

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: B 2301 Strojní inženýrství  
Studijní zaměření: Stavba energetických strojů a zařízení

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Návrh modelového zařízení pro měření ztrát při průchodu kapaliny mezi  
kulovými elementy

Autor: **Patrik MÜLLER**  
Vedoucí práce: **Ing. Václav Valenta CSc.**

Akademický rok 2013/2014

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**Fakulta strojní**  
**Katedra energetických strojů a zařízení**  
Akademický rok 2013/2014

**ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Patrik Müller**

Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**

Studijní obor: **Stavba energetických strojů a zařízení**

Název tématu: **Návrh modelového zařízení pro měření ztrát při průchodu kapaliny mezi kulovými elementy**

**Z á s a d y   p r o   v y p r a c o v á n í :**

Máte za úkol:

- Seznámit se s reaktory s kulovými grafitovými články s dispersním palivem chlazenými He nebo fluoridovými solemi (LiF-BeF<sub>2</sub>) a vztahy pro určení tlakových ztrát.
- Rozpracování podobnostní teorie pro reaktor s kulovými grafitovými články s dispersním palivem chlazený směsí fluoridových solí LiF-BeF<sub>2</sub>. (Provozní teplota 600-720°C). Pro model jako chladivo uvážit difenily nebo vodu s glycerinem.
- Provést návrh modelu a měření veličin nutných pro určení ztrát.
- Zpracovat výkresovou dokumentaci a popis zařízení spolu s podobnostními výpočty.

Rozsah grafických prací:

**1 – 2 výkresy**

Rozsah pracovní zprávy:

**30 stran**

Forma zpracování bakalářské práce:

**tištěná/elektronická**

**Seznam odborné literatury:**

- [1] Bardet P. et al.: Design, Analysis and Modular PB-AHTR, Proceedings of CAPP Anheim, USA, Jan. 2008.
- [2] Ingersoll D.T. et al.: Status of Preconceptual Design of Advanced High-Temperature Reactor (AHTR), ORNL/TM -2004/104.
- [3] Šorin S.N.: Sdílení tepla. SNTL Praha 1968.
- [4] Michejev M. A.: Základy sdílení tepla. Průmyslové vydavatelství Praha 1952
- [5] Černogurská M.: Základy matematického a fyzikálního modelování v mechanice tekutin, termodynamice a energetice. Plzeň-Konf. 2008.
- [6] Per F. Peterson: Status and Progress for the Pebble-Bed AHTR, University of California, Berkeley, March 2, 2009.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Václav Valenta CSc.**  
Katedra energetických strojů a zařízení.  
Konzultant bakalářské práce: **Ing. Václav Valenta CSc.**  
Katedra energetických strojů a zařízení.

Datum zadání bakalářské práce: **1. listopadu 2013**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **27. června 2014.**

## **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne: .....

.....

podpis autora

## Obsah

1	Úvod.....	8
2	Jaderné reaktory IV. generace.....	8
3	Jaderné reaktory využívající palivo ve formě kulových článků [17].....	9
3.1	Integrální typ reaktoru [9].....	11
3.2	Modulární typ reaktoru [9].....	11
3.3	Experimentální zařízení.....	13
3.4	Vkládání a vyjímání koulí [11].....	14
4	Fyzikální vlastnosti použitých látek a elementů.....	15
4.1	Palivové články [11].....	15
4.2	Roztavená sůl [9].....	16
4.3	Fyzikální vlastnosti kandidujících látek.....	17
4.3.1	Glycerin [15],[16].....	17
4.3.2	Dowtherm A[7],[13].....	17
5	Tlakové ztráty [14].....	17
5.1	Místní tlakové ztráty.....	17
5.1.1	Tlaková ztráta rozšířením.....	18
5.2	Ztráty třením.....	18
5.3	Odpor koule v prostředí [8].....	18
5.4	Tlakové ztráty průchodem pórovitou oblastí.....	19
5.4.1	Darcy [1],[2].....	19
5.4.2	Ergun [3].....	21
5.4.3	Kožený-Carman [6].....	22
5.4.4	Kugeler a Schulten [9],[10].....	23
6	Uspořádání koulí[4],[18].....	23
6.1	Pórovitost.....	23
7	Teorie podobnosti [8].....	25
8	Grafický návrh experimentálního zařízení.....	26
8.1	Měření tlakových ztrát.....	28
8.2	Numerické řešení.....	29
8.2.1	Podobnost.....	29

