K]	87,994	87,964	101,842
C_{rPRE}	Poměr tep. proudů	[kW/K]	0,559	0,559	0,483
NTU_{PRE}	Bezrozměrné kri. NTU	[-]	0,683		
ε_{krPRE}	Efektivita křížového proudu	[-]	0,72	0,72	0,76
$\varepsilon_{shellPRE}$	Efektivita shell and tube	[-]	0,43	0,43	0,44

9.3. Návrh EVAPORATORU

Ve výparníku se mění kapalná fáze na plynou fázi za konstantní teploty, při dodání velkého tepla tzv. latentního tepla. V tomto případě bude var probíhat v dlouhých trubkách.

„U varu v dlouhých trubkách následuje za zónou bublinkového varu ještě oblast tenkého filmu proudící kapaliny.“ [16] Právě v konečné oblasti tenkého filmu je dle Obr. 31 dosaženo největšího součinitele přestupu tepla. Z toho vychází, že největší přestup je u výstupní části výměníku.



Obr. 31 Var v trubkách s průběhem α (h) po délce trubky [20]

Nejprve určíme výstupní rychlost páry, poté zvolíme trubky a následně určíme počet trubek. Trubky volíme bezešvé Tr 70 x 5 z materiálu 316. [18] Po zjištění těchto parametrů určíme součinitel přestupu tepla soli a následně iterujeme součinitel přestupu tepla na straně parovodní směsi.

Provozní tlak napájecí vody:

$$p_v = 75 \text{ [bar]} \quad (9.101)$$

Vstupní teplota napájecí vody a výstupní teplota páry:

$$t_{outPREW} = t_{inEVAw} = t_{EVAw} = t_{outEVAp} = t_{EVAp} = 290,54 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (9.102)$$

Měrný objem napájecí vody na vstupu:

$$t_{EVAw} = 290,54 \text{ [}^\circ\text{C]} \rightarrow v^I_{inEVAw} = 0,001368 \text{ [m}^3\text{/kg]} \quad (9.103)$$

Zvolená rychlost napájecí vody na vstupu:

$$c_{in_{EVAw}} = 1,2 [m/s] \quad (9.104)$$

Měrný objem páry na výstupu:

$$t_{EVAp} = 290,54 [^{\circ}C] \rightarrow v^{II}_{out_{EVAp}} = 0,02533 [m^3/kg] \quad (9.105)$$

Rychlost páry na výstupu:

$$S_{i_{EVAp}} = S_{i_{EVAw}} \quad (9.106)$$

$$\dot{m}_w = \dot{m}_p = \frac{S_{i_{EVAp}} \cdot c_{out_{EVAp}}}{v_{out_{EVAp}}} = \frac{S_{i_{EVAw}} \cdot c_{in_{EVAw}}}{v_{in_{EVAw}}} [kg/s] \quad (9.107)$$

$$c_{out_{EVAp}} = \frac{v_{out_{EVAp}} \cdot c_{in_{EVAw}}}{v_{in_{EVAw}}} = \frac{0,02533 \cdot 1,2}{0,001368} = 22,2 [m/s] \quad (9.108)$$

Vnitřní průměr trubky napájecí vody/páry výměníku:

$$d_{i_{EVA_{sm}}} = 60 [mm] \quad (9.109)$$

Počet trubek výměníku v jedné cestě:

$$\dot{m}_p = \frac{\dot{V}_p}{v_{out_{EVAp}}} = \frac{S_{i_{EVAp}} \cdot n_{t_{EVAp}} \cdot c_{out_{EVAp}}}{v_{out_{EVAp}}} \rightarrow n_{t_{EVAp}} = \frac{\dot{m}_p \cdot v_{out_{EVAp}}}{S_{i_{EVAp}} \cdot c_{out_{EVAp}}} [ks] \quad (9.110)$$

$$n_{t_{EVAp}} = \frac{4 \cdot \dot{m}_p \cdot v_{out_{EVAp}}}{\pi \cdot d_{i_{EVA_{sm}}}^2 \cdot c_{out_{EVAp}}} = \frac{4 \cdot 10,302 \cdot 0,02533}{\pi \cdot (60 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 22,2} = 4,15 \doteq 5 [ks]$$

Skutečná rychlost páry pro reálný počet trubek na výstupu:

$$c_{Sout_{EVAp}} = \frac{\dot{m}_p \cdot v_{out_{EVAp}}}{S_{i_{EVAp}} \cdot n_{t_{EVAp}}} = \frac{4 \cdot \dot{m}_p \cdot v_{out_{EVAp}}}{\pi \cdot d_{i_{EVAp}}^2 \cdot n_{t_{EVAp}}} = \frac{4 \cdot 10,302 \cdot 0,02533}{\pi \cdot (60 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 5} = 18,5 [m/s] \quad (9.111)$$

Dynamická viskozita napájecí vody na vstupu:

$$p_v = 75 [bar], t_{EVAw} = 290,54 [^{\circ}C] \rightarrow \mu_{in_{EVAw}} = 8,95 \cdot 10^{-5} [Pa \cdot s] \quad (9.112)$$

Dynamická viskozita páry na výstupu:

$$p_v = 75 [bar], t_{EVAp} = 290,54 [^{\circ}C] \rightarrow \mu_{out_{EVAp}} = 1,92 \cdot 10^{-5} [Pa \cdot s] \quad (9.113)$$

Povrchové napětí páry:

$$t_{EVAp} = 290,54 [^{\circ}C] \rightarrow \sigma_{EVAp} = 0,01654 [N/m] \quad (9.114)$$

Tepelná vodivost napájecí vody na vstupu:

$$t_{EVA_w} = 290,54 \text{ [}^\circ\text{C]} \rightarrow \lambda_{inEVA_w} = 0,5611 \text{ [W/m} \cdot \text{K]} \quad (9.115)$$

Měrná tepelná kapacita napájecí vody na vstupu:

$$t_{EVA_w} = 290,54 \text{ [}^\circ\text{C]} \rightarrow c_{p_{inEVA_w}} = 5,5043 \text{ [kJ/kg} \cdot \text{K]} \quad (9.116)$$

Hustota napájecí vody na vstupu:

$$t_{EVA_w} = 290,54 \text{ [}^\circ\text{C]} \rightarrow \rho_{inEVA_w} = 730,88 \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (9.117)$$

Saturační teplota napájecí vody:

$$t_{SAT_{EVA}} = t_{EVA_w} = 290,54 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (9.118)$$

Entalpie napájecí vody na vstupu:

$$t_{EVA_w} = 290,54 \text{ [}^\circ\text{C]} \rightarrow I_{inEVA_w} = 1\,292,7 \text{ [kJ/kg]} \quad (9.119)$$

Entalpie páry na výstupu:

$$t_{EVA_p} = 290,54 \text{ [}^\circ\text{C]} \rightarrow I_{outEVA_p} = 2\,765,8 \text{ [kJ/kg]} \quad (9.120)$$

Výparné teplo při fázové změně:

$$r_{EVA_{sm}} = I_{outEVA_p} - I_{inEVA_w} = 2\,765,8 - 1\,292,7 = 1\,473,1 \text{ [kJ/kg]} \quad (9.121)$$

9.3.1. Návrh solné strany

Provozní tlak roztavené soli:

$$p_v = 10 \text{ [bar]} \quad (9.122)$$

Vstupní teplota roztavené soli:

$$t_{inEVA_s} = 470,56 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (9.123)$$

Hustota roztavené soli na vstupu:

$$t_{inEVA_s} = 470,56 \text{ [}^\circ\text{C]} \rightarrow \rho_{inEVA_s} = 1\,796 \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (9.124)$$

Měrná tepelná kapacita roztavené soli na vstupu:

$$t_{in_{EVA_S}} = 470,56 [^{\circ}C] \rightarrow c_{p_{in_{EVA_S}}} = 1,523 [kJ/kg \cdot K] \quad (9.125)$$

Kinematická viskozita roztavené soli na vstupu:

$$t_{in_{EVA_S}} = 470,56 [^{\circ}C] \rightarrow \vartheta_{in_{EVA_S}} = 6,94 \cdot 10^{-7} [m^2/s] \quad (9.126)$$

Tepelná vodivost roztavené soli na vstupu:

$$t_{in_{EVA_S}} = 470,56 [^{\circ}C] \rightarrow \lambda_{in_{EVA_S}} = 0,53175 [W/m \cdot K] \quad (9.127)$$

Prandtl roztavené soli na vstupu:

$$Pr_{in_{EVA_S}} = \frac{\vartheta_{in_{EVA_S}} \cdot c_{p_{in_{EVA_S}}} \cdot \rho_{in_{EVA_S}}}{\lambda_{in_{EVA_S}}} = \frac{6,94 \cdot 10^{-7} \cdot 1,523 \cdot 10^3 \cdot 1796}{0,53175} = 3,571[-] \quad (9.128)$$

Výstupní teplota roztavené soli:

$$t_{out_{EVA_S}} = 300,54 [^{\circ}C] \quad (9.129)$$

Hustota roztavené soli na výstupu:

$$t_{out_{EVA_S}} = 300,54 [^{\circ}C] \rightarrow \rho_{out_{EVA_S}} = 1901 [kg/m^3] \quad (9.130)$$

Měrná tepelná kapacita roztavené soli na výstupu:

$$t_{out_{EVA_S}} = 300,54 [^{\circ}C] \rightarrow c_{p_{out_{EVA_S}}} = 1,494 [kJ/kg \cdot K] \quad (9.131)$$

Kinematická viskozita roztavené soli na výstupu:

$$t_{out_{EVA_S}} = 300,54 [^{\circ}C] \rightarrow \vartheta_{out_{EVA_S}} = 1,74 \cdot 10^{-6} [m^2/s] \quad (9.132)$$

Tepelná vodivost roztavené soli na výstupu:

$$t_{out_{EVA_S}} = 300,54 [^{\circ}C] \rightarrow \lambda_{out_{EVA_S}} = 0,49915 [W/m \cdot K] \quad (9.133)$$

Prandtl roztavené soli na výstupu:

$$Pr_{out_{EVA_S}} = \frac{\vartheta_{out_{EVA_S}} \cdot c_{p_{out_{EVA_S}}} \cdot \rho_{out_{EVA_S}}}{\lambda_{out_{EVA_S}}} = \frac{1,74 \cdot 10^{-6} \cdot 1,494 \cdot 1901}{0,49015} = 9,874[-] \quad (9.134)$$

Vnější průměr trubky napájecí vody:

$$d_{e_{EVA_{sm}}} = 70 [mm] \quad (9.135)$$

Koeficient rozteče trubek v trubkovnici:

Trubky budou do trubkovnice zaválcovány a následně zavařeny, kvůli snížení rizika netěsnosti lisovaného spoje. Z tohoto důvodu volím koeficient pro lisování.

$$t_{lis} = \langle 1,25 \div 1,5 \rangle \cdot d_e$$

$$volím \rightarrow t_{lis} = 1,4 \cdot d_e \quad (9.136)$$

$$t_{lis_{EVA}} = 1,4 \cdot d_{e_{EVA_{sm}}} = 1,4 \cdot 70 = 98 \text{ [mm]}$$

Volím 36 tahů trubek, kvůli zmenšení délky výměníku.

$$n_{t_{EVA}} = n_{t_{EVA_P}} \cdot tahy = n_{t_{EVA_P}} \cdot 36 = 5 \cdot 36 = 180 \text{ [-]} \quad (9.137)$$

$$n_{t_{EVA}} \cdot t_{lis_{EVA}}^2 \leq S_{B_{EVA}}$$

$$n_{t_{EVA}} \cdot t_{lis_{EVA}}^2 \leq \frac{\pi \cdot D_{B_{EVA}}^2}{4} \rightarrow D_{B_{EVA}} = \sqrt[2]{\frac{4 \cdot n_{t_{EVA}} \cdot t_{lis_{EVA}}^2}{\pi}} = 2 \cdot \sqrt[2]{\frac{180 \cdot 98^2}{\pi}}$$

$$= 1\,483,6 \text{ [mm]} \quad (9.138)$$

$$volím \rightarrow D_{B_{EVA}} = 1\,520 \text{ [mm]}$$

Rychlost roztavené soli na vstupu:

$$c_{in_{EVA_S}} = 2 \text{ [m/s]} \quad (9.139)$$

Max. rychlost roztavené soli v mezitrubkovém systému:

Dosazujeme do rov.(9.49).

$$c_{max_{EVA_S}} = \frac{t_{lis_{EVA}}}{2 \cdot (t_{lis_{EVA}} - d_{e_{EVA_{sm}}})} \cdot c_{in_{EVA_S}} = \frac{98 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot (98 - 70) \cdot 10^{-3}} \cdot 2 = 3,5 \text{ [m/s]} \quad (9.140)$$

Reynoldsovo číslo pro mezitrubkový prostor [20]:

Dosazujeme do rov.(9.51).

$$Re_{D,EVA_S} = \frac{c_{max_{EVA_S}} \cdot d_{e_{EVA_{sm}}}}{\vartheta_{in_{EVA_S}}} = \frac{3,5 \cdot 70 \cdot 10^{-3}}{6,94 \cdot 10^{-6}} = 353\,030,3 \text{ [-]} \quad (9.141)$$

Nusseltovo číslo pro mezitrubkový prostor:

Dosadíme do rov.(9.53) a velikost $Re_{D,max} = Re_{D,EVA_S}$ leží v rozmezí $2 \cdot 10^5 \div 2 \cdot 10^6$. Pro náš případ jsou dle Tab. 17 koeficienty $C_1 = 0,021$ a $m = 0,84$.

$$\overline{Nu}_{EVA_S} = C_{1_{EVA_S}} \cdot Re_{D,EVA_S}^{m_{EVA_S}} \cdot Pr_{in_{EVA_S}}^{0,36} \cdot \left(\frac{Pr_{in_{EVA_S}}}{Pr_{out_{EVA_S}}} \right)^{1/4} \quad (9.142)$$

V našem případě máme 36 tahů a 15 řad. Z toho jsme určily přibližný koeficient $C_2 = 0,987 = C_{2PREs}$ z Tab. 18.

$$\overline{Nu}_{EVA_S} = C_{2EVA_S} \cdot C_{1EVA_S} \cdot Re_{D,EVA_S}^{m_{EVA_S}} \cdot Pr_{inEVA_S}^{0,36} \cdot \left(\frac{Pr_{inEVA_S}}{Pr_{outEVA_S}} \right)^{1/4} \quad (9.143)$$

$$\overline{Nu}_{EVA_S} = 0,987 \cdot 0,021 \cdot 353\,030,3^{0,84} \cdot 3,571^{0,36} \cdot \left(\frac{3,571}{9,874} \right)^{\frac{1}{4}} = 360,8 [-]$$

Součinitel přestupu tepla pro roztavenou sůl:

Dosadíme do rov.(9.28).

$$\begin{aligned} \overline{Nu}_{EVA_S} &= \frac{\alpha_{EVA_S} \cdot d_{EVA_{sm}}}{\lambda_{inEVA_S}} \rightarrow \alpha_{EVA_S} = \frac{\overline{Nu}_{EVA_S} \cdot \lambda_{inEVA_S}}{d_{eEVA_{sm}}} = \frac{360,8 \cdot 0,53175}{70 \cdot 10^{-3}} \\ &= 2\,741 [W/m^2 \cdot K] \end{aligned} \quad (9.144)$$

Výkon výměníku:

$$\dot{Q}_{EVA} = \dot{m}_P \cdot (I_{outEVA_P} - I_{inEVA_W}) = 10,302 \cdot (2\,765,8 - 1\,292,7) = 15\,175,9 [kW] \quad (9.145)$$

V Tab. 22 jsou porovnány parametry solné části pro jednotlivé soli. Pro dané parametry byly vypočítány součinitele přestupu tepla použité pro další výpočty.

Tab. 22 Porovnání parametrů solné části dle jednotlivých solí

Médium		sůl A	sůl B	sůl C	
Parametry na vstupu					
c_{inEVA_S}	Rychlost soli	[m/s]	2		
t_{inEVA_S}	Teplota soli	[°C]	470,56		
ρ_{inEVA_S}	Hustota soli	[kg/m ³]	1 796	1 791	1 739
$c_{p_{inEVA_S}}$	Měrná tep. kapacita	[kJ/kg.K]	1,523	1,528	1,755
ϑ_{inEVA_S}	Kinematická viskozita	[m ² /s]	6,94E-07	8,3585E-07	7,1607E-07
λ_{inEVA_S}	Tepelná vodivost	[W/m.K]	0,53175	0,5374	0,53
Pr_{inEVA_S}	Prandtlovo číslo	[-]	3,571	4,256	4,122
Parametry na výstupu					
t_{outEVA_S}	Teplota soli	[°C]	300,54		
ρ_{outEVA_S}	Hustota soli	[kg/m ³]	1 901	1 901	1 867
$c_{p_{outEVA_S}}$	Měrná tep. kapacita	[kJ/kg.K]	1,494	1,498	1,987
ϑ_{outEVA_S}	Kinematická viskozita	[m ² /s]	1,735E-06	1,7333E-06	1,4585E-06
λ_{outEVA_S}	Tepelná vodivost	[W/m.K]	0,49915	0,5137	0,53
Pr_{outEVA_S}	Prandtlovo číslo	[-]	9,874	9,609	10,212
Vypočítané parametry					
c_{maxEVA_S}	Max. rychlost mezitr.	[m/s]	3,5		
Re_{D,EVA_S}	Reynolds mezitr.	[-]	353 030,3	293 116,2	342 147,4
C_{1,EVA_S}	Koeficient C ₁	[-]	0,021	0,021	0,021
m_{EVA_S}	Koeficient m	[-]	0,84	0,84	0,84
C_{2,EVA_S}	Koeficient C ₂	[-]	0,987	0,987	0,987
N_{LEVA}	Počet řad	[-]	11		
\overline{Nu}_{EVA_S}	Nusseltovo č. mezitr.	[-]	360,8	436,8	431,7
α_{EVA_S}	Souč. přestupu soli	[W/m ² .K]	2 741	3 353,1	3 268,4
\dot{Q}_{EVA}	Výkon výměníku	[kW]	15 175,9		

9.3.1. Návrh vodní/parní strany

Zvolený součinitel přestupu tepla po interpolaci:

$$\alpha_{EVA_{sm}} = 27\,261,63 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{K]} \quad (9.146)$$

Součinitel prostupu tepla trubkami:

Dosadíme do rov. (9.58).

$$\begin{aligned}
 k_{EVA} &= \frac{1}{\frac{1}{d_{eEVA_{sm}}} + \frac{\epsilon_{iEVA_{sm}}}{d_{iEVA_{sm}}} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{Tr}} \cdot \ln \frac{d_{eEVA_{sm}}}{d_{iEVA_{sm}}} + \frac{\epsilon_{eEVA_s}}{d_{eEVA_{sm}}} + \frac{1}{d_{eEVA_{sm}} \cdot \alpha_{EVA_s}}} \\
 &= \frac{1}{\frac{1}{60 \cdot 10^{-3} \cdot 27\,261,63} + \frac{9 \cdot 10^{-5}}{60 \cdot 10^{-3}} + \frac{1}{2 \cdot 33} \cdot \ln \frac{70 \cdot 10^{-3}}{60 \cdot 10^{-3}} + \frac{9 \cdot 10^{-5}}{70 \cdot 10^{-3}} + \frac{1}{70 \cdot 10^{-3} \cdot 2\,741}} \\
 &= 1\,305,3 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{K]}
 \end{aligned} \tag{9.147}$$

Hustota tepelného toku 1 trubky [16]:

$$\begin{aligned}
 q_{EVA} &= k_{EVA} \cdot (t_{střEVA_s} - t_{EVA_p}) \text{ [W/m}^2\text{]} \\
 q_{EVA} &= 1\,305,3 \cdot (385,55 - 290,54) \cdot 10^3 = 124 \text{ [kW/m}^2\text{]}
 \end{aligned} \tag{9.148}$$

Délka 1 trubky [16]:

$$\begin{aligned}
 q &= \frac{\dot{Q}}{\pi \cdot D_i \cdot L} \text{ [W/m}^2\text{]} \\
 q_{EVA} &= \frac{\dot{Q}_{EVA}}{\pi \cdot d_{iEVA_{sm}} \cdot L_{EVA} \cdot n_{tEVA_p}} \rightarrow L_{EVA} = \frac{\dot{Q}_{EVA}}{\pi \cdot d_{iEVA_{sm}} \cdot q_{EVA} \cdot n_{tEVA_p}} \\
 L_{EVA} &= \frac{15\,175,9}{\pi \cdot 60 \cdot 10^{-3} \cdot 124 \cdot 10^3 \cdot 5} = 129,84 \text{ [m]}
 \end{aligned} \tag{9.149}$$

Přehřátí napájecí vody [16]:

$$\begin{aligned}
 q &= \alpha \cdot \Delta T_{SAT} \text{ [K]} \\
 q_{EVA} &= \alpha_{EVA_{sm}} \cdot \Delta T_{SAT_{EVA}} \rightarrow \Delta T_{SAT_{EVA}} = \frac{q_{EVA}}{\alpha_{EVA_{sm}}} = \frac{124 \cdot 10^3}{27\,261,63} = 4,55 \text{ [K]}
 \end{aligned} \tag{9.150}$$

Teplota stěny trubky [16]:

$$\Delta T_{SAT_{EVA}} = t_{Tr} - t_{SAT_{EVA}} \rightarrow t_{Tr} = \Delta T_{SAT_{EVA}} + t_{SAT_{EVA}} = 4,55 + 290,54 = 295,09 \text{ [}^\circ\text{C]} \tag{9.151}$$

Tlak syté páry při teplotě stěny:

$$t_{Tr} = 295,09 \text{ [}^\circ\text{C]} \rightarrow p_{Tr} = 80,1 \text{ [bar]} \tag{9.152}$$

Rozdíl tlaků syté páry a tlaku při teplotě stěny [16]:

$$\Delta p_{SAT_{EVA}} = p_{Tr} - p_{SAT_{EVA}} = 80,1 - 75 = 5,1 \text{ [bar]} \tag{9.153}$$

Součinitel přestupu bublinkového varu [16]:

Korelaci pro součinitel homogenního bublinkového varu dle Forster-Zuber.

$$\alpha_{FZEVA} = 0,00122 \cdot \left(\frac{\Delta T_{SAT_{EVA}} \cdot v_{out_{EVA_P}}}{r_{EVA_{sm}}} \right)^{0,24} \cdot \frac{\Delta p_{SAT_{EVA}}^{0,75} \cdot c_{p_{in_{EVA_w}}}^{0,45} \cdot \rho_{in_{EVA_w}}^{0,49} \cdot \lambda_{in_{EVA_w}}^{0,79}}{\sigma_{EVA_P}^{0,5} \cdot \mu_{in_{EVA_w}}^{0,29}} \quad (9.154)$$

$$\begin{aligned} \alpha_{FZEVA} &= 0,00122 \cdot \left(\frac{4,55 \cdot 0,02533}{1\,473,1 \cdot 10^3} \right)^{0,24} \\ &\cdot \frac{(5,1 \cdot 10^5)^{0,75} \cdot (5,5043 \cdot 10^3)^{0,45} \cdot 730,88^{0,49} \cdot 0,5611^{0,79}}{0,01654^{0,5} \cdot (8,95 \cdot 10^{-5})^{0,29}} \\ &= 41\,111,7 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{K]} \end{aligned}$$

Kvalita páry [16]:

$$\begin{aligned} x_{EVA} &= \frac{I_{stř_{EVA_{sm}}} - I_{EVA_w}}{r_{EVA_{sm}}} = \frac{\frac{(I_{EVA_P} + I_{EVA_w})}{2} - I_{EVA_w}}{r_{EVA_{sm}}} \\ &= \frac{\frac{(2\,765,8 + 1\,292,7)}{2} - 1\,292,7}{1\,473,1} = 0,5 \text{ [-]} \end{aligned} \quad (9.155)$$

Reynoldsovo číslo pro parovodní směs [16]:

$$Re_{EVA_{sm}} = \frac{4 \cdot \dot{m}_w \cdot (1 - x_{EVA})}{\pi \cdot d_{i_{EVA_{sm}}} \cdot \mu_{in_{EVA_w}}} = \frac{4 \cdot 10,302 \cdot (1 - 0,5)}{\pi \cdot 60 \cdot 10^{-3} \cdot 8,95 \cdot 10^{-5}} = 244\,246,5 \text{ [-]} \quad (9.156)$$

Prandtlovo číslo pro napájecí vodu:

$$\begin{aligned} Pr_{EVA_w} &= \frac{\vartheta_{in_{EVA_w}} \cdot c_{p_{in_{EVA_w}}} \cdot \rho_{in_{EVA_w}}}{\lambda_{in_{EVA_w}}} = \frac{\mu_{in_{EVA_w}} \cdot c_{p_{in_{EVA_w}}} \cdot \rho_{in_{EVA_w}}}{\lambda_{in_{EVA_w}}} \\ &= \frac{\mu_{in_{EVA_w}} \cdot c_{p_{in_{EVA_w}}}}{\lambda_{in_{EVA_w}}} \end{aligned} \quad (9.157)$$

$$Pr_{EVA_{sm}} = \frac{8,95 \cdot 10^{-5} \cdot 5,5043 \cdot 10^3}{0,5611} = 0,878 \text{ [-]}$$

Součinitel přestupu tepla nucené konvekce [16]:

Korelaci pro nucenou konvekci proudící kapaliny trubkou, počítána dle Dittusovy Boelterovy.

$$\frac{\alpha_{DBEVA} \cdot d_{iEVA_{sm}}}{\mu_{inEVA_w}} = 0,023 \cdot Re_{EVA_{sm}}^{0,8} \cdot Pr_{EVA_{sm}}^{0,4} \rightarrow \alpha_{DBEVA}$$

$$= \frac{0,023 \cdot Re_{EVA_{sm}}^{0,8} \cdot Pr_{EVA_{sm}}^{0,4} \cdot \mu_{inEVA_w}}{d_{iEVA_w}} \quad (9.158)$$

$$\alpha_{DBEVA} = \frac{0,023 \cdot 244\,246,5^{0,8} \cdot 0,878^{0,4} \cdot 8,95 \cdot 10^{-5}}{60 \cdot 10^{-3}} = 4\,171,5 [W/m^2 \cdot K]$$

Martinelliho parametr X pro vyvinuté turbulentní proudění [16]:

Jedná se o druhou odmocninu tlakových ztrát.

$$X \cong \left(\frac{1 - x_{EVA}}{x_{EVA}} \right)^{0,9} \cdot \left(\frac{1}{\rho_{inEVA_w} \cdot v_{outEVA_p}} \right)^{0,9} \cdot \left(\frac{\mu_{inEVA_w}}{\mu_{outEVA_p}} \right)^{0,1} \quad (9.159)$$

$$X \cong \left(\frac{1 - 0,5}{0,5} \right)^{0,9} \cdot \left(\frac{1}{730,88 \cdot 0,02533} \right)^{0,9} \cdot \left(\frac{8,95 \cdot 10^{-5}}{1,92 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,1} = 0,2711$$

Váhový faktor F pro korekci nucené konvekce [16]:

Tento faktor koriguje nucenou konvekci ve šplhajícím filmu. Chen vyjádřil tuto závislost jako poměr tlakových ztrát při jednofázovém proudění kapaliny a páry. Faktor F stanovíme pomocí Martinelliho parametru X.

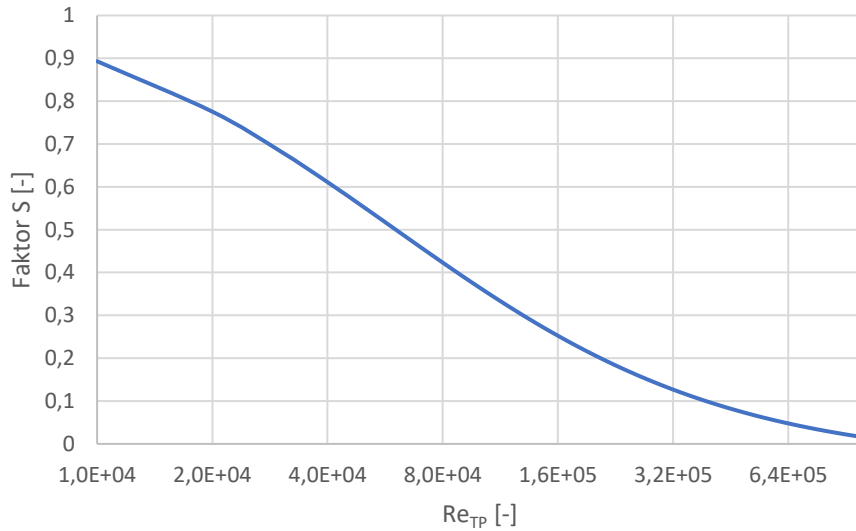
$$F(X) = 0,62 + 2,152 \cdot X^{-0,754} = 0,62 + 2,152 \cdot 0,2711^{-0,754} = 6,378 \quad (9.160)$$

Reynoldsovo kritérium pro dvoufázový tok [16]:

$$Re_{EVA_{TP}} = F(X)^{1,25} \cdot Re_{EVA_{sm}} = 6,387^{1,25} \cdot 244\,246,5 = 2\,475\,414,1 [-] \quad (9.161)$$

Váhový faktor $S(Re_{EVA_{TP}})$ (bublínkového varu) [16]:

Závislost váhového faktoru bublínkového varu Obr. 32 na Reynoldsově kritériu pro dvoufázový tok je možné aproximovat racionální funkcí, pokud je splněno $Re_{TP} = 10^4 \div 10^6$. Pro náš případ se $Re_{TP} = Re_{EVA_{TP}}$ se nachází v mimo oblast. Pro případ, kdy $Re_{EVA_{TP}}$ je mimo oblast nejsou korelace z naměřených dat a z diagramu je vidět průběh S, který klesá. Z toho důvodu použijeme max. hodnotu odpovídající max. $Re_{TP} = 10^6$.



Obr. 32 Průběh funkce $S(Re_{TP})$

$$S(Re_{EVA_{TP}}) = \frac{1,05 - 7,67 \cdot 10^{-7} \cdot Re_{EVA_{TP}}}{1,0 + 1,67 \cdot 10^{-5} \cdot Re_{EVA_{TP}}} = \frac{1,05 - 7,67 \cdot 10^{-7} \cdot 10^6}{1,0 + 1,67 \cdot 10^{-5} \cdot 10^6} = 0,01599 \quad (9.162)$$

Výsledný součinitel přestupu tepla [16]:

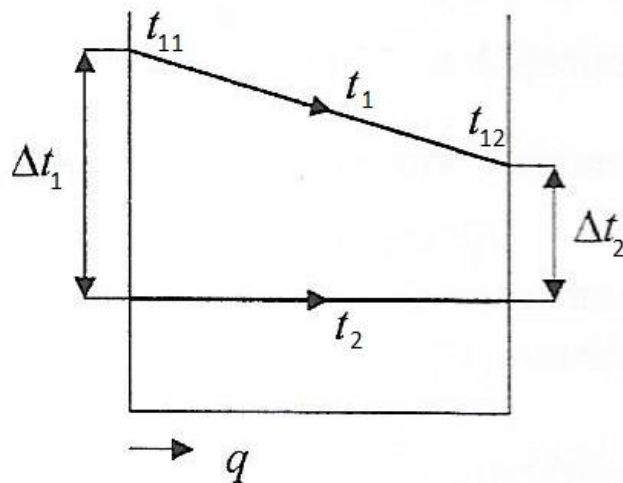
Jde o součet dvou přestupů, od bublinkového varu α_b a konvektivního varu v kapalinovém filmu α_c .

$$\alpha = \alpha_b + \alpha_c \quad (9.163)$$

$$\begin{aligned} \alpha_{EVA_{sm}} &= S(Re_{EVA_{TP}}) \cdot \alpha_{FZEVA} + F(X) \cdot \alpha_{DBEVA} \\ &= 0,01599 \cdot 41\,111,7 + 6,378 \cdot 4\,171,5 = 27\,261,6 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{K]} \end{aligned} \quad (9.164)$$

Střední logaritmický spád výměníku:

Na Obr. 33 je zobrazen průběh teplot ve výměníku v němž probíhá fázová změna, var jednoho média.



Obr. 33 Střední logaritmický spád výparníku

Střední teplotní spád výparníku dle Obr. 33:

$$\Delta t_{ln} = \frac{(t_{11} - t_2) - (t_{12} - t_2)}{\ln \frac{(t_{11} - t_2)}{(t_{12} - t_2)}} [K] \quad (9.165)$$

Stejně jako u PRE i zde budeme počítat se středním logaritickým spádem pro protiproud.

$$\Delta t_{ln_{EVA}} = \frac{(t_{in_{EVA_S}} - t_{EVA_P}) - (t_{out_{EVA_S}} - t_{EVA_w})}{\ln \frac{(t_{in_{EVA_S}} - t_{EVA_P})}{(t_{out_{EVA_S}} - t_{EVA_w})}} [K] \quad (9.166)$$

$$\Delta t_{ln_{EVA}} = \frac{(470,56 - 290,54) - (300,54 - 290,54)}{\ln \frac{(470,56 - 290,54)}{(300,54 - 290,54)}} = 58,82 [K]$$

Výměnná plocha výměníku:

$$\dot{Q}_{EVA} = k_{EVA} \cdot S_{EVA} \cdot \Delta t_{ln_{EVA}} [kW] \quad (9.167)$$

$$S_{EVA} = \frac{\dot{Q}_{EVA}}{k_{EVA} \cdot \Delta t_{ln_{EVA}}} = \frac{15\,175,9 \cdot 10^3}{1\,305,3 \cdot 58,82} = 197,7 [m^2] \quad (9.168)$$

Délka trubek napájecí vody:

Dosadíme do rov.(9.68).

$$S_{EVA} = \pi \cdot d_{e_{EVA_{sm}}} \cdot L_{EVA} \cdot n_{t_{EVA}} \rightarrow L_{EVA} = \frac{S_{EVA}}{\pi \cdot d_{e_{EVA_w}} \cdot n_{t_{EVA}}} = \frac{197,7}{\pi \cdot 70 \cdot 10^{-3} \cdot 180} \quad (9.169)$$

$$= 4,99 [m]$$

V Tab. 23 jsou porovnány hodnoty pro var v trubkách pro jednotlivé soli. Pro dané parametry vychází teplotní délka poměrně podobně, liší se cca 30 až 40 cm.

Tab. 23 Porovnání parametrů parovodní části výměníku dle typu soli

Médium			sůl A	sůl B	sůl C
$\alpha_{EVA_{sm}}$	Interpol. souč. přest. směsi	[W/m ² .K]	27 261,63	27 323,27	27 315,52
k_{EVA}	Souč. prostupu tepla	[W/m ² .K]	1 305,3	1 429,8	1 414,1
q_{EVA}	Hustota tepelného toku	[kW/m ²]	124	135,8	134,4
$r_{EVA_{sm}}$	Výparné teplo	[kJ/kg]	1473,1		
L_{EVA}	Délka trubky	[m]	129,84	118,54	119,85
$t_{SAT_{EVA}}$	Saturační teplota	[°C]	290,54		
Součinitel přestupu tepla bublinkového varu					
$\Delta T_{SAT_{EVA}}$	Přehřátí	[K]	4,55	4,97	4,92
t_{Tr}	Teplota stěny trubky	[°C]	295,09	295,51	295,46
p_{Tr}	Tlak při stěně trubky	[bar]	80,1	80,6	80,5
$\Delta p_{SAT_{EVA}}$	Rozdíl tlaků	[bar]	5,1	5,6	5,5
$\mu_{in_{EVA_w}}$	Dynamická viskozita vody	[Pa.s]	8,95E-05		
$\mu_{out_{EVA_p}}$	Dynamická viskozita páry	[Pa.s]	1,92E-05		
σ_{EVA_p}	Povrchové napětí páry	[N/m]	0,01654		
$\lambda_{in_{EVA_w}}$	Tepelná vodivost	[W/m.K]	0,5611		
$c_{p_{in_{EVA_w}}}$	Měrná tep. kapacita vody	[kJ/kg.K]	5,5043		
$\rho_{in_{EVA_w}}$	Hustota vody	[kg/m ³]	730,88		
$\alpha_{FZ_{EVA}}$	Přestup bublinkového varu	[W/m ² .K]	41 111,7	44 967,5	44 482,7
Součinitel přestupu tepla nucené konvekce					
x_{EVA}	Kvalita páry	[-]	0,5		
$Re_{EVA_{sm}}$	Reynolds směsi	[-]	244 246,5		
$Pr_{EVA_{sm}}$	Prandtl směsi	[-]	0,878		
$\alpha_{DB_{EVA}}$	Přestup nucené konvekce	[W/m ² .K]	4 171,5		
Celkový přestup tepla směsi					
X	Martinelliho parametr	[-]	0,2711		
$F(X)$	Váhový fak. nucené kon.	[-]	6,378		
$Re_{EVA_{TP}}$	Reynolds dvoufázového toku	[-]	2 475 414,1		
$S(Re_{EVA_{TP}})$	Váhový fak. bublin. varu	[-]	0,01599		
$\alpha_{EVA_{sm}}$	Celkový. přestupu směsi	[W/m ² .K]	27 261,6	27 323,3	27 315,5
Délka teplosměnných trubek výměníku					
$\Delta t_{ln_{EVA}}$	Střední logaritmický spád	[K]	58,82		
S_{EVA}	Teplosměnná plocha	[m ²]	197,7	180,5	182,5
L_{EVA}	Délka teplosměnných trubek	[m]	4,99	4,56	4,61

9.3.2. Počet a velikost segmentů výměníku:

Doporučené velikosti $\frac{L}{D} = 0,3 \div 0,6$ a $\frac{U}{D} = 0,2 \div 0,35$ [16], ke správnému rozvržení přepážek umožňující správné obtékání trubkového svazku.