8.2.2	Tlakové ztráty.....	29
9	Závěr.....	32
	Citovaná literatura .....	33

## Anotace

Úvodem této práce je seznámení se s jadernými reaktory využívající jaderné palivo ve formě kulových článků. Další část je zaměřena na podobné experimenty a na způsob výměny paliva. Následuje teorie uspořádání kulových elementů a vztahy pro výpočet tlakové ztráty. Stejně důležitá je i teorie podobnosti a modelování, na kterou navazuje samostatný návrh zařízení.

## Klíčová slova

Palivové koule, PREX, tlaková ztráta, solný reaktor (MSR), sůl Flibe, TRISO

## Abstract

In the introductory part of this thesis, the reader is being introduced into the problem of nuclear reactors fueled by spheric cells. The next part is focused on similar experiments and on the way of fuel change. Then follows the theory of spheric elements' organization and relations and equations for the calculation of pressure loss. Equally important is also the theory of similarity and modeling which is related to the device design itself.

## Key words

Pebble bed, PREX, pressure drop, molten salt reactor (MSR), Flibe, TRISO

## Použité zkratky

APP - PB-AHTR Pilot Plant (zkušební zařízení pokrokového vysokoteplotního reaktoru s palivovými koulemi)

BWR - Boiling Water Reactor (varný reaktor)

GT-MHR - Gas Turbine - Modular Helium Reactor (heliem chlazený modulární reaktor s plynovou turbínou)

HTTR - High Temperature Test Reactor (vysokoteplotní zkušební reaktor)

HTR - High Temperature Reactor (vysokoteplotní reaktor)

PB-AHTR - Pebble Bed - Advanced High Temperature Reactor (pokrokový vysokoteplotní reaktor s palivovými koulemi)

PBMR - Pebble Bed Modular Reactor (modulární reaktor s palivovými koulemi)

PREX - Pebble Recirculation Experiment (experiment pro výměnu kulových článků)

PWR - Pressure Water Reactor (tlakovodní reaktor)

Co se týká použitých symbolů ve vzorcích - jejich význam je uváděn v textu z důvodu rozdílného značení v různých zdrojích.

## 1 Úvod

Jedním ze šesti typů navrhovaných reaktorů IV. generace jsou reaktory chlazené tekutými solemi. Jaderné palivo je buď rozpuštěno přímo v soli, nebo je v nádobě ve formě kulových elementů. Mezi nimi pak proudí roztavená sůl a odvádí z nich teplo. Průchodem touto oblastí vzniká velká tlaková ztráta, která musí být kompenzována oběhovým čerpadlem. Pro popis tlakové ztráty průchodem porézní oblasti existuje několik vztahů, které jsou více nebo méně přesné. Avšak rozdíly mezi výsledky jednotlivých rovnic jsou několikanásobné. Experimentálním zařízením by se měla určit správnost rovnic a přispět tak k lepšímu návrhu jaderných reaktorů využívající právě jaderné palivo ve formě koulí.

## 2 Jaderné reaktory IV. generace

Jaderné reaktory jsou rozděleny do několika generací. Prvními reaktory, tedy reaktory první generace, byly prototypy, na kterých se testovala možnost využití jaderné energie k výrobě elektrické energie. Druhou generací jaderných reaktorů jsou systémy pracující dodnes a jsou to převážně PWR a BWR. Reaktory třetí generace jsou již většinou také v provozu, ale část z nich je stále ve výstavbě. Jedná se o pokročilé reaktory, které oproti předchozím reaktorům mají zlepšenou bezpečnost a ekonomiku provozu. Další skupina jaderných reaktorů se nazývá generace III+, která spadá také do evolučního vývoje předchozích reaktorů. Zatím poslední skupinou jaderných reaktorů je generace IV. Tato generace dostává revolučních změn. Zna-



mená to, že změny na reaktorových systémech už nejsou postupné, jako tomu bylo u předchozích generací, ale změny jsou zásadní. Hlavním rozdílem je ve způsobu štěpení jaderného paliva. Dosavadní reaktory využívali ke štěpení pomalých (moderovaných) neutronů, kdežto v nové generaci se počítá spíše s využitím rychlých neutronů. Má to za následek vyšší využití paliva, lepší účinnost a tudíž i větší množství uvolněné energie. Tu je však potřeba z reaktoru odvádět, k čemuž stávající chladiva nepostačují.

Jaderné reaktory IV. generace mají mít vyšší bezpečnost. Některé typy vycházejí ze současných reaktorů či z elektráren spalující fosilní paliva. Je tedy možné, na základě poznatků, nahradit části v kritické oblasti lepším materiálem nebo zvolit vhodnější konstrukční řešení. Požadovaná životnost reaktorů nové generace je 60 let.

V Evropě, USA, Japonsku i Rusku se již několik let vyvíjejí pro blízkou budoucnost reaktory, jejichž bezpečnost je kromě dosavadních bariér opřena o základní fyzikální principy, vylučující možnost havárie (tzv. inherentní bezpečnost), a o tzv. prvky pasivní bezpečnosti, které by i při velmi nízké pravděpodobnosti nehody zabránily úniku nebezpečných látek mimo prostor reaktoru a kontejnmentu i v případě, že by všechny instalované systémy aktivní bezpečnosti selhaly, například v důsledku výpadku dodávky proudu.

Inherentní bezpečnost má základ v takovém uspořádání aktivní zóny, které za všech okolností po fyzikální stránce vykazuje záporný koeficient reaktivity. Dojde-li ke zvýšení teploty reaktoru nebo jen článku v některém z palivových kanálů, zhorší se přirozenou cestou zpomalování neutronů udržujících štěpnou reakci. Začne klesat počet štěpících se jader, tím pádem dojde i k menšímu uvolňování energie. Inherentně bezpečným se dnes označuje takový systém, který je netečný vůči lidským chybám nebo úmyslným zásahům i proti vnějším vlivům.

Do pasivní bezpečnosti spadá použití takových systémů regulace výkonu, chlazení aktivní zóny a jejího havarijního dochlazování, které budou fungovat i v případě výpadku elektrického proudu pro čerpadla, regulační ventily a další komponenty, což by mohlo nastat jen při současném selhání několika záložních zdrojů energie, kterými jsou dnešní jaderné elektrárny vybaveny. Příkladem jsou tyče havarijní ochrany, které v případě selhání elektrického systému uvolnění a pohonu spadnou do aktivní zóny působením zemské tíže.

Výstavba reaktorů se má zjednodušit a tím i zrychlit a zlevnit. Reaktory nové generace mají dosahovat vyšší účinnosti a zapojit se třeba do vodíkového hospodářství, výroby ropy anebo odsolování mořské vody. Reaktory IV. generace by měly významně přispět ke snížení množství radioaktivního odpadu a tím také snížit riziko zneužití pro jaderné zbraně.