Rozteč segmentových přepážek:

$$volím \rightarrow \frac{L_{SEG,EVA}}{D_{BEVA}} = 0,45 \rightarrow L_{SEG,EVA} = 0,45 \cdot 1\,520 = 684 \text{ [mm]} \quad (9.170)$$

Mezera segmentové přepážky:

$$volím \rightarrow \frac{U_{SEG,EVA}}{D_{BEVA}} = 0,28 \rightarrow U_{SEG,EVA} = 0,28 \cdot 1\,520 = 425,6 [mm] \quad (9.171)$$

Počet segmentových přepážek ve výměníku:

$$počet\ přepážek = \frac{L_{EVA_w}}{L_{SEG,EVA}} = \frac{4,99}{684 \cdot 10^{-3}} = 7,3 [ks] \quad (9.172)$$

Skutečný počet segmentových přepážek a skutečná rozteč segmentů:

$$volím \rightarrow skut.\ počet\ přepážek = 8 \rightarrow L_{SSEG,EVA} = \frac{L_{EVA_w}}{skut.\ počet\ přepážek} = \frac{4,99}{8} \quad (9.173)$$

$$= 0,624 [m]$$

9.3.3. Tlakové ztráty

Tlaková ztráta trubkového prostoru [26]:

Tlakovou ztrátu trubkového systému určíme jako tlakové ztráty potrubí. Délku potrubí určíme jako délku všech trubek trubkové části. Neřešíme ztrátu na otočení proudu ve dnech.

$$\Delta p = \Delta p_{tř} + \Delta p_{zv} + \Delta p_{st} + \Delta p_m [Pa] \quad (9.174)$$

Celková ztráta trubkového prostoru se skládá ze ztráty třecí $\Delta p_{tř}$, ztráty zrychlením Δp_{zv} , ztráty hydrostatické Δp_{st} a ztráty místními odpory Δp_m , tuto ztrátu neuvažujeme.

Třecí ztráta:

Má největší podíl v celkové ztrátě.

$$\Delta p_{tř} = \int_0^L \lambda \cdot \frac{1}{d} \cdot \frac{c^2}{2} \cdot \rho \cdot dL [Pa] \quad (9.175)$$

Rychlost určíme pomocí hmotnostního průtoku:

$$c = \frac{\dot{m} \cdot v \cdot 4}{\pi \cdot d^2} [m/s] \quad (9.176)$$

Úpravou rov. (9.175) a (9.176) dostaneme vztah:

$$\Delta p_{tř_{EVA_{sm}}} = \frac{8}{\pi^2} \cdot \lambda_{EVA_{sm}} \cdot \frac{\dot{m}^2}{d_{i_{EVA_{sm}}}^5} \cdot v_{stř_{EVA_{sm}}} \cdot L_{EVA} [Pa] \quad (9.177)$$

Součinitel tření dle Moodyho diagramu:

Pro nerezový materiál je $e = e_{EVA_{sm}} = 46 [\mu m]$.

$$\frac{e_{EVA_{sm}}}{d_{i_{EVA_{sm}}}} = \frac{46 \cdot 10^{-3}}{60} = 0,00077 \quad (9.178)$$

Střední měrný objem směsi v trubce:

$$v_{střEVA_{sm}} = \frac{v^I_{inEVA_w} + v^{II}_{outEVA_p}}{2} = \frac{0,00137 + 0,02534}{2} = 0,01335 [m^3/kg] \quad (9.179)$$

Reynolds směsi:

Pro další výpočty použijeme $Re_{EVA_{sm}}$, podmínkou pro použití zmíněného Re za klasického. Podmínkou náhrady je, že var probíhá v trubkách, v nichž může být malé množství vzniklé páry oproti varu v bubnu.

Re i poměr $\frac{e}{d}$ je v daném rozsahu platný, použijeme rov. (9.78):

$$\lambda_{EVA_{sm}} = 0,0053 \cdot \left[1 + \left(20000 \cdot \frac{e_{EVA_{sm}}}{d_{iEVA_{sm}}} + \frac{10^6}{Re_{EVA_{sm}}} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \quad (9.180)$$

$$\lambda_{EVA_{sm}} = 0,0053 \cdot \left[1 + \left(20000 \cdot \frac{46 \cdot 10^{-3}}{60} + \frac{10^6}{244\,246,5} \right)^{\frac{1}{3}} \right] = 0,0195$$

Dosadíme do rov.(9.177).

$$\Delta p_{třEVA_{sm}} = \frac{8}{\pi^2} \cdot \lambda_{EVA_{sm}} \cdot \frac{\dot{m}_{1Tr}^2}{d_{iEVA_{sm}}^5} \cdot v_{střEVA_{sm}} \cdot L_{EVA} \cdot n_{tEVA} [Pa] \quad (9.181)$$

$$\Delta p_{třEVA_{sm}} = \frac{8}{\pi^2} \cdot 0,0195 \cdot \left(\frac{10,302}{5} \right)^2 \cdot 0,01335 \cdot 4,99 \cdot 180 = 10,38 [bar]$$

Ztráta zrychlením:

Tato ztráta je také nazývána jako ztráta dynamickým tlakem. Stejně jako u průtočných kotlů je i v našem případě tato ztráta velmi malá.

$$\Delta p_{zv} = \frac{c_2^2}{2} \cdot \rho_2 - \frac{c_1^2}{2} \cdot \rho_1 [Pa] \quad (9.182)$$

$$\Delta p_{zvEVA_{sm}} = \frac{c_{Sout_p}^2}{2 \cdot v^{II}_{outEVA_p}} - \frac{c_{inEVA_w}^2}{2 \cdot v^I_{inEVA_w}} [Pa] \quad (9.183)$$

$$\Delta p_{zvEVA_{sm}} = \frac{18,46^2}{2 \cdot 0,02534} - \frac{1,2^2}{2 \cdot 0,00137} = 0,062 [Pa]$$

Ztráta hydrostatická Δp_{st} :

Tuto ztrátu bychom uvažovaly v případě, že by trubky byly umístěny vertikálně, a ne horizontálně jako v našem případě.

Místní ztráty trubkového svazku:

Součinitel místní ztráty pro vstup a výstup z trubkového svazku dohromady $\xi_{SUP} = 0,7$.
Neřeším ztrátu na otočení proudu ve dnech.

$$\Delta p_{m_{EVA_{sm}}} = \xi_{SUP} \cdot \frac{c_{stř_{EVA_{sm}}}^2}{2 \cdot v_{stř_{EVA_{sm}}}} = 0,7 \cdot \frac{\left(\frac{18,46 + 1,2}{2}\right)^2}{2 \cdot 0,01335} \cdot 10^{-5} = 0,025 [bar] \quad (9.184)$$

Celková tlaková ztráta po dosažení:

$$\begin{aligned} \Delta p_{EVA_{sm}} &= \Delta p_{tř_{EVA_{sm}}} + \Delta p_{zv_{EVA_{sm}}} + \Delta p_{m_{EVA_{sm}}} = 10,38 + 0,062 + 0,025 \\ &= 10,47 [bar] \end{aligned} \quad (9.185)$$

Tlakovou ztrátu mezitrubkové části určím z následujícího vztahu [20]:

V našem případě pro čtvercové uspořádání $S_T = S_L \rightarrow P_T = P_L = \frac{S_T}{D}$ vychází faktory z diagramu na Obr. 30. Počet řad trubek trubkového svazku jsme stanovily na $N_{LEVA} = 15$.

$$Re_{D,EVA_S} = 353\,030,3 [-], P_{LEVA} = \frac{t_{lis_{EVA}}}{d_{e_{EVA_w}}} = \frac{44,8}{32} = 1,4 [-] \rightarrow f_{EVA} = 0,25 [-] \quad (9.186)$$

$$\frac{(P_{LEVA} - 1)}{(P_{LEVA} - 1)} = \frac{(1,4 - 1)}{(1,4 - 1)} = 1 [-], Re_{D,EVA_S} = 353\,030,3 [-] \rightarrow \chi_{EVA} = 1 [-] \quad (9.187)$$

Dosadíme do rov.(9.83).

$$\Delta p_{EVA_S} = N_{LEVA} \cdot (\text{počet segmentů} + 1) \cdot \chi_{EVA} \left(\frac{\rho_{in_{EVA_S}} \cdot c_{max_{EVA_S}}^2}{2} \right) \cdot f_{EVA} \quad (9.188)$$

$$\Delta p_{EVA} = 15 \cdot (8 + 1) \cdot 1 \left(\frac{1796 \cdot 3,5^2}{2} \right) \cdot 0,25 \cdot 10^{-5} = 3,71 [bar]$$

9.3.4. Efektivita výměníku metodou ϵ - NTU

Střední teplota soli ve výměníku:

$$c_{p_{stř_{EVA_S}}} = \frac{c_{p_{out_{EVA_S}}} + c_{p_{in_{EVA_S}}}}{2} = \frac{1,523 + 1,494}{2} = 1,509 [kJ/kg \cdot K] \quad (9.189)$$

Měrná tepelná kapacita soli při střední teplotě ve výměníku:

$$C_{EVA_S} = \dot{m}_{EVA_S} \cdot c_{p_{stř_{EVA_S}}} = 59,1 \cdot 1,509 = 89,109 [W/K] \quad (9.190)$$

Měrná tepelná kapacita slabšího proudu:

$$C_{EVA_{min}} = C_{EVA_S} = 89,109 [W/K] \quad (9.191)$$

Měrná tepelná kapacita silnějšího proudu:

$$C_{EVA_{max}} = C_{EVA_{sm}} \rightarrow \infty; c_{p_{EVA_{sm}}} \rightarrow \infty \quad (9.192)$$

Bezrozměrné kritérium NTU pro výměník:

Dosadíme do rov.(9.87).

$$NTU_{EVA} = \frac{k_{EVA} \cdot S_{EVA}}{C_{EVA_{min}}} = \frac{1\,305,3 \cdot 197,7}{89,109} = 2,9[-] \quad (9.193)$$

Poměr tepelných kapacit proudů:

Dosadíme do rov.(9.95).

$$C_{r_{EVA}} = \frac{C_{EVA_{min}}}{C_{EVA_{max}}} \rightarrow 0 [-] \quad (9.194)$$

Efektivita výměníku při varu [16]:

$$\varepsilon_{EVA} = 1 - e^{-NTU} = 1 - e^{-2,9} = 0,94 [-] \quad (9.195)$$

V Tab. 24 jsou porovnány ztráty v trubkách a efektivita pro jednotlivé typy solí. Pro dané parametry se tlakové ztráty v trubkách liší až o cca 1 bar.

Tab. 24 Porovnání ztrát a efektivit pro jednotlivé soli

Médium			sůl A	sůl B	sůl C
Ztráty v trubkách					
$\lambda_{EVA_{sm}}$	Součinitel tření	[-]	0,0195		
$\Delta p_{tř_{EVA_{sm}}}$	Třecí ztráty	[bar]	10,38	9,48	9,58
$\Delta p_{zv_{EVA_{sm}}}$	Ztráty zrychlením směsi	[bar]	0,062		
$\Delta p_{EVA_{sm}}$	Místní ztráty	[bar]	0,025		
$\Delta p_{EVA_{sm}}$	Celkové ztráty	[bar]	10,47	9,56	9,67
Ztráty v mezitrubkové části					
P_{LEVA}	Stoupání	[-]	1,4		
f_{EVA}	Koeficient tření	[-]	0,25		
χ_{EVA}	Korekční faktor	[-]	1		
Δp_{EVA_S}	Tlak. ztráty mezi.	[bar]	3,71	3,70	3,59
Efektivita					
C_{EVA_S}	Měrná kap. soli	[kW/K]	89,109	89,083	92,82
$C_{EVA_{min}}$	Min. měrná kap.	[kW/K]			
$C_{EVA_{max}}$	Max. měrná kap.	[kW/K]	∞		
$C_{r_{EVA}}$	Poměr tep. proudů	[kW/K]	0		
NTU_{EVA}	Bezrozměrné kri. NTU	[-]	2,9	2,9	2,78
ε_{EVA}	Efektivita	[-]	0,94	0,94	0,94

9.3.5. Návrh vodní strany po částech

Pro určení přesnější délky trubek a velikosti tlakových ztrát trubkovém systému jsme tento výměník rozdělili na čtyři části Tab. 25 až Tab. 32. Pro optimální rozdělení jsme pomocí vstupní a výstupní teploty roztavené soli.

Tab. 25 Parametry I - 1.část výparníku

1.část					
Médium			sůl A	sůl B	sůl C
Parametry na vstupu					
c_{inEVA_S}	Rychlost soli	[m/s]	2		
t_{inEVA_S}	Teplota soli	[°C]	343,05		
ρ_{inEVA_S}	Hustota soli	[kg/m ³]	1 873	1 870	1 832
$c_{p_{inEVA_S}}$	Měrná tep. kapacita	[kJ/kg.K]	1,502	1,507	1,881
ϑ_{inEVA_S}	Kinematická viskozita	[m ² /s]	1,256E-06	1,287E-06	1,402E-06
λ_{inEVA_S}	Tepelná vodivost	[W/m.K]	0,50815	0,515	0,53
Pr_{inEVA_S}	Prandtlovo číslo	[-]	6,956	7,040	9,110
Parametry na výstupu					
t_{outEVA_S}	Teplota soli	[°C]	300,54		
ρ_{outEVA_S}	Hustota soli	[kg/m ³]	1 901	1 901	1 867
$c_{p_{outEVA_S}}$	Měrná tep. kapacita	[kJ/kg.K]	1,494	1,498	1,987
ϑ_{outEVA_S}	Kinematická viskozita	[m ² /s]	1,735E-06	1,733E-06	1,458E-06
λ_{outEVA_S}	Tepelná vodivost	[W/m.K]	0,49915	0,5137	0,53
Pr_{outEVA_S}	Prandtlovo číslo	[-]	9,874	9,609	10,212
Vypočítané parametry					
c_{maxEVA_S}	Max. rychlost mezitr.	[m/s]	3,5		
Re_{D,EVA_S}	Reynolds mezitr.	[-]	118 115,6	115 340,0	174 795,1
C_{1EVA_S}	Koeficient C ₁	[-]	0,27	0,27	0,27
m_{EVA_S}	Koeficient m	[-]	0,63	0,63	0,63
C_{2EVA_S}	Koeficient C ₂	[-]	0,987		
N_{LEVA}	Počet řad	[-]	15		
\overline{Nu}_{EVA_S}	Nusseltovo č. mezitr.	[-]	514,6	538	1010,3
α_{EVA_S}	Souč. přestupu soli	[W/m ² .K]	3 735,8	3 958,2	7 649,4
$c_{p_{stíEVA_S}}$	Střední měrná tep. kap.	[kJ/kg.K]	1,498	1,503	1,93
\dot{Q}_{EVA}	Výkon výměníku	[kW]	3 760,7	3 761,4	4 069,2
Parovodní strana					
I_{inEVA_w}	Vstupní entalpie směsi	[kJ/kg]	1 292,7		
$r_{EVA_{sm}}$	Výparné teplo směsi	[kJ/kg]	365	365,1	395
I_{outEVA_P}	Výstupní entalpie směsi	[kJ/kg]	1 657,8	1 657,8	1 687,7
v_{inEVA_w}	Vstupní měrný objem	[m ³ /kg]	0,001368		
v_{outEVA_P}	Výstupní měrný objem	[m ³ /kg]	0,00731	0,00731	0,00779
c_{outEVA_P}	Výstupní rychlost	[m/s]	6,4	6,4	6,8
$c_{SoutEVA_P}$	Skutečná výstupní rychlost	[m/s]	5,3	5,3	5,7

Tab. 26 Parametry II - 1.část výparníku

Médium			sůl A	sůl B	sůl C
$\alpha_{EVA_{sm}}$	Interpol. souč. přest. směsi	[W/m ² .K]	19 726,12	19 736,31	19 828,9
k_{EVA}	Souč. prostupu tepla	[W/m ² .K]	1 459,2	1 492	1 824,6
q_{EVA}	Hustota tepelného toku	[kW/m ²]	45,6	46,6	57
$r_{EVA_{sm}}$	Výparné teplo	[kJ/kg]	365	365,1	395
L_{EVA}	Délka trubky	[m]	87,5	85,58	75,71
$t_{SAT_{EVA}}$	Saturační teplota	[°C]	290,54		
Součinitel přestupu tepla bublinkového varu					
$\Delta T_{SAT_{EVA}}$	Přehřátí	[K]	2,31	2,36	2,88
t_{Tr}	Teplota stěny trubky	[°C]	292,85	292,9	293,42
p_{Tr}	Tlak při stěně trubky	[bar]	77,6	77,6	78,2
$\Delta p_{SAT_{EVA}}$	Rozdíl tlaků	[bar]	2,6	2,6	3,2
$\mu_{in_{EVA_w}}$	Dynamická viskozita vody	[Pa.s]	8,95E-05		
$\mu_{out_{EVA_p}}$	Dynamická viskozita páry	[Pa.s]	1,92E-05		
σ_{EVA_p}	Povrchové napětí páry	[N/m]	0,01654		
$\lambda_{in_{EVA_w}}$	Tepelná vodivost	[W/m.K]	0,5611		
$c_{p_{in_{EVA_w}}}$	Měrná tep. kapacita vody	[kJ/kg.K]	5,5043		
$\rho_{in_{EVA_w}}$	Hustota vody	[kg/m ³]	730,88		
$\alpha_{FZ_{EVA}}$	Přestup bublinkového varu	[W/m ² .K]	29 142,1	29 779,6	35 570,6
Součinitel přestupu tepla nucené konvekce					
x_{EVA}	Kvalita páry	[-]	0,25		
Re_{EVA_w}	Reynolds směsi	[-]	367 440,6		
Pr_{EVA_w}	Prandtl směsi	[-]	0,878		
$\alpha_{DB_{EVA}}$	Přestup nucené konvekce	[W/m ² .K]	5 783,4		
Celkový přestup tepla směsi					
X	Martinelliho parametr	[-]	0,7365		
$F(X)$	Váhový fak. nucené kon.	[-]	3,33		
$Re_{EVA_{TP}}$	Reynolds dvoufázového toku	[-]	1 653 039,6		
$S(Re_{EVA_{TP}})$	Váhový fak. bublin. varu	[-]	0,01599		
$\alpha_{EVA_{sm}}$	Celkový. přestupu směsi	[W/m ² .K]	19 726,1	19 736,3	19 828,9
Délka teplosměnných trubek výměníku					
$\Delta t_{ln_{EVA}}$	Střední logaritmický spád	[K]	58,82		
S_{EVA}	Teplosměnná plocha	[m ²]	43,8	42,9	35,0
L_{EVA}	Délka teplosměnných trubek	[m]	39,85	38,97	31,87
Ztráty v trubkách					
$\lambda_{EVA_{sm}}$	Součinitel tření	[-]	0,0192		
$\Delta p_{tř_{EVA_{sm}}}$	Třecí ztráty	[bar]	0,734	0,718	0,587
$\Delta p_{zv_{EVA_{sm}}}$	Ztráty zrychlením směsi	[bar]	0,014		
$\Delta p_{EVA_{sm}}$	Místní ztráty	[bar]	0,009	0,009	0,009
$\Delta p_{EVA_{sm}}$	Celkové ztráty	[bar]	0,757	0,741	0,611

Tab. 27 Parametry I - 2.část výparníku

2. část					
Médium			sůl A	sůl B	sůl C
Parametry na vstupu					
c_{inEVA_S}	Rychlost soli	[m/s]	2		
t_{inEVA_S}	Teplota soli	[°C]	385,55		
ρ_{inEVA_S}	Hustota soli	[kg/m ³]	1 847	1 844	1 801
$c_{p_{inEVA_S}}$	Měrná tep. kapacita	[kJ/kg.K]	1,509	1,514	1,814
ϑ_{inEVA_S}	Kinematická viskozita	[m ² /s]	9,77E-07	1,05E-06	1,37406E-06
λ_{inEVA_S}	Tepelná vodivost	[W/m.K]	0,51602	0,523	0,53
Pr_{inEVA_S}	Prandtlovo číslo	[-]	5,280	5,584	8,468
Parametry na výstupu					
t_{outEVA_S}	Teplota soli	[°C]	343,045		
ρ_{outEVA_S}	Hustota soli	[kg/m ³]	1873	1870	1832
$c_{p_{outEVA_S}}$	Měrná tep. kapacita	[kJ/kg.K]	1,502	1,507	1,881
ϑ_{outEVA_S}	Kinematická viskozita	[m ² /s]	1,26E-06	1,29E-06	1,40164E-06
λ_{outEVA_S}	Tepelná vodivost	[W/m.K]	0,50815	0,515	0,53
Pr_{outEVA_S}	Prandtlovo číslo	[-]	6,956	7,040	9,110
Vypočítané parametry					
c_{maxEVA_S}	Max. rychlost mezitr.	[m/s]	3,5		
Re_{D,EVA_S}	Reynolds mezitr.	[-]	151 825,5	141 860,9	178 304,36
C_{1EVA_S}	Koeficient C ₁	[-]	0,27	0,27	0,27
m_{EVA_S}	Koeficient m	[-]	0,63	0,63	0,63
C_{2EVA_S}	Koeficient C ₂	[-]	0,987		
N_{LEVA}	Počet řad	[-]	15		
\overline{Nu}_{EVA_S}	Nusseltovo č. mezitr.	[-]	606,0	630,0	1055,5
α_{EVA_S}	Souč. přestupu soli	[W/m ² .K]	4 467,2	4 707,2	7 991,9
$c_{p_{stíEVA_S}}$	Střední měrná tep. kap.	[kJ/kg.K]	1,505	1,510	1,849
\dot{Q}_{EVA}	Výkon výměníku	[kW]	3 778,6	3 779,0	3 898,6
Parovodní strana					
I_{inEVA_w}	Vstupní entalpie směsi	[kJ/kg]	1 657,8	1 657,8	1 687,7
$r_{EVA_{sm}}$	Výparné teplo směsi	[kJ/kg]	366,8	366,8	378,4
I_{outEVA_p}	Výstupní entalpie směsi	[kJ/kg]	2 024,5	2 024,6	2 066,1
v_{inEVA_w}	Vstupní měrný objem	[m ³ /kg]	0,00731	0,00731	0,00779
v_{outEVA_p}	Výstupní měrný objem	[m ³ /kg]	0,01327	0,01327	0,01395
c_{outEVA_p}	Výstupní rychlost	[m/s]	9,7	9,7	10,2

Tab. 28 Parametry II - 2.část výparníku

Médium			sůl A	sůl B	sůl C
$\alpha_{EVA_{sm}}$	Interpol. souč. přest. směsi	[W/m ² .K]	27 400,13	27 415,91	27 551,74
k_{EVA}	Souč. prostupu tepla	[W/m ² .K]	1 600,2	1 630	1 901,3
q_{EVA}	Hustota tepelného toku	[kW/m ²]	118,03	120,23	140,23
$r_{EVA_{sm}}$	Výparné teplo	[kJ/kg]	366,8	366,8	378,4
L_{EVA}	Délka trubky	[m]	33,97	33,35	29,5
$t_{SAT_{EVA}}$	Saturační teplota	[°C]	290,54		
Součinitel přestupu tepla bublinkového varu					
$\Delta T_{SAT_{EVA}}$	Přehřátí	[K]	4,31	4,39	5,09
t_{Tr}	Teplota stěny trubky	[°C]	294,85	294,93	295,63
p_{Tr}	Tlak při stěně trubky	[bar]	79,8	79,9	80,7
$\Delta p_{SAT_{EVA}}$	Rozdíl tlaků	[bar]	4,8	4,9	5,7
$\mu_{in_{EVA_w}}$	Dynamická viskozita vody	[Pa.s]	8,95E-05		
$\mu_{out_{EVA_p}}$	Dynamická viskozita páry	[Pa.s]	1,92E-05		
σ_{EVA_p}	Povrchové napětí páry	[N/m]	0,01654		
$\lambda_{in_{EVA_w}}$	Tepelná vodivost	[W/m.K]	0,5611		
$c_{p_{in_{EVA_w}}}$	Měrná tep. kapacita vody	[kJ/kg.K]	5,5043		
$\rho_{in_{EVA_w}}$	Hustota vody	[kg/m ³]	730,88		
$\alpha_{FZ_{EVA}}$	Přestup bublinkového varu	[W/m ² .K]	54 324,4	55 311,6	63 806,9
Součinitel přestupu tepla nucené konvekce					
x_{EVA}	Kvalita páry	[-]	0,50		
Re_{EVA_w}	Reynolds směsi	[-]	245 811,7		
Pr_{EVA_w}	Prandtl směsi	[-]	0,878		
$\alpha_{DB_{EVA}}$	Přestup nucené konvekce	[W/m ² .K]	4 192,9		
Celkový přestup tepla směsi					
X	Martinelliho parametr	[-]	0,2743		
$F(X)$	Váhový fak. nucené kon.	[-]	6,33		
$Re_{EVA_{TP}}$	Reynolds dvoufázového toku	[-]	2 466 955,3		
$S(Re_{EVA_{TP}})$	Váhový fak. bublin. varu	[-]	0,01599		
$\alpha_{EVA_{sm}}$	Celkový. přestupu směsi	[W/m ² .K]	27 400,1	27 415,9	27 551,7
Délka teplosměnných trubek výměníku					
$\Delta t_{ln_{EVA}}$	Střední logaritmický spád	[K]	58,82		
S_{EVA}	Teplosměnná plocha	[m ²]	40,15	39,41	33,79
L_{EVA}	Délka teplosměnných trubek	[m]	36,51	35,84	30,73
Ztráty v trubkách					
$\lambda_{EVA_{sm}}$	Součinitel tření	[-]	0,0195		
$\Delta p_{tř_{EVA_{sm}}}$	Třecí ztráty	[bar]	1,624	1,595	1,367
$\Delta p_{zv_{EVA_{sm}}}$	Ztráty zrychlením směsi	[bar]	0,0158		
$\Delta p_{EVA_{sm}}$	Místní ztráty	[bar]	0,019	0,019	0,02
$\Delta p_{EVA_{sm}}$	Celkové ztráty	[bar]	1,659	1,63	1,403

Tab. 29 Parametry I - 3.část výparníku

3. část					
Médium		sůl A	sůl B	sůl C	
Parametry na vstupu					
c_{inEVA_S}	Rychlost soli	[m/s]	2		
t_{inEVA_S}	Teplota soli	[°C]	428,055		
ρ_{inEVA_S}	Hustota soli	[kg/m ³]	1 818	1 818	1 770
$c_{p_{inEVA_S}}$	Měrná tep. kapacita	[kJ/kg.K]	1,516	1,521	1,772
ϑ_{inEVA_S}	Kinematická viskozita	[m ² /s]	7,993E-07	9,032E-07	8,590E-07
λ_{inEVA_S}	Tepelná vodivost	[W/m.K]	0,5239	0,5313	0,53
Pr_{inEVA_S}	Prandtlovo číslo	[-]	4,206	4,701	5,082
Parametry na výstupu					
t_{outEVA_S}	Teplota soli	[°C]	385,55		
ρ_{outEVA_S}	Hustota soli	[kg/m ³]	1 847	1 844	1 801
$c_{p_{outEVA_S}}$	Měrná tep. kapacita	[kJ/kg.K]	1,509	1,514	1,814
ϑ_{outEVA_S}	Kinematická viskozita	[m ² /s]	9,7744E-07	1,0461E-06	1,3741E-06
λ_{outEVA_S}	Tepelná vodivost	[W/m.K]	0,516	0,523	0,53
Pr_{outEVA_S}	Prandtlovo číslo	[-]	5,280	5,584	8,468
Vypočítané parametry					
c_{maxEVA_S}	Max. rychlost mezitr.	[m/s]	3,5		
Re_{D,EVA_S}	Reynolds mezitr.	[-]	185 668,3	164 306,5	285 226,4
C_{1EVA_S}	Koeficient C ₁	[-]	0,27	0,27	0,021
m_{EVA_S}	Koeficient m	[-]	0,63	0,63	0,84
C_{2EVA_S}	Koeficient C ₂	[-]	0,987		
N_{LEVA}	Počet řad	[-]	15		
\overline{Nu}_{EVA_S}	Nusseltovo č. mezitr.	[-]	678,1	706,0	696,1
α_{EVA_S}	Souč. přestupu soli	[W/m ² .K]	5 074,6	5 358,6	5 270,3
$c_{p_{stíEVA_S}}$	Střední měrná tep. kap.	[kJ/kg.K]	1,512	1,517	1,793
\dot{Q}_{EVA}	Výkon výměníku	[kW]	3 796,5	3 796,5	3 780,3
Parovodní strana					
I_{inEVA_w}	Vstupní entalpie směsi	[kJ/kg]	2 024,5	2 024,6	2 066,1
$r_{EVA_{sm}}$	Výparné teplo směsi	[kJ/kg]	368,5	368,5	366,9
I_{outEVA_p}	Výstupní entalpie směsi	[kJ/kg]	2 393,1	2 393,2	2 433,1
v_{inEVA_w}	Vstupní měrný objem	[m ³ /kg]	0,01327	0,01327	0,01395
v_{outEVA_p}	Výstupní měrný objem	[m ³ /kg]	0,01927	0,01927	0,01992
c_{outEVA_p}	Výstupní rychlost	[m/s]	14	14	14,5

Tab. 30 Parametry II - 3.část výparníku

Médium			sůl A	sůl B	sůl C
$\alpha_{EVA_{sm}}$	Interpol. souč. přest. směsi	[W/m ² .K]	31 784,22	31 806,16	31 800,76
k_{EVA}	Souč. prostupu tepla	[W/m ² .K]	1 688	1 719	1 710
q_{EVA}	Hustota tepelného toku	[kW/m ²]	196,3	199,84	198,77
$r_{EVA_{sm}}$	Výparné teplo	[kJ/kg]	368,5	368,5	366,9
L_{EVA}	Délka trubky	[m]	20,52	20,16	20,18
$t_{SAT_{EVA}}$	Saturační teplota	[°C]	290,54		
Součinitel přestupu tepla bublinkového varu					
$\Delta T_{SAT_{EVA}}$	Přehřátí	[K]	6,18	6,28	6,25
t_{Tr}	Teplota stěny trubky	[°C]	296,72	296,82	296,79
p_{Tr}	Tlak při stěně trubky	[bar]	82	82,1	82,1
$\Delta p_{SAT_{EVA}}$	Rozdíl tlaků	[bar]	7	7,1	7,1
$\mu_{in_{EVA_w}}$	Dynamická viskozita vody	[Pa.s]	8,95E-05		
$\mu_{out_{EVA_p}}$	Dynamická viskozita páry	[Pa.s]	1,92E-05		
σ_{EVA_p}	Povrchové napětí páry	[N/m]	0,01654		
$\lambda_{in_{EVA_w}}$	Tepelná vodivost	[W/m.K]	0,5611		
$c_{p_{in_{EVA_w}}}$	Měrná tep. kapacita vody	[kJ/kg.K]	5,5043		
$\rho_{in_{EVA_w}}$	Hustota vody	[kg/m ³]	730,88		
$\alpha_{FZ_{EVA}}$	Přestup bublinkového varu	[W/m ² .K]	78 115,67	79 487,77	79 149,95
Součinitel přestupu tepla nucené konvekce					
x_{EVA}	Kvalita páry	[-]	0,75		
Re_{EVA_w}	Reynolds směsi	[-]	123 606,5		
Pr_{EVA_w}	Prandtl směsi	[-]	0,878		
$\alpha_{DB_{EVA}}$	Přestup nucené konvekce	[W/m ² .K]	2 419,2		
Celkový přestup tepla směsi					
X	Martinelliho parametr	[-]	0,1023		
$F(X)$	Váhový fak. nucené kon.	[-]	12,62		
$Re_{EVA_{TP}}$	Reynolds dvoufázového toku	[-]	2 940 762,4		
$S(Re_{EVA_{TP}})$	Váhový fak. bublin. varu	[-]	0,01599		
$\alpha_{EVA_{sm}}$	Celkový. přestupu směsi	[W/m ² .K]	31 784,22	31 806,16	31 800,76
Délka teplosměnných trubek výměníku					
$\Delta t_{ln_{EVA}}$	Střední logaritmický spád	[K]	58,82		
S_{EVA}	Teplosměnná plocha	[m ²]	38,23	37,55	37,75
L_{EVA}	Délka teplosměnných trubek	[m]	34,77	34,15	34,33
Ztráty v trubkách					
$\lambda_{EVA_{sm}}$	Součinitel tření	[-]	0,0205		
$\Delta p_{tř_{EVA_{sm}}}$	Třecí ztráty	[bar]	2,561	2,516	2,530
$\Delta p_{zv_{EVA_{sm}}}$	Ztráty zrychlením směsi	[bar]	0,0159		
$\Delta p_{EVA_{sm}}$	Místní ztráty	[bar]	0,03	0,03	0,031
$\Delta p_{EVA_{sm}}$	Celkové ztráty	[bar]	2,607	2,562	2,577