### **3 Jaderné reaktory využívající palivo ve formě kulových článků [17]**

Pro vývoj reaktorů čtvrté generace bylo založeno mezinárodní fórum GIF (Generation IV. International Forum) seskupující několik členských států, které se spolu s dalšími projekty podílí na vývoji reaktorů nové generace. V rámci tohoto fóra bylo představeno šest typů reaktorů, jejichž vývoj je perspektivní. Média pro odvod tepla v těchto reaktorech jsou např. sodík, olovo, helium. Jedním typem nových reaktorů je i neklasický jaderný reaktor využívající

pro chlazení roztavených solí. Tyto sole mohou být využity jako chladivo, ale také jako médium v primárním okruhu, ve kterém je jaderné palivo rozptýleno, a to buď ve formě částic a nebo v soli úplně rozpuštěno. Tento způsob uložení paliva však doposud nebyl v předchozích generacích jaderných reaktorů, ani v žádném experimentu, použit.

Tekuté sole mají dobré fyzikální vlastnosti a to jak z hlediska odvodu tepla z reaktoru tak i z hlediska reaktivity s vodou nebo s komponenty uvnitř reaktoru, nepůsobí tedy ani na stěny reaktoru korozivně. Další výhodou je, že bod varu roztavených solí za běžného tlaku je až kolem 1400 °C. To předurčuje využití tepla ze solných reaktorů ve vodíkovém hospodářství. Teplota tavení solí by mohla být v rozmezí 300 – 500 °C v závislosti na použité směsi solí. Jednou z alternativ se uvažují sole flibe s chemickým vzorcem  ${}^7\text{Li}_2\text{BeF}_4$ . Další alternativou je např. sůl  $\text{NaF-ZrF}_4$ . Přehled uvažovaných solí se základními fyzikálními vlastnostmi jsou uvedeny v následující tabulce.

chladiivo	$t_{\text{tání}} [^{\circ}\text{C}]$	$t_{\text{varu}} [^{\circ}\text{C}]$	$\rho$ [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	$c_p$ [ $\text{kJ}/\text{kgK}$ ]	$\lambda$ [ $\text{W}/\text{mK}$ ]	$\nu \cdot 10^{-6}$ [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]
$\text{LiF} - \text{BeF}_2$ (66 - 34)	459	1430	1940	2,34	1,0	2,9
$\text{NaF} - \text{ZrF}_4$ (59,5 - 40,5)	500	1290	3140	1,17	0,5	2,6
$\text{LiF} - \text{NaF} - \text{ZrF}_4$ (26 - 37 - 37)	436	-	2790	1,25	0,5	-
$\text{LiF} - \text{NaF} - \text{BeF}_2$ (31 - 31 - 38)	315	1400	2000	2,04	1,0	2,5
$\text{NaF} - \text{NaBF}_4$ (8 - 92)	385	700	1750	1,51	0,5	0,5
voda (7.5MPa)	0	100	732	5,5	0,56	0,13

Tabulka 1 Vlastnosti solí a vody

Jsou vyvíjeny také reaktory, které budou využívat palivo ve formě koulí, ale chladícím médiem je stlačený plyn. V experimentálních reaktorech je použito jak dusíku, tak i hélia, ale spíše se předpokládá využití hélia. Tyto projekty byly vyvíjeny v Japonsku (HTTR), v Číně (HTR) a v jižní Africe (PBMR). Podobně Rusko a USA vyvíjejí reaktor chlazený plynem (GT-MHR) s prizmatickým návrhem zóny. Tyto typy reaktorů mají odlišný pohyb palivových koulí od reaktorů chlazených tekutými solemi. Je to dáno vztakovou silou působící na palivové částice. V reaktorech chlazených plynem se chladivo i palivové koule pohybují dolů, kdežto u reaktorů chlazených roztavenými solemi je pohyb koulí i chladiva směrem vzhůru. Plyné médium umožňuje pracovní teploty v rozmezí 700 až 1000 °C což je nejen z hlediska účinnosti výhodné. Vysoký provozní tlak až 7 MPa však představuje jisté bezpečnostní

riziko. Na samotných zařízeních se uvažuje možnost výměny jednotlivých palivových koulí a to tak, že budou přecházet z vnější oblasti do centrální části, což bude vést k vyššímu stupni vyhoření.