Tab. 31 Parametry I - 4.část výparníku

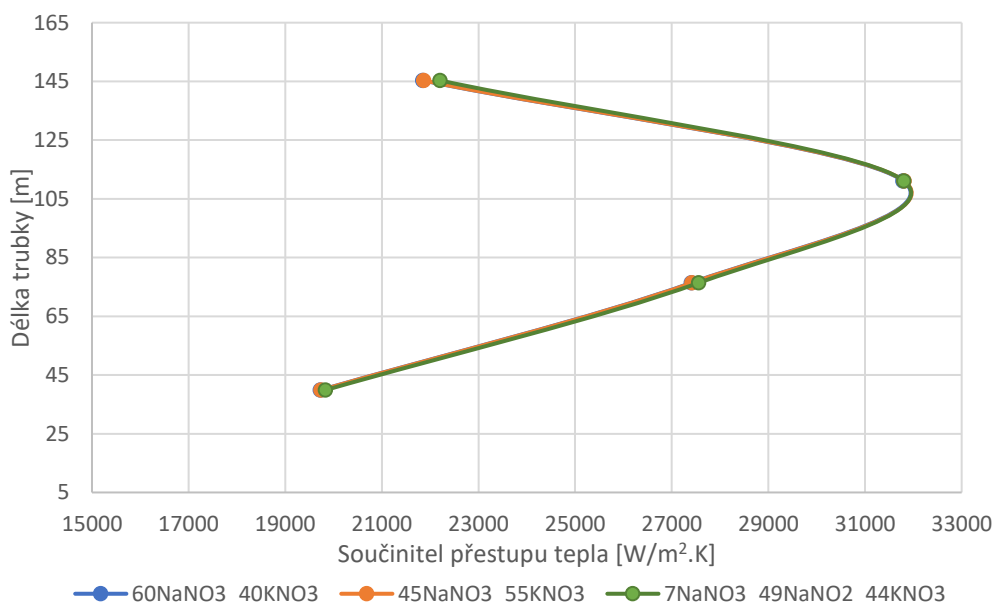
4. část					
Médium			sůl A	sůl B	sůl C
Parametry na vstupu					
c_{inEVA_S}	Rychlost soli	[m/s]	2		
t_{inEVA_S}	Teplota soli	[°C]	470,56		
ρ_{inEVA_S}	Hustota soli	[kg/m ³]	1 796	1 791	1 739
$c_{p_{inEVA_S}}$	Měrná tep. kapacita	[kJ/kg.K]	1,523	1,528	1,755
ϑ_{inEVA_S}	Kinematická viskozita	[m ² /s]	6,940E-07	8,358E-07	7,161E-07
λ_{inEVA_S}	Tepelná vodivost	[W/m.K]	0,5317	0,5374	0,53
Pr_{inEVA_S}	Prandtlovo číslo	[-]	3,571	4,256	4,122
Parametry na výstupu					
t_{outEVA_S}	Teplota soli	[°C]	428,055		
ρ_{outEVA_S}	Hustota soli	[kg/m ³]	1 818	1 818	1 770
$c_{p_{outEVA_S}}$	Měrná tep. kapacita	[kJ/kg.K]	1,516	1,521	1,772
ϑ_{outEVA_S}	Kinematická viskozita	[m ² /s]	7,993E-07	9,032E-07	8,59E-07
λ_{outEVA_S}	Tepelná vodivost	[W/m.K]	0,5239	0,5313	0,53
Pr_{outEVA_S}	Prandtlovo číslo	[-]	4,206	4,701	5,082
Vypočítané parametry					
c_{maxEVA_S}	Max. rychlost mezitr.	[m/s]	3,5		
Re_{D,EVA_S}	Reynolds mezitr.	[-]	213 835,5	177 544,7	342 147,4
C_{1EVA_S}	Koeficient C ₁	[-]	0,021	0,27	0,021
m_{EVA_S}	Koeficient m	[-]	0,84	0,63	0,84
C_{2EVA_S}	Koeficient C ₂	[-]	0,987		
N_{LEVA}	Počet řad	[-]	15		
\overline{Nu}_{EVA_S}	Nusseltovo č. mezitr.	[-]	782,2	792,2	1146,7
α_{EVA_S}	Souč. přestupu soli	[W/m ² .K]	5 941,9	6 081,9	8 682,2
$c_{p_{stíEVA_S}}$	Střední měrná tep. kap.	[kJ/kg.K]	1,519	1,524	1,762
\dot{Q}_{EVA}	Výkon výměníku	[kW]	3 814,5	3 814,0	3 714,3
Parovodní strana					
I_{inEVA_w}	Vstupní entalpie směsi	[kJ/kg]	2 393,1	2 393,2	2 433,1
$r_{EVA_{sm}}$	Výparné teplo směsi	[kJ/kg]	370,3	370,2	360,5
I_{outEVA_p}	Výstupní entalpie směsi	[kJ/kg]	2 763,3	2 763,4	2 793,6
v_{inEVA_w}	Vstupní měrný objem	[m ³ /kg]	0,01927	0,01927	0,01992
v_{outEVA_p}	Výstupní měrný objem	[m ³ /kg]	0,02529	0,02529	0,02614
c_{outEVA_p}	Výstupní rychlost	[m/s]	18,4	18,4	19

Ve čtvrté části by měla výstupní entalpie přibližně odpovídat entalpii vstupní v PRE, ale v důsledku nejistoty v korelaci pro měrnou tepelnou kapacitu se entalpie liší. U obou solí A i B je rozdíl entalpie vstupní v PRE a vypočítanou ve čtvrté části EVA cca 2 kJ/kg, v případě soli C se entalpie liší o cca 28 kJ/kg.

Tab. 32 Parametry II - 4.část výparníku

Médium			sůl A	sůl B	sůl C
$\alpha_{EVA_{sm}}$	Interpol. souč. přest. směsi	[W/m ² .K]	21 845,7	21 861,94	21 199,45
k_{EVA}	Souč. prostupu tepla	[W/m ² .K]	1 724	1 735	1 891
q_{EVA}	Hustota tepelného toku	[kW/m ²]	273,65	275,5	300,3
$r_{EVA_{sm}}$	Výparné teplo	[kJ/kg]	370,3	370,2	360,5
L_{EVA}	Délka trubky	[m]	14,79	14,69	13,48
$t_{SAT_{EVA}}$	Saturační teplota	[°C]	290,54		
Součinitel přestupu tepla bublinkového varu					
$\Delta T_{SAT_{EVA}}$	Přehřátí	[K]	12,53	12,6	14,17
t_{Tr}	Teplota stěny trubky	[°C]	303,07	303,14	304,71
p_{Tr}	Tlak při stěně trubky	[bar]	89,6	89,7	91,7
$\Delta p_{SAT_{EVA}}$	Rozdíl tlaků	[bar]	14,6	14,7	16,7
$\mu_{in_{EVA_w}}$	Dynamická viskozita vody	[Pa.s]	8,95E-05		
$\mu_{out_{EVA_p}}$	Dynamická viskozita páry	[Pa.s]	1,92E-05		
σ_{EVA_p}	Povrchové napětí páry	[N/m]	0,01654		
$\lambda_{in_{EVA_w}}$	Tepelná vodivost	[W/m.K]	0,5611		
$c_{p_{in_{EVA_w}}}$	Měrná tep. kapacita vody	[kJ/kg.K]	5,5043		
$\rho_{in_{EVA_w}}$	Hustota vody	[kg/m ³]	730,88		
$\alpha_{FZ_{EVA}}$	Přestup bublinkového varu	[W/m ² .K]	161 316,29	162 332,22	183 441,62
Součinitel přestupu tepla nucené konvekce					
x_{EVA}	Kvalita páry	[-]	0,998		
Re_{EVA_w}	Reynolds směsi	[-]	823,4		
Pr_{EVA_w}	Prandtl směsi	[-]	0,878		
$\alpha_{DB_{EVA}}$	Přestup nucené konvekce	[W/m ² .K]	43,90		
Celkový přestup tepla směsi					
X	Martinelliho parametr	[-]	0,0009		
$F(X)$	Váhový fak. nucené kon.	[-]	438,83		
$Re_{EVA_{TP}}$	Reynolds dvoufázového toku	[-]	1 653 713,8		
$S(Re_{EVA_{TP}})$	Váhový fak. bublin. varu	[-]	0,01599		
$\alpha_{EVA_{sm}}$	Celkový. přestupu směsi	[W/m ² .K]	21 845,7	21 861,94	22 199,45
Délka teplosměnných trubek výměníku					
$\Delta t_{ln_{EVA}}$	Střední logaritmický spád	[K]	58,82		
S_{EVA}	Teplosměnná plocha	[m ²]	782,2	792,21	1146,7
L_{EVA}	Délka teplosměnných trubek	[m]	5 941,93	6 081,92	8 682,18
Ztráty v trubkách					
$\lambda_{EVA_{sm}}$	Součinitel tření	[-]	0,0621		
$\Delta p_{tř_{EVA_{sm}}}$	Třecí ztráty	[bar]	10,47	10,4	9,5
$\Delta p_{zv_{EVA_{sm}}}$	Ztráty zrychlením směsi	[bar]	0,02		
$\Delta p_{EVA_{sm}}$	Místní ztráty	[bar]	0,041	0,041	0,043
$\Delta p_{EVA_{sm}}$	Celkové ztráty	[bar]	10,53	10,459	9,557

Na Obr. 34 je znázorněn průběh přestupu tepla po délce trubky výměníku rozdělené do čtyř částí. Rozdíl mezi jednotlivými solemi není prakticky patrný. Největší hodnota součinitele přestupu tepla je v třetí části, kde je již v trubkách cca $\frac{3}{4}$ páry.



Obr. 34 Průběh součinitele přestupu tepla po délce trubky

V Tab. 33 jsou sečteny výkony, celková délka trubek a tlakové ztráty trubkového svazku všech 4. rozdělených částí. Celkovou tlakovou ztrátu nejvíce ovlivňuje poslední 4. část výměníku.

Celková délka čtyř částí vychází oproti jedné části o cca 35, 20 a 38 m kratší u soli A, B a C. Celkový tepelný výkon čtyř částí vychází u soli A, B o cca 25 kW menší než u jedné části. V případě soli C vychází výkon čtyř částí o cca 287 kW větší než jedné části. Myslím si, že výkon této soli C je takto velký z důvodu nepřesné korelace měrné tepelné kapacity. Celkové ztráty vychází u čtyř částí o cca 5 až 5,5 barů větší než u jedné části.

Tab. 33 Celkový výkon a ztráty všech čtyř částí

Médium			sůl A	sůl B	sůl C
L_{EVA}	Celková délka trubky	[m]	145,34	142,95	127,97
\dot{Q}_{EVA}	Celkový výkon výměníku	[kW]	15 150,3	15 150,9	15 462,4
$\Delta p_{EVA_{sm}}$	Celkové ztráty	[bar]	15,55	15,39	14,15

9.4. Návrh SUPERHEATRU

Trubky volíme bezešvé Tr 70 x 5 z materiálu 316. [18]

9.4.1. Návrh parní strany

Provozní tlak páry:

$$p_v = 75 \text{ [bar]}$$

(9.196)

Vstupní teplota páry:

$$t_{in_{SUPP}} = 290,54 [^{\circ}C] \quad (9.197)$$

Vstupní entalpie páry:

$$t_{in_{SUPP}} = 290,54 [^{\circ}C] \rightarrow I_{in_{SUPP}} = 2\,765,8 [kJ/kg] \quad (9.198)$$

Výstupní teplota přehřáté páry:

$$t_{out_{SUPP}} = 520 [^{\circ}C] \quad (9.199)$$

Střední teplota páry:

$$t_{stř_{SUPP}} = \frac{t_{out_{SUPP}} + t_{in_{SUPP}}}{2} = \frac{520 + 290,54}{2} = 405,27 [^{\circ}C] \quad (9.200)$$

Měrný objem páry při střední teplotě:

$$p_v = 75 [bar], t_{stř_{SUPP}} = 405,27 [^{\circ}C] \rightarrow v_{SUPP} = 0,03741 [m^3/kg] \quad (9.201)$$

Zvolená rychlost páry:

$$c_{SUPP} = 15 [m/s] \quad (9.202)$$

Vnitřní průměr trubky páry výměníku:

$$d_{i_{SUPP}} = 60 [mm] \quad (9.203)$$

Počet trubek výměníku v jednom tahu:

$$\dot{m}_P = \frac{\dot{V}_P}{v_{SUPP}} = \frac{S_{i_{SUPP}} \cdot n_{t_{SUPP}} \cdot c_{SUPP}}{v_{SUPP}} \rightarrow n_{t_{SUPP}} = \frac{\dot{m}_P \cdot v_{SUPP}}{S_{i_{SUPP}} \cdot c_{SUPP}} [ks] \quad (9.204)$$

$$n_{t_{SUPP}} = \frac{4 \cdot \dot{m}_P \cdot v_{SUPP}}{\pi \cdot d_{i_{SUPP}}^2 \cdot c_{SUPP}} = \frac{4 \cdot 10,302 \cdot 0,03741}{\pi \cdot (60 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 15} = 9,09 \doteq 10 [ks]$$

Skutečná rychlost páry pro reálný počet trubek na výstupu:

$$c_{SUPP} = \frac{\dot{m}_P \cdot v_{SUPP}}{S_{i_{SUPP}} \cdot n_{t_{SUPP}}} = \frac{4 \cdot \dot{m}_P \cdot v_{SUPP}}{\pi \cdot d_{i_{SUPP}}^2 \cdot n_{t_{SUPP}}} = \frac{4 \cdot 10,302 \cdot 0,03741}{\pi \cdot (60 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 10} = 13,6 [m/s] \quad (9.205)$$

Dynamická viskozita páry při střední teplotě:

$$p_v = 75 [bar], t_{stř_{SUPP}} = 405,27 [^{\circ}C] \rightarrow \mu_{SUPP} = 2,4635 \cdot 10^{-5} [Pa \cdot s] \quad (9.206)$$

Kinematická viskozita páry při střední teplotě:

$$\vartheta_{SUP_P} = \mu_{SUP_P} \cdot \nu_{SUP_P} = 2,4635 \cdot 10^{-5} \cdot 0,03741 = 9,2165 \cdot 10^{-7} [m^2/s] \quad (9.207)$$

Tepelná vodivost páry při střední teplotě:

$$p_v = 75 [bar], t_{stř_{SUP_P}} = 405,27 [^{\circ}C] \rightarrow \lambda_{SUP_P} = 0,06336 [W/m \cdot K] \quad (9.208)$$

Měrná tepelná kapacita páry při střední teplotě:

$$p_v = 75 [bar], t_{stř_{SUP_P}} = 405,27 [^{\circ}C] \rightarrow c_{p_{SUP_P}} = 2,7107 [kJ/kg \cdot K] \quad (9.209)$$

Reynoldsovo číslo pro páru:

Dosadíme do rov.(9.23).

$$Re_{SUP_P} = \frac{c_{S_{SUP_P}} \cdot d_{i_{SUP_P}}}{\vartheta_{SUP_P}} = \frac{13,6 \cdot 60 \cdot 10^{-3}}{9,2165 \cdot 10^{-7}} = 887\,417,4 [-] \quad (9.210)$$

V tomto případě je proudění turbulentní $Re > 2300$.

Prandtlovo číslo pro páru:

$$p_v = 75 [bar], t_{stř_{SUP_P}} = 405,27 [^{\circ}C] \rightarrow Pr_{SUP_P} = 1,054 [-] \quad (9.211)$$

Nusseltovo číslo pro páru:

Podmínka platnosti Re a Pr je v daném rozsahu splněna, použijí rov. (9.26).

$$Nu_{SUP_P} = 0,023 \cdot Re_{SUP_P}^{0,8} \cdot Pr_{SUP_P}^{\frac{1}{3}} = 0,023 \cdot 887\,417,4^{0,8} \cdot 1,054^{\frac{1}{3}} = 1\,342,3 [-] \quad (9.212)$$

Součinitel přestupu tepla pro páru:

Dosadíme do rov. (9.28).

$$Nu_{SUP_P} = \frac{\alpha_{SUP_P} \cdot d_{i_{SUP_P}}}{\lambda_{SUP_P}} \rightarrow \alpha_{SUP_P} = \frac{Nu_{SUP_P} \cdot \lambda_{SUP_P}}{d_{i_{SUP_P}}} = \frac{1\,342,3 \cdot 0,06336}{60 \cdot 10^{-3}} \quad (9.213)$$
$$= 1\,417,4 [W/m^2 \cdot K]$$

9.4.2. Návrh solné strany

Provozní tlak roztavené soli:

$$p_v = 10 [bar] \quad (9.214)$$

Vstupní teplota roztavené soli:

$$t_{in_{SUP_S}} = 550 [^{\circ}C] \quad (9.215)$$

Hustota roztavené soli na vstupu:

$$t_{in_{SUP_S}} = 550 [^{\circ}C] \rightarrow \rho_{in_{SUP_S}} = 1796 [kg/m^3] \quad (9.216)$$

Měrná tepelná kapacita roztavené soli na vstupu:

$$t_{in_{SUP_S}} = 550 [^{\circ}C] \rightarrow c_{p_{in_{SUP_S}}} = 1,538 [kJ/kg \cdot K] \quad (9.217)$$

Kinematická viskozita roztavené soli na vstupu:

$$t_{in_{SUP_S}} = 550 [^{\circ}C] \rightarrow \vartheta_{in_{SUP_S}} = 5,9029 \cdot 10^{-7} [m^2/s] \quad (9.218)$$

Tepelná vodivost roztavené soli na vstupu:

$$t_{in_{SUP_S}} = 550 [^{\circ}C] \rightarrow \lambda_{in_{SUP_S}} = 0,5475 [W/m \cdot K] \quad (9.219)$$

Prandtl roztavené soli na vstupu:

$$Pr_{in_{SUP_S}} = \frac{\vartheta_{in_{SUP_S}} \cdot c_{p_{in_{SUP_S}}} \cdot \rho_{in_{SUP_S}}}{\lambda_{in_{SUP_S}}} = \frac{5,9029 \cdot 10^{-7} \cdot 1,538 \cdot 10^3 \cdot 1796}{0,5475} \quad (9.220)$$
$$= 2,978 [-]$$

Výstupní teplota roztavené soli:

$$t_{out_{SUP_S}} = 470,56 [^{\circ}C] \quad (9.221)$$

Hustota roztavené soli na výstupu:

$$t_{out_{SUP_S}} = 470,56 [^{\circ}C] \rightarrow \rho_{out_{SUP_S}} = 1796 [kg/m^3] \quad (9.222)$$

Měrná tepelná kapacita roztavené soli na výstupu:

$$t_{out_{SUP_S}} = 470,56 [^{\circ}C] \rightarrow c_{p_{out_{SUP_S}}} = 1,523 [kJ/kg \cdot K] \quad (9.223)$$

Kinematická viskozita roztavené soli na výstupu:

$$t_{out_{SUP_S}} = 470,56 [^{\circ}C] \rightarrow \vartheta_{out_{SUP_S}} = 6,9399 \cdot 10^{-7} [m^2/s] \quad (9.224)$$

Tepelná vodivost roztavené soli na výstupu:

$$t_{out_{SUP_S}} = 470,56 [^{\circ}C] \rightarrow \lambda_{out_{SUP_S}} = 0,5317 [W/m \cdot K] \quad (9.225)$$

Prandtl roztavené soli na výstupu:

$$Pr_{out_{SUP_S}} = \frac{\vartheta_{out_{SUP_S}} \cdot c_{p_{out_{SUP_S}}} \cdot \rho_{out_{SUP_S}}}{\lambda_{out_{SUP_S}}} = \frac{6,9399 \cdot 10^{-7} \cdot 1,523 \cdot 10^3 \cdot 1796}{0,5317} \quad (9.226)$$

$$= 3,571[-]$$

Vnější průměr trubky napájecí vody:

$$d_{e_{SUP_w}} = 70 [mm] \quad (9.227)$$

Koeficient rozteče trubek v trubkovnici:

Trubky budou do trubkovnice zaválcovány a následně zavařeny, kvůli snížení rizika netěsnosti lisovaného spoje. Z tohoto důvodu volím koeficient pro lisování.

$$t_{lis} = \langle 1,25 \div 1,5 \rangle \cdot d_e$$

$$volím \rightarrow t_{lis} = 1,4 \cdot d_e \quad (9.228)$$

$$t_{lis_{SUP}} = 1,4 \cdot d_{e_{SUP_P}} = 1,4 \cdot 70 = 98 [mm]$$

Volím 11 tahů a 11 řad trubek, kvůli zmenšení délky výměníku.

$$n_{t_{SUP}} = n_{t_{SUP_w}} \cdot tahy = n_{t_{SUP_w}} \cdot 11 = 10 \cdot 11 = 110 [-] \quad (9.229)$$

$$n_{t_{SUP}} \cdot t_{lis}^2 \leq S_{B_{SUP}}$$

$$n_{t_{SUP}} \cdot t_{lis_{SUP}}^2 \leq \frac{\pi \cdot D_{B_{SUP}}^2}{4} \rightarrow D_{B_{SUP}} = \sqrt[2]{\frac{4 \cdot n_{t_{SUP}} \cdot t_{lis_{SUP}}^2}{\pi}} = 2 \cdot \sqrt[2]{\frac{110 \cdot 98^2}{\pi}} \quad (9.230)$$

$$= 1159,8 [mm]$$

$$volím \rightarrow D_{B_{SUP}} = 1258 [mm]$$

Rychlost roztavené soli na vstupu:

$$c_{in_{SUP_S}} = 2 [m/s] \quad (9.231)$$

Max. rychlost roztavené soli v mezitrubkovém systému:

Dosadíme do rov.(9.49).

$$c_{max_{SUP_S}} = \frac{t_{lis_{SUP}}}{2 \cdot (t_{lis_{SUP}} - d_{e_{SUP_P}})} \cdot c_{in_{SUP_S}} = \frac{98 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot (98 - 70) \cdot 10^{-3}} \cdot 2 = 3,5 [m/s] \quad (9.232)$$

Reynoldsovo číslo pro mezitrubkový prostor:

Dosadíme do rov.(9.51).

$$Re_{D,SUP_S} = \frac{c_{max,SUP_S} \cdot d_{e,SUP_P}}{\vartheta_{in,SUP_S}} = \frac{3,5 \cdot 70 \cdot 10^{-3}}{5,9029 \cdot 10^{-7}} = 415\,049,4 \text{ [-]} \quad (9.233)$$

Nusseltovo číslo pro mezitrubkový prostor:

Dosadíme do rov.(9.53) a velikost $Re_{D,max} = Re_{D,SUP_S}$ leží v rozmezí $2 \cdot 10^5 \div 2 \cdot 10^6$. Pro náš případ jsou dle Tab. 17 koeficienty $C_1 = 0,021$ a $m = 0,84$.

$$\overline{Nu}_{SUP_S} = C_{1,SUP_S} \cdot Re_{D,SUP_S}^{m_{SUP_S}} \cdot Pr_{in,SUP_S}^{0,36} \cdot \left(\frac{Pr_{in,SUP_S}}{Pr_{out,SUP_S}} \right)^{1/4} \quad (9.234)$$

Z Tab. 18 jsme určily pro 11 tahů a 11 řad přibližný koeficient $C_2 = 0,97 = C_{2,SUP_S}$.

$$\overline{Nu}_{SUP_S} = C_{2,SUP_S} \cdot C_{1,SUP_S} \cdot Re_{D,SUP_S}^{m_{SUP_S}} \cdot Pr_{in,SUP_S}^{0,36} \cdot \left(\frac{Pr_{in,SUP_S}}{Pr_{out,SUP_S}} \right)^{1/4} \quad (9.235)$$

$$\overline{Nu}_{PRE_S} = 0,97 \cdot 0,021 \cdot 415\,049,4^{0,84} \cdot 2,978^{0,36} \cdot \left(\frac{2,978}{3,571} \right)^{1/4} = 1\,235,6 \text{ [-]}$$

Součinitel přestupu tepla pro roztavenou sůl:

Dosadíme do rov.(9.28).

$$\overline{Nu}_{SUP_S} = \frac{\alpha_{SUP_S} \cdot d_{e,SUP_P}}{\lambda_{in,SUP_S}} \rightarrow \alpha_{SUP_S} = \frac{\overline{Nu}_{SUP_S} \cdot \lambda_{in,SUP_S}}{d_{e,SUP_P}} = \frac{1\,235,6 \cdot 0,5475}{70 \cdot 10^{-3}} = 9\,664,2 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{K]} \quad (9.236)$$

Součinitel prostupu tepla trubkami [22]:

Dosadíme do rov. (9.58).

$$k_{SUP} = \frac{1}{\frac{1}{d_{e,SUP_W}} + \frac{\epsilon_{i,SUP_P}}{d_{i,SUP_P} \cdot \alpha_{SUP_P}} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{Tr}} \cdot \ln \frac{d_{e,SUP_P}}{d_{i,SUP_P}} + \frac{\epsilon_{e,PRE_S}}{d_{e,SUP_P}} + \frac{1}{d_{e,SUP_P} \cdot \alpha_{SUP_S}}} = \frac{1}{\frac{1}{70 \cdot 10^{-3}} + \frac{9 \cdot 10^{-5}}{60 \cdot 10^{-3} \cdot 1\,417,4} + \frac{1}{2 \cdot 33} \cdot \ln \frac{70 \cdot 10^{-3}}{60 \cdot 10^{-3}} + \frac{9 \cdot 10^{-5}}{70 \cdot 10^{-3}} + \frac{1}{70 \cdot 10^{-3} \cdot 9\,664,2}} = 778,2 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{K]} \quad (9.237)$$

Výkon výměníku:

$$\dot{Q}_{SUP} = \dot{m}_S \cdot (I_{out,SUP_P} - I_{in,SUP_P}) = 10,302 \cdot (3\,454,1 - 2\,765,8) = 7\,090,8 \text{ [kW]} \quad (9.238)$$

Střední logaritmický spád výměníku:

Dosadíme do rov.(9.61).

$$\Delta t_{ln_{SUP_{pro}}} = \frac{(t_{in_{SUP_S}} - t_{out_{SUP_P}}) - (t_{out_{SUP_S}} - t_{in_{SUP_P}})}{\ln \frac{(t_{in_{SUP_S}} - t_{out_{SUP_P}})}{(t_{out_{SUP_S}} - t_{in_{SUP_P}})}} [K] \quad (9.239)$$

$$\Delta t_{ln_{SUP}} = \Delta t_{ln_{SUP_{pro}}} \frac{(550 - 520) - (470,56 - 290,54)}{\ln \frac{(550 - 520)}{(470,56 - 290,54)}} = 83,722 [K]$$

Obdobně jako u PRE a SUP počítáme s protiproudým zapojení.

Výměnná plocha výměníku:

$$\dot{Q}_{SUP} = k_{SUP} \cdot S_{SUP} \cdot \Delta t_{ln_{SUP}} [kW] \quad (9.240)$$

$$S_{SUP} = \frac{\dot{Q}_{SUP}}{k_{SUP} \cdot \Delta t_{ln_{SUP}}} = \frac{7\,090,8 \cdot 10^3}{778,2 \cdot 83,72} = 108,8 [m^2]$$

Délka trubek napájecí vody:

Dosadíme do rov.(9.68).

$$S_{SUP} = \pi \cdot d_{e_{SUP_P}} \cdot L_{SUP_P} \cdot n_{t_{SUP}} \rightarrow L_{SUP_P} = \frac{S_{SUP}}{\pi \cdot d_{e_{SUP_P}} \cdot n_{t_{SUP}}} = \frac{108,8}{\pi \cdot 70 \cdot 10^{-3} \cdot 110} \quad (9.241)$$

$$= 4,5 [m]$$

V Tab. 34 jsou porovnány parametry mezitrubkového prostoru pro jednotlivé soli. Pro dané parametry se teplonosná délka liší max. o 5 cm.

Tab. 34 Porovnání parametrů mezitrubkového prostoru pro jednotlivé soli

Médium		sůl A	sůl B	sůl C	
Parametry na vstupu					
c_{inSUP_S}	Rychlost soli	[m/s]	2		
t_{inSUP_S}	Teplota soli	[°C]	550		
ρ_{inSUP_S}	Hustota soli	[kg/m ³]	1 796	1 738	1 676
$c_{p_{inSUP_S}}$	Měrná tep. kapacita	[kJ/kg.K]	1,538	1,542	1,795
ϑ_{inSUP_S}	Kinematická viskozita	[m ² /s]	5,9029E-07	8,6133E-07	7,1607E-07
λ_{inSUP_S}	Tepelná vodivost	[W/m.K]	0,5475	0,5374	0,53
Pr_{inSUP_S}	Prandtlovo číslo	[-]	2,978	4,295	4,067
Parametry na výstupu					
t_{outSUP_S}	Teplota soli	[°C]	470,56		
ρ_{outSUP_S}	Hustota soli	[kg/m ³]	1 796	1 791	1 739
$c_{p_{outSUP_S}}$	Měrná tep. kapacita	[kJ/kg.K]	1,523	1,528	1,755
ϑ_{outSUP_S}	Kinematická viskozita	[m ² /s]	6,9399E-07	8,3585E-07	7,1607E-07
λ_{outSUP_S}	Tepelná vodivost	[W/m.K]	0,5317	0,5374	0,53
Pr_{outSUP_S}	Prandtlovo číslo	[-]	3,571	4,256	4,122
Vypočítané parametry					
c_{maxSUP_S}	Max. rychlost mezitr.	[m/s]	3,5		
Re_{D,SUP_S}	Reynolds mezitr.	[-]	415 049,4	284 442,2	342 147,4
C_{1SUP_S}	Koeficient C ₁	[-]	0,021	0,021	0,021
m_{SUP_S}	Koeficient m	[-]	0,84	0,84	0,84
C_{2SUP_S}	Koeficient C ₂	[-]	0,978	0,978	0,978
N_{LSUP}	Počet řad	[-]	11		
\overline{Nu}_{SUP_S}	Nusseltovo č. mezitr.	[-]	1 235,6	1 340,7	1 487,1
α_{SUP_S}	Souč. přestupu soli	[W/m ² .K]	9 664,2	10 293	11 259,6
λ_{Tr}	Souč. prostupu trubkou	[W/m.K]	33		
ϵ_{iSUP_P}	Fouling koefi. vody	[m ² .K/W]	0,00009		
ϵ_{eSUP_S}	Fouling koefi. soli	[m ² .K/W]	0,00009		
k_{SUP}	Souč. prostupu tepla	[W/m ² .K]	778,2	782	787,1
\dot{Q}_{SUP}	Výkon výměníku	[kW]	7090,8		
Δt_{lnSUP}	Střed. log. tep. spád	[K]	83,72		
S_{SUP}	Teplosměnná plocha	[m ²]	108,8	108,3	107,6
L_{SUP_P}	Teplonosná délka	[m]	4,5	4,48	4,45

9.4.3. Počet a velikost segmentů výměníku:

Segmenty zabezpečují příčné proudění. Vzdálenost mezi jednotlivými segmenty L a U výška od konce segmentu k plášti. Doporučené velikosti $\frac{L}{D} = 0,3 \div 0,6$ a $\frac{U}{D} = 0,2 \div 0,35$ [16], ke správnému rozvržení přepážek umožňující správné obtékání trubkového svazku.

Rozteč segmentových přepážek:

$$volím \rightarrow \frac{L_{SEG,SUP}}{D_{B,SUP}} = 0,5 \rightarrow L_{SEG,SUP} = 0,5 \cdot 1\,258 = 629 [mm] \quad (9.242)$$

Mezera segmentové přepážky:

$$volím \rightarrow \frac{U_{SEG,SUP}}{D_{B,SUP}} = 0,28 \rightarrow U_{SEG,SUP} = 0,28 \cdot 1\,258 = 352,2 \text{ [mm]} \quad (9.243)$$

Počet segmentových přepážek ve výměníku:

$$počet\ přepážek = \frac{L_{SUPP}}{L_{SEG,SUP}} = \frac{4,5}{629 \cdot 10^{-3}} = 7,2 \text{ [ks]} \quad (9.244)$$

Skutečný počet segmentových přepážek a skutečná rozteč segmentů:

$$\begin{aligned} volím \rightarrow skut.\ počet\ přepážek = 8 \rightarrow L_{SSEG,SUP} &= \frac{L_{SUPP}}{skut.\ počet\ přepážek} = \frac{4,5}{8} \\ &= 0,562 \text{ [m]} \end{aligned} \quad (9.245)$$

9.4.4. Tlakové ztráty

Tlaková ztráta trubkového prostoru:

Součinitel tření získáme z Moodyho diagramu pro Re a $\frac{e}{d}$, kde k značí drsnost obtékané plochy. Pro nerezový materiál je $e = e_{SUPP} = 46 \text{ [}\mu\text{m]}$.

$$\frac{e_{SUPP}}{d_{i,SUPP}} = \frac{46 \cdot 10^{-3}}{60} = 0,00077 \quad (9.246)$$

Pro přesnější určení součinitele tření použijeme místo diagramu Moodyho rovnici. Platnost rovnice je pro $4 \cdot 10^3 < Re < 10^7$ a $\frac{e}{d} < 10^{-1}$. Dosadíme do rov. (9.78).

$$\lambda_{SUPP} = 0,0053 \cdot \left[1 + \left(20000 \cdot \frac{e_{SUPP}}{d_{i,SUPP}} + \frac{10^6}{Re_{SUPP}} \right)^{1/3} \right] \quad (9.247)$$

$$\lambda_{SUPP} = 0,0053 \cdot \left[1 + \left(20000 \cdot \frac{46 \cdot 10^{-3}}{60} + \frac{10^6}{887\,417,4} \right)^{1/3} \right] = 0,0188$$

Dosadíme do rov.(9.74).

$$\Delta p_{SUPP} = \lambda_{SUPP} \cdot \frac{L_{SUPP} \cdot n_{SUP}}{d_{i,SUPP}} \cdot \frac{c_{S,SUPP}^2}{2} \cdot \frac{1}{v_{SUPP}} \text{ [Pa]} \quad (9.248)$$

$$\Delta p_{SUPP} = 0,0188 \cdot \frac{4,5 \cdot 110}{60 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{13,6^2}{2} \cdot \frac{1}{0,0374} \cdot 10^{-5} = 3,85 \text{ [bar]}$$

Místní ztráty trubkového svazku:

Součinitel místní ztráty pro vstup a výstup z trubkového svazku dohromady $\xi_{SUP} = 0,7$. Neřeším ztrátu na otočení proudu ve dnech. Dosadíme do rov.(9.75).

$$\Delta p_{m_{SUP_P}} = \xi_{SUP} \cdot \frac{c_{S_{SUP_P}}^2}{2 \cdot v_{SUP_P}} = 0,7 \cdot \frac{13,6^2}{2 \cdot 0,0374} \cdot 10^{-5} = 0,021 [bar] \quad (9.249)$$

Celkové ztráty trubkového svazku:

$$\Delta p_{SUP_P} = \Delta p_{tř_{SUP_P}} + \Delta p_{m_{SUP_P}} = 3,85 + 0,021 = 3,87 [bar] \quad (9.250)$$

Tlakovou ztrátu mezitrubkové části určím z následujícího vztahu [20]:

V našem případě pro čtvercové uspořádání $S_T = S_L \rightarrow P_T = P_L = \frac{S_T}{D}$ vychází faktory z diagramu na Obr. 30.

$$Re_{D,SUP_S} = 415\,049,4 [-], P_{L_{SUP}} = \frac{t_{li_{SUP}}}{d_{e_{SUP_P}}} = \frac{98}{70} = 1,4 [-] \rightarrow f_{SUP} = 0,25 [-] \quad (9.251)$$

$$\frac{(P_{L_{SUP}} - 1)}{(P_{L_{SUP}} - 1)} = \frac{(1,4 - 1)}{(1,4 - 1)} = 1 [-], Re_{D,SUP_S} = 415\,049,4 [-] \rightarrow \chi_{SUP} = 1 [-] \quad (9.252)$$

Dosadíme do rov.(9.83).

$$\Delta p_{SUP_S} = N_{L_{SUP}} \cdot (\text{počet segmentů} + 1) \cdot \chi_{SUP} \left(\frac{\rho_{in_{SUP_S}} \cdot c_{max_{SUP_S}}^2}{2} \right) \cdot f_{SUP} \quad (9.253)$$

$$\Delta p_{SUP_S} = 11 \cdot (8 + 1) \cdot 1 \left(\frac{1796 \cdot 3,5^2}{2} \right) \cdot 0,25 \cdot 10^{-5} = 2,72 [bar]$$

9.4.5. Efektivita výměníku metodou ϵ - NTU

Měrná tepelná kapacita páry:

$$C_{SUP_P} = \dot{m}_{SUP_P} \cdot c_{p_{SUP_P}} = 10,302 \cdot 2,7107 = 27,925 [W/K] \quad (9.254)$$

Měrná tepelná kapacita soli při střední teplotě ve výměníku:

$$c_{p_{stř_{SUP_S}}} = \frac{c_{p_{out_{SUP_S}}} + c_{p_{in_{SUP_S}}}}{2} = \frac{1,523 + 1,538}{2} = 1,531 [kJ/kg \cdot K] \quad (9.255)$$

Měrná tepelná kapacita soli:

$$C_{SUP_S} = \dot{m}_{SUP_S} \cdot c_{p_{stř_{SUP_S}}} = 59,1 \cdot 1,531 = 90,404 [W/K] \quad (9.256)$$

Měrná tepelná kapacita slabšího proudu:

$$C_{SUP_{min}} = C_{SUP_P} = 27,925 [W/K] \quad (9.257)$$

Měrná tepelná kapacita silnějšího proudu:

$$C_{SUP_{max}} = C_{SUP_s} = 90,404 [W/K] \quad (9.258)$$

Bezrozměrné kritérium NTU pro výměník:

Dosadíme do rov.(9.87).

$$NTU_{SUP} = \frac{k_{SUP} \cdot S_{SUP}}{C_{SUP_{min}}} = \frac{778,2 \cdot 108,8}{27,925} = 3,033[-] \quad (9.259)$$

Poměr tepelných kapacit proudů:

Dosadíme do rov.(9.95).

$$C_{r_{SUP}} = \frac{C_{SUP_{min}}}{C_{SUP_{max}}} = \frac{27,925}{90,404} = 0,309 [-] \quad (9.260)$$

Efektivita výměníku pro křížový proud:

Dosadíme do rov.(9.97).

$$\varepsilon_{kr_{SUP}} = 1 - e^{\frac{-(1-e^{-NTU_{SUP}-C_{r_{SUP}}})}{C_{r_{SUP}}}} = 1 - e^{\frac{-(1-e^{-3,03-0,309})}{0,309}} = 0,96 [-] \quad (9.261)$$

Efektivita výměníku shell and tube:

Dosadíme do rov.(9.99).

$$\varepsilon_{shell_{SUP}} = 2 \cdot \left\{ \frac{1 + C_{r_{SUP}} + (1 + C_{r_{SUP}}^2)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{1 + e^{\left[-(NTU_{SUP}) \cdot \left((1 + C_{r_{SUP}}^2)^{\frac{1}{2}} \right) \right]^{-1}}}{1 - e^{\left[-(NTU_{SUP}) \cdot \left((1 + C_{r_{SUP}}^2)^{\frac{1}{2}} \right) \right]}}}{1 - e^{\left[-(3,033) \cdot \left((1 + 0,309^2)^{\frac{1}{2}} \right) \right]}} \right\}^{-1} \quad (9.262)$$

$$\varepsilon_{shell_{SUP}} = 2 \cdot \left\{ \frac{1 + 0,309 + (1 + 0,309^2)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{1 + e^{\left[-(3,033) \cdot \left((1 + 0,309^2)^{\frac{1}{2}} \right) \right]^{-1}}}{1 - e^{\left[-(3,033) \cdot \left((1 + 0,309^2)^{\frac{1}{2}} \right) \right]}}}{1 - e^{\left[-(3,033) \cdot \left((1 + 0,309^2)^{\frac{1}{2}} \right) \right]}} \right\}^{-1} = 0,82 [-]$$

V Tab. 35 jsou porovnány tlakové ztráty mezitrubkového prostoru a efektivita pro jednotlivé soli. Pro dané parametry vychází tlakové ztráty mezitrubkového prostoru podobné, liší se o cca 0,1 a 0,2 bar. Efektivitu bych dále používal pro shell and tube.

Tab. 35 Porovnání tlakových ztrát a efektivitu pro jednotlivé soli

Médium			sůl A	sůl B	sůl C
$P_{L_{SUP}}$	Stoupání	[-]	1,4		
f_{SUP}	Koeficient tření	[-]	0,25		
χ_{SUP}	Korekční faktor	[-]	1		
Δp_{SUP_s}	Tlak. ztráty mezi.	[bar]	2,72	2,63	2,54
Efektivita					
C_{SUP_p}	Měrná kap. páry	[kW/K]	27,925		
C_{SUP_s}	Měrná kap. soli	[kW/K]	90,404	90,378	87,441
$C_{SUP_{min}}$	Min. měrná kap.	[kW/K]	27,925		
$C_{SUP_{max}}$	Max. měrná kap.	[kW/K]	90,404	90,378	87,441
$C_{r_{PRE}}$	Poměr tep. proudů	[kW/K]	0,309	0,309	0,319
NTU_{SUP}	Bezrozměrné kri. NTU	[-]	3,033		
$\varepsilon_{kr_{SUP}}$	Efektivita křížového	[-]	0,96	0,96	0,95
$\varepsilon_{shell_{SUP}}$	Efektivita shell and tube	[-]	0,82	0,82	0,81

10. Bilanční modely

Bilanční modely Obr. 35 až Obr. 42 jsou vytvořeny dle získaných dat od zadavatele, pro kterého jsou následující modely vytvořeny. Jedná se o osm modelů z toho pokaždé dva se liší dobou sledování naměřených dat, pro shodnou dobu skladování, skladovací kapacitu. Základní podmínkou je doba vybíjení min. 1 hodinu, při plném zatížení turbíny tj. 10 MW_e na výstupu z generátoru. Z toho vyplývá, že min. skladovací kapacita musí být větší než vybíjecí výkon na výměnících cca 26,8 MW_t, aby nemohlo dojít v krajních případech k úplnému vybití. Pokud by hrozilo úplné vybití, musíme k vybíjecímu výkonu připočítat tepelné ztráty „samovybíjením“ skladovacích nádrží, po dobu, než opět nastane nabíjení. Touto podmínkou je zabezpečeno, aby nemohlo dojít k zatuhnutí soli v nádrži. V mimořádných případech by mohlo dojít vlivem tepelných ztrát k poklesu teploty, až na teplotu zatuhnutí, pokud by skladovací kapacita byla menší než tepelné ztráty a současně by se dlouhou dobu nenabíjelo. Na Obr. 35 až Obr. 42 jsou znázorněny bilanční modely pro jednotlivé velikosti skladovací kapacity za 1 nebo 2 roky. Uvedené modely pracují s tepelnými ztrátami odpovídající soli A, ale od ostatních solí by se změnili pouze ve velikosti tepelných ztrát, což by bylo nepatrné.

10.1.1. Model pro 4 hodinovou akumulaci

Celkový nabitý výkon do nádrže za 1 rok:

$$P_{cel_{nab}} = \sum \dot{Q}_{nab} \cdot \text{doba nabíjení} = 5\,249,5 \text{ [MWh}_t\text{]} \quad (10.1)$$

Celkový vybitý výkon z nádrže za 1 rok:

$$P_{cel_{vyb}} = \sum \dot{Q}_{vyb} \cdot \text{doba vybíjení} = 5\,172,4 \text{ [MWh}_t\text{]} \quad (10.2)$$

Celkové tepelné ztráty obou nádrží za 1 rok:

$$P_{cel_{zt}} = P_{cel_{nab}} - P_{cel_{vyb}} = 5\,249,5 - 5\,172,4 = 77,1 \text{ [MWh}_t\text{]} \quad (10.3)$$

Celková vyrobená elektřina za 1 rok:

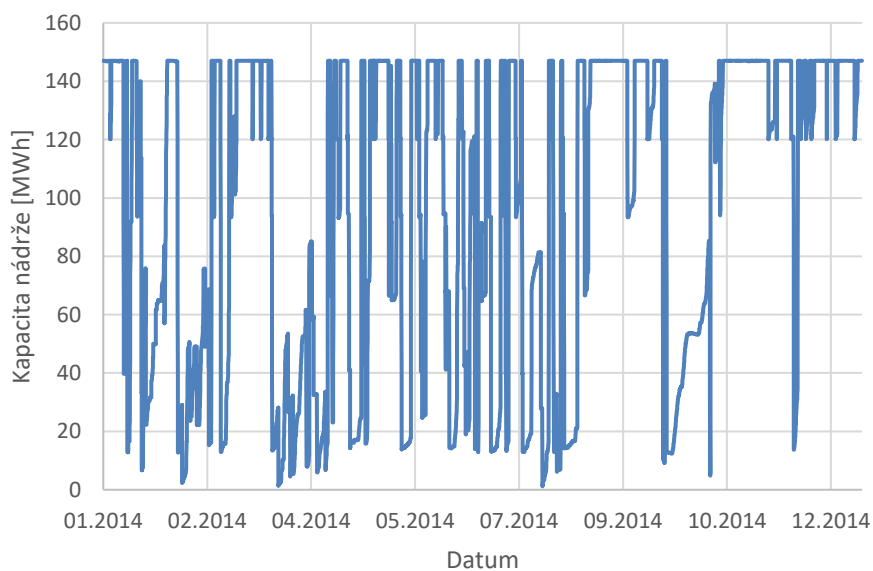
$$P_{cel_{ele}} = \frac{P_{cel_{vyb}}}{\dot{Q}_{vyb}} \cdot P_{gen} = \frac{5\,172,4}{26\,778 \cdot 10^{-3}} \cdot 10 = 1\,930 \text{ [MWh}_e\text{]} \quad (10.4)$$

Účinnost skladování tepla v nádrži za 1 rok:

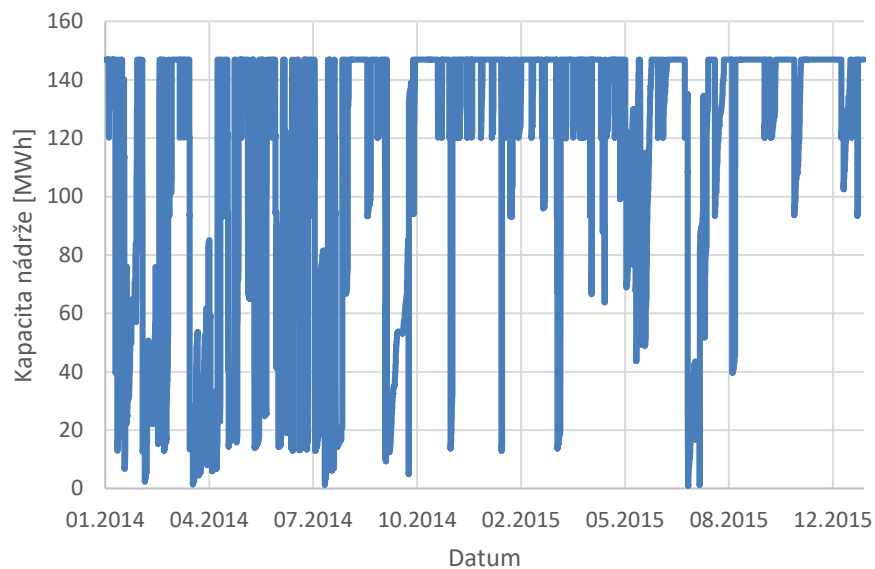
$$\eta_{aku_t} = \frac{P_{cel_{vyb}}}{P_{cel_{nab}}} = \frac{5\,172,4}{5\,249,5} = 0,9853 \text{ [-]} = 98,53 \text{ [%]} \quad (10.5)$$

Účinnost výroby elektřiny za 1 rok:

$$\eta_{aku_{ele}} = \frac{P_{cel_{ele}}}{P_{cel_{nab}}} = \frac{1\,930}{5\,249,5} = 0,3677 \text{ [-]} = 36,77 \text{ [%]} \quad (10.6)$$

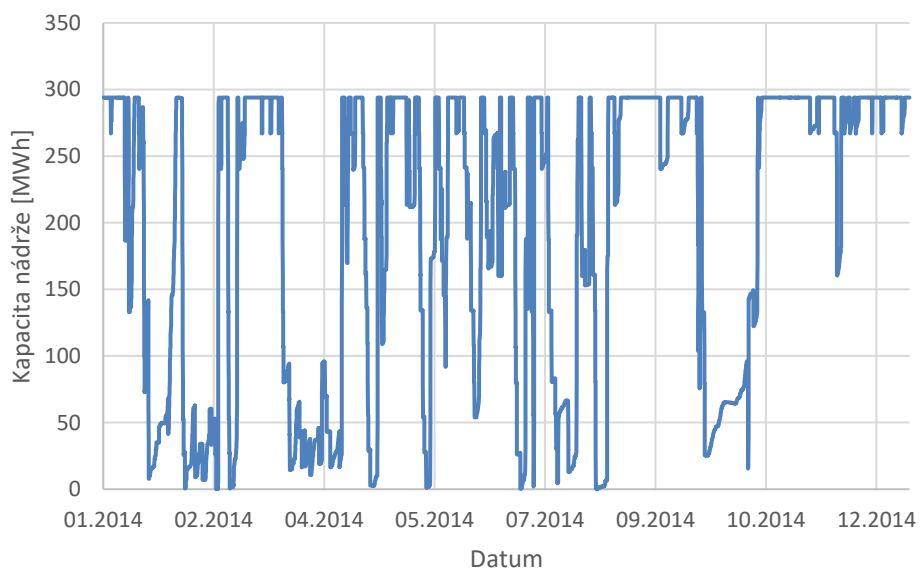


Obr. 35 Bilanční model max. kapacity 147 MWh za 1 rok

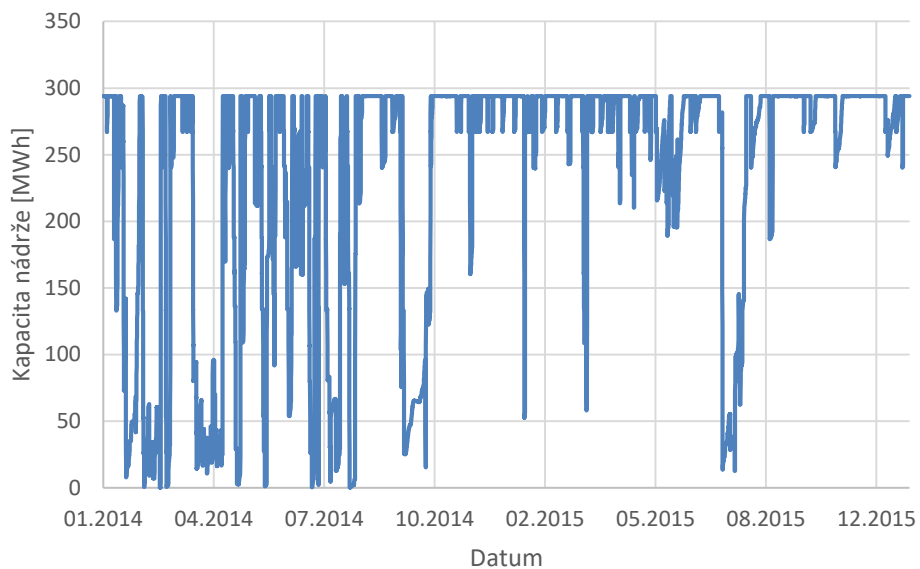


Obr. 36 Bilanční model max. kapacity 147 MWh za 2 roky

10.1.2. Model pro 8 hodinovou akumulaci

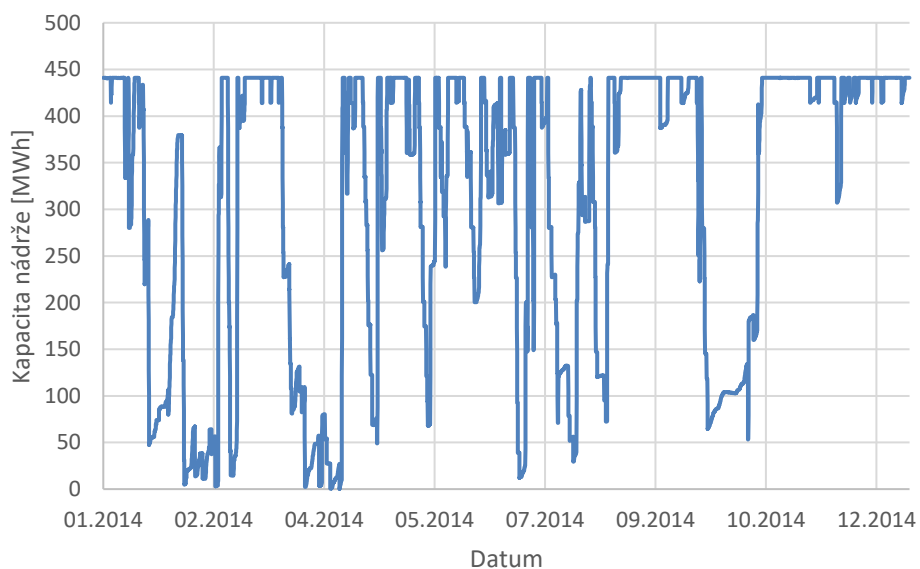


Obr. 37 Bilanční model max. kapacity 294 MWh za 1 rok

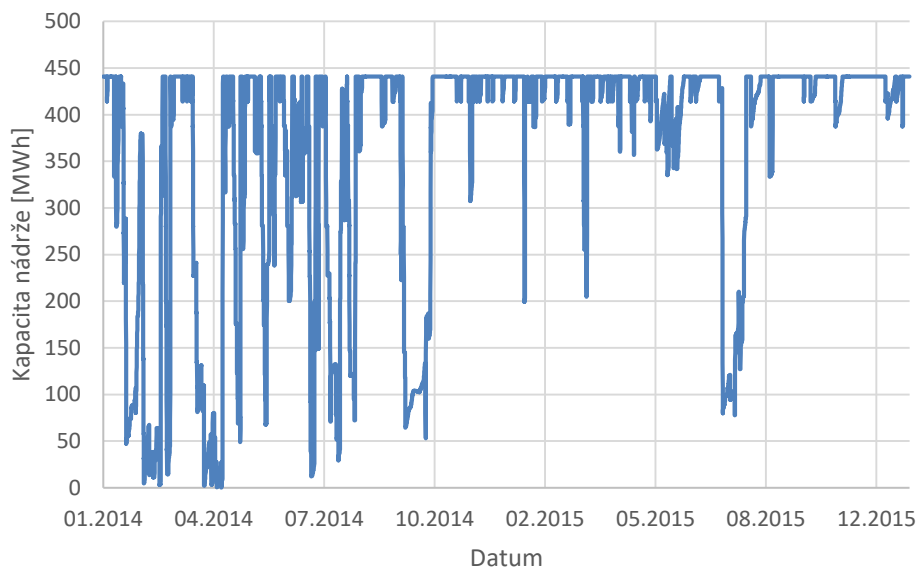


Obr. 38 Bilanční model max. kapacity 294 MWh za 2 roky

10.1.3. Model pro 12 hodinovou akumulaci

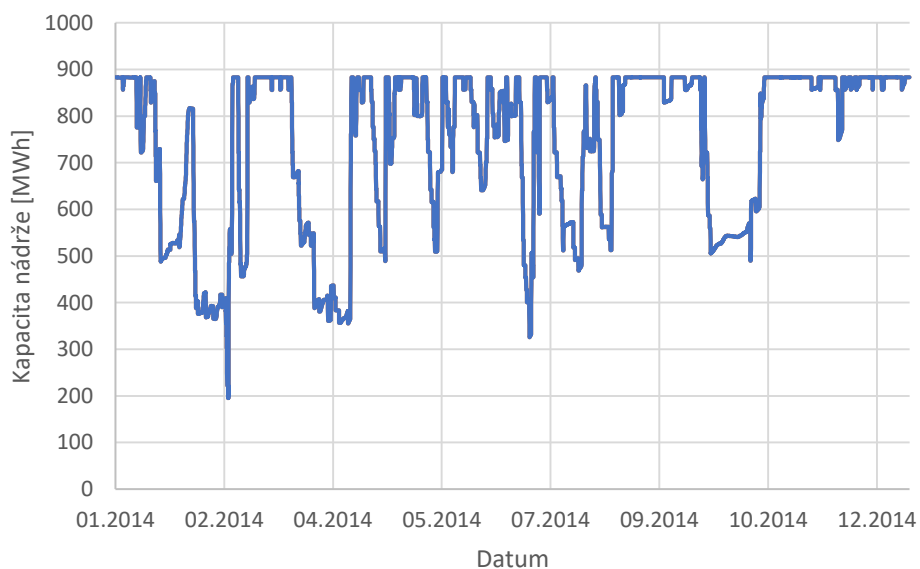


Obr. 39 Bilanční model max. kapacity 441 MWh za 1 rok

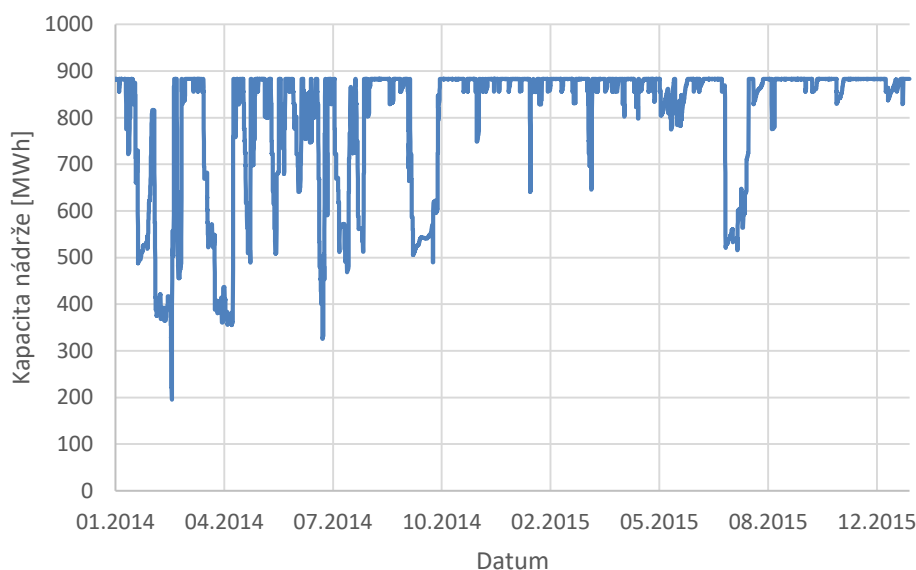


Obr. 40 Bilanční model max. kapacity 441 MWh za 2 roky

10.1.4. Model pro 24 hodinovou akumulaci



Obr. 41 Bilanční model max. kapacity 883 MWh za 1 rok



Obr. 42 Bilanční model max. kapacity 883 MWh za 2 roky

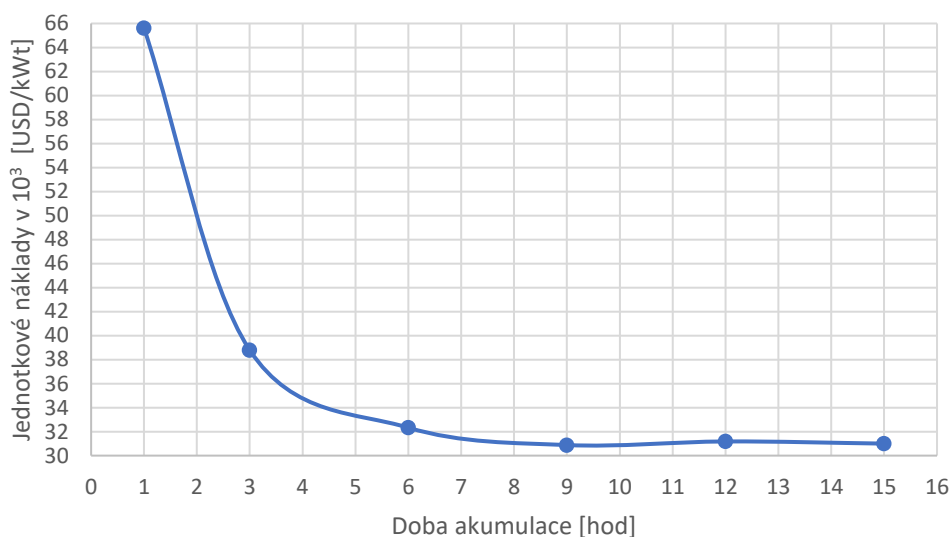
Porovnáním výsledků z Tab. 36 je patrné, že pro zadané parametry vychází nejlépe dle uvedených tepelných a elektrických účinností akumulace na 4 hodiny. Se zvětšující dobou akumulace se snižují obě účinnosti a pochopitelně rostou tepelné ztráty. Pro zadané parametry vychází nejhůře akumulace na 24 hodin, z hlediska účinností je patrné z modelů Obr. 41, Obr. 42, kde nedochází za 1 ani 2 roky k jedinému téměř celkovému vybití. Proto z uvedených variant bych volil akumulaci na 4 nebo 8 hodin, kde akumulace na 8 hodin má v budoucnu možnost lepšího využití při větších nebo delších nabíjecích výkonech. Dále by bylo možné z Tab. 36 vypočítat náklady na tepelné ztráty v průběhu akumulace.

Tab. 36 Účinnost skladování tepla a zpětné výroby elektřiny za 1 a 2 roky

Doba akumulace		[hod]	4	8	12	24
$P_{aku_{hot}}$	Akumulovaný výkon	[MWh]	147	294	441	883
Za 1 rok						
$P_{cel_{nab}}$	Nabitý výkon	[MWh]	5249,5	7328,7	8490,2	9040,7
$P_{cel_{vyb}}$	Vybitý tepelný výkon	[MWh _t]	5172,4	7209,2	8334,8	8790,4
$P_{cel_{ele}}$	Vybitý výkon elektřina	[MWh _e]	1930	2690	3110	3280
$P_{cel_{zt}}$	Tepelná ztráta akumulace	[MWh _t]	77,1	119,5	155,4	250,3
η_{aku_t}	Účinnost akumulace tepla	[%]	98,53	98,37	98,17	97,23
$\eta_{aku_{ele}}$	Účinnost výr. ele. z aku.	[%]	36,77	36,71	36,63	36,28
Za 2 roky						
$P_{cel_{nab}}$	Nabitý výkon	[MWh]	7524,2	9994,2	11272,1	11917,4
$P_{cel_{vyb}}$	Vybitý tepelný výkon	[MWh _t]	7370	9755,2	10961,2	11416,8
$P_{cel_{ele}}$	Vybitý výkon elektřina	[MWh _e]	2750	3640	4090	4260
$P_{cel_{zt}}$	Tepelná ztráta akumulace	[MWh _t]	154,2	239	310,9	500,6
η_{aku_t}	Účinnost akumulace tepla	[%]	97,95	97,61	97,24	95,8
$\eta_{aku_{ele}}$	Účinnost výr. ele. z aku.	[%]	36,55	36,42	36,28	35,75

11. Pořizovací náklady na solný okruh

Investice na pořízení solného okruhu získáme z uvedené jednotkové ceny dle Tab. 8. Z tohoto důvodu budeme získané ceny brát spíše informativně, neboť uvedené ceny se mohli značně měnit. Z průběhu jednotkových nákladů Obr. 43 jsme zjistily tyto náklady v jednotlivých dobách akumulace pro náš případ. V případě akumulace na 24 hod se jedná pouze o odhad podle charakteristického průběhu jednotkových nákladů.



Obr. 43 Graf jednotkových nákladů na akumulaci dle Tab. 8

V rov.(11.1) je uveden výpočet celkových nákladů pro 4 hodinovou akumulaci a v Tab. 37 jsou porovnané celkové náklady na jednotlivé doby akumulace. V celkových nákladech jsou zahrnuty: dvě nádrže na skladování, sůl jako médium, výměníky (cena stanovena pro typ sůl x olej), čerpadla, řídicí systémy,

$$\text{Celkové náklady} = \text{Jednotková cena} \cdot \dot{Q}_{vyb} \quad (11.1)$$

$$\text{Celkové náklady} = 34,7 \cdot 10^3 \cdot 26\,777,8 = 929\,190 \cdot 10^3 \text{ [USD]}$$

Tab. 37 Porovnání nákladů podle doby akumulace

Náklady podle doby akumulace					
Doba akumulace	[hod]	4	8	12	24
Jednotková cena	[tis. USD/kWh]	34,7	31,05	31,18	29
Celkové náklady	[tis. USD]	929 190	831 451	834 932	776 557
Kurz	[Kč/USD]	22,3			
Celkové náklady	[tis. Kč]	20 720 940	18 541 360	18 618 989	17 317 212

12. Závěr

Cílem diplomové práce bylo navrhnout oběh skládající se z primární (solné) části a sekundární (parní) části, umožňující akumulaci a zpětné získání elektřiny. Dalším cílem bylo navržení výměníků, skladovacích nádrží, umožňující akumulaci, přenos tepla mezi solnou a parní částí oběhu. Posledním cílem bylo sestavení bilančních modelů ze zadaných dat od zadavatele.

Nejprve byla zhotovena literární rešerše v oblasti ukládání energie do roztavených solí. Získané informace byly použity pro návrh zapojení jednotlivých zařízení a pro výběr vhodných solných médií solné části. Solná média byla vybrána stejná jako se používá na solárních elektrárnách se skladováním energie. U těchto médií jsou poměrně známy různé stavy měnící se z jejich teplotou, také jsou známy degradační a korozní vlastnosti.

Návrh celého oběhu kromě skladovacích nádrží byl proveden v programu CT, z kterého byli převzaty veškeré teploty, tlaky a množství obíhajícího média v parní části. Tato část byla použita z běžných tepelných elektráren mající parní okruh. V CT nebyli pro první hrubý návrh uvažovány tepelné a tlakové ztráty, rovněž nebyla řešena účinnost jednotlivých výměníků. Pro návrh celého oběhu v CT byl nejdůležitější požadovaný výstupní výkon na generátoru 10 MW a minimální teplotu soli při níž hrozí zatuhnutí 220 °C. Následně byli voleny některé teploty oběhu a pro skladovací nádrže doba akumulace.

Ze získaných hodnot v CT byli navrženy a vypočteny skladovací nádrže, pro čtyři zvolené doby akumulace. Pro bilanční modely byly vypočítány tepelné ztráty tzv. samovybíjení. Následně byly navrženy tři výměníky pro přenos tepla. Dle získaných hodnot byly navrženy základní rozměry použitého výměníku. Byla provedena hrubá optimalizace výměníků pomocí vypočítaných tlakových ztrát. Ve výparníkové EVA části, kde dochází k varu byl proveden předběžný návrh uvažující tento prostor jako celek a poté podrobnější výpočet s rozděleným prostorem do několika částí. U výměníků byla také vypočítána efektivita s uvažovaným křížovým proudem a shell and tube. Ze získaných výsledků efektivit a zdrojů pro její stanovení by bylo vhodné dále pracovat jen s efektivitou pro shell and tube.

Zmíněné bilanční modely byli vytvořeny ze zadaných naměřených dat zadavatele. Z těchto dat byli pro každou dobu akumulace provedeny dva modely lišící se dobou sledování 1 a 2 roky. Z bilančních modelů vychází nejlépe pro zadané hodnoty skladovací nádrže s kapacitou 147 a 294 MWh, odpovídající době akumulace na 4 a 8 hodin.

Pro další studii by bylo vhodné uvažovat za solné médium sůl A, pro kterou máme nejvíce věrohodné vlastnosti. Dalším důvodem pro uvažování této soli do dalších aplikací je její velké zastoupení ve velkých solárních elektrárnách. U zbývajících solí nejsou vlastnosti až tak věrohodné, nejméně věrohodné jsou u soli C. Tato sůl má ve výpočtových korelacích dosti nejasností a někdy dokonce chyby.

Na tuto práci by bylo možné navázat rozšíření spočívající v detailnější optimalizaci výměníků, případně skladovacích nádrží. Dále by šlo zjištěné optimalizované tlakové ztráty zadat do použitého

„ideálního“ oběhu v CT. Další možností by bylo použití jiných solných médií, popřípadě nahrazení vody v parní části médiem CO_2 .

13. Zdroje

- [1] REŠILIÁNO, Tomáš. *Akumulace energie v tlakovém vzduchu*. Brno, 2016. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Jirí Pospíšil, Ph.D.
- [2] CÁRDENAS, Bruno a Noel LEÓN. High temperature latent heat thermal energy storage: Phase change materials, design considerations and performance enhancement techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2013, **27**, 724-737 [cit. 2018-05-15]. DOI: 10.1016/j.rser.2013.07.028. ISSN 13640321. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032113004735>
- [3] Technology Roadmap Energy storage. *International Energy Agency* [online]. Francie, 2014 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: www.iea.org
- [4] WU, Ming, Chao XU a Ya-Ling HE. Dynamic thermal performance analysis of a molten-salt packed-bed thermal energy storage system using PCM capsules. *Applied Energy* [online]. 2014, **121**, 184-195 [cit. 2018-05-15]. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.01.085. ISSN 03062619. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261914001159>
- [5] ORTEGA, J., J. BURGALETA a Félix TÉLLEZ. Central Receiver System Solar Power Plant Using Molten Salt as Heat Transfer Fluid. *Journal of Solar Energy Engineering* [online]. 2008, **130**(2), 024501- [cit. 2018-05-15]. DOI: 10.1115/1.2807210. ISSN 01996231. Dostupné z: <http://SolarEnergyEngineering.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1474160>
- [6] HERRMANN, Ulf, Bruce KELLY a Henry PRICE. Two-tank molten salt storage for parabolic trough solar power plants. *Energy* [online]. 2004, **29**(5-6), 883-893 [cit. 2018-05-05]. DOI: 10.1016/S0360-5442(03)00193-2. ISSN 03605442. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544203001932>
- [7] BULLIS, Kevin. *Molten Salts Might Provide Half-Price Grid Energy Storage* [online]. b.r. [cit. 2018-03-28]. Dostupné z: <https://www.technologyreview.com/s/525121/molten-salts-might-provide-half-price-grid-energy-storage/>
- [8] PIEMONTE, Vincenzo, Marcello FALCO, Pietro TARQUINI a Alberto GIACONIA. Life Cycle Assessment of a high temperature molten salt concentrated solar power plant. *Solar Energy* [online]. 2011, **85**(5), 1101-1108 [cit. 2018-05-15]. DOI: 10.1016/j.solener.2011.03.002. ISSN 0038092X. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X11000843>
- [9] PEIRÓ, Gerard, Jaume GASIA, Laia MIRÓ, Cristina PRIETO a Luisa CABEZA. Experimental analysis of charging and discharging processes, with parallel and counter flow arrangements, in a molten salts high temperature pilot plant scale setup. *Applied Energy* [online]. 2016, **178**, 394-

403 [cit. 2018-05-20]. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.06.032. ISSN 03062619. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261916308078>

- [10] *Generic Environmental Impact Statement for License Renewal of Nuclear Plants* [online]. Vol. 1. Washington, 1991 [cit. 2018-05-28]. ISBN NUREG- 1437. Dostupné z: https://books.google.cz/books?id=3fA3QAAMAAJ&pg=SA9-PA10&lpg=SA9-PA10&dq=LUZ+INTERNATIONAL+LIMITED%2B354mw&source=bl&ots=y7KhdNkbej&sig=7Z_TM26C_5nbPt-eGUofmPY6Zi8&hl=cs&sa=X&ved=0ahUKEwjOm-3MrqbbAhXFCOwKHdZbAhEQ6AEIRDAD#v=onepage&q&f=false
- [11] SOHAL, Manohar, Matthias EBNER, Piyush SABHARWALL a Phil SHARPE. *Engineering Database of Liquid Salt Thermophysical and Thermochemical Properties* [online]. b.r., , - [cit. 2018-05-18]. DOI: 10.2172/1086824. Dostupné z: <http://stoppingclimatechange.com/Molten%20Salt%20Engineering%20Database%20-%204502650.pdf>
- [12] MAGILL, Bobby. Storing clean energy in salt isn't as crazy as it sounds. *Grist* [online]. 2017 [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: <https://grist.org/article/storing-clean-energy-in-salt-isnt-as-crazy-as-it-sounds/>
- [13] MATUŠKA, Tomáš. *Tepelné sítě-tepelné ztráty* [online]. b.r. [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: <http://users.fs.cvut.cz/tomas.matuska/wordpress/wp-content/uploads/2015/10/ZZT-P4-izolace.pdf>
- [14] NOŽIČKA, Jiří. *Základy termomechaniky*. Vyd. 2. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2008. ISBN 978-80-01-04022-5.
- [15] *Materiálové vlastnosti* [online]. b.r. [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: <http://www.gdpkoral.cz/materialove-vlastnosti/p126>
- [16] ŠESTÁK, Jiří a Rudolf ŽITNÝ. *Tepelné pochody II: výměníky tepla, odpařování, sušení, průmyslové pece a elektrický ohřev*. Vyd. 1. Praha: ČVUT, 1997. ISBN 80-01-01630-7.
- [17] OSTREZI, Jakub. *Tepelné výměníky a problematika jejich zanášení* [online]. Brno, 2009 [cit. 2018-07-20]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=16501. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Vojtěch Turek.
- [18] *Akros* [online]. b.r. [cit. 2018-07-14]. Dostupné z: <https://www.akros.cz/>
- [19] ŠULC, Radek. *Přenos tepla* [online]. Fakulta strojní ČVUT v Praze, b.r. [cit. 2018-06-07]. Dostupné z: http://www1.fs.cvut.cz/cz/u218/pedagog/predmety/3rocnik/phth/phth_old-2007/PDF/SULC/teplo/tep_zr3.pdf

- [20] BERGMAN, T. *Introduction to heat transfer*. 6th ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2011. ISBN 978-0470-50196-2.
- [21] Typical Fouling Factors. *Engineeringpage* [online]. b.r. [cit. 2018-07-25]. Dostupné z: https://www.engineeringpage.com/technology/thermal/fouling_factors.html
- [22] DLOUHÝ, Tomáš. *Výpočty kotlů a spalinových výměníků*. Vyd. 3. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03757-7.
- [23] *Výměníky tepla* [online]. b.r. Dostupné také z: tzb.fsv.cvut.cz/files/vyuka/125yatm/prednasky/125yatm-06.pdf
- [24] HORSÁK, Jan. *Posuzování významnosti procesních a energetických zařízení* [online]. Brno, 2012 [cit. 2018]. Dostupné z: dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/6142/2012_BP_Horsak_Jan_126045.pdf?sequence=1. Bakalářská. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Zdeněk Jegla Ph.D.
- [25] HAVLÍK, Aleš a Tomáš PICEK. *Hydraulika potrubí* [online]. Fakulta stavební ČVUT v Praze, b.r. [cit. 2018-05-27]. Dostupné z: http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/HY2V/ke_stazeni/prednasky/HY2V_04_Hydraulika_potrubí.pdf
- [26] ČEŠLA, Martin. *Membránová stěna kotle s pokročilým řízením průtoku*. Brno, 2016. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Jiří Pospíšil Ph.D.