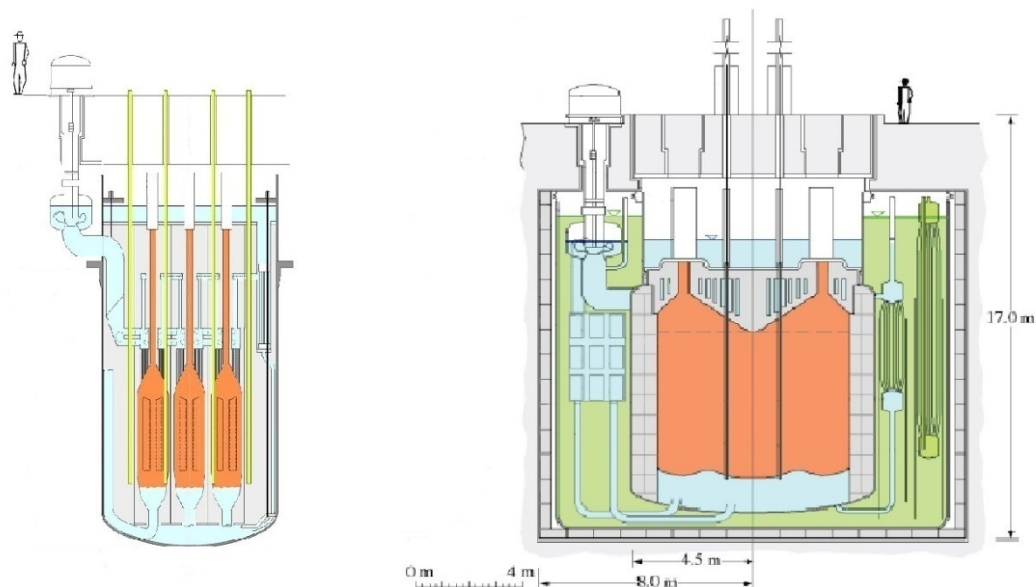
### 3.1 Integrální typ reaktoru [9]

Tento reaktor používá palivové koule o velikosti 6 cm se stěnou o tloušťce 5 mm. Je možné použít různé velikosti koulí, ale v tomto projektu jsou použity pouze koule o stejné velikosti. Palivové koule jsou náhodně uspořádávány v reaktorovém válci. Způsob uspořádání koulí a jejich objem v prostoru bude uveden později. Výkonová hustota je tohoto typu reaktoru je  $10,2 \text{ MW/m}^3$  a celkový výkon reaktoru je 2400 MWth. Jádrem je válcové o průměru 6,8 m a o aktivní výšce 6,4 m. Jádrem obsahuje okolo 1,25 milionu koulí.

### 3.2 Modulární typ reaktoru [9]

Modulární typ byl představen pro použití menších, 3 cm velkých koulí s tloušťkou stěny také 5 mm, pod kterou je grafitové jádro o průměru zhruba 1,6 cm. Jádrem reaktoru je sestaveno ze šestihránných grafitových bloků o vnější rozteči protilehlých stěn 125 cm. Uvnitř každého bloku je 18 resp. 19 kanálů o průměru 19,8 cm, uvnitř kterých proudí koule. Koule jsou vkládány ve spodní části každého kanálu. Před tímto vstupem se shromažďují a vytváří shluk před nasměrováním do kanálu. Na výstupu kanálu tvoří koule další shluk přímo pod odváděcím kanálem. Každý kanál je vybaven vlastním systémem pro vkládání a vyjímání koulí. Kanálová část je dlouhá 220 cm. Spodní shluk, tedy ten u vstupu do kanálu je dlouhý 50 cm a horní je dlouhý 89 cm, což dává dohromady 359 cm aktivní délky. Na této délce každého kanálu je kolem 0,5 milionu koulí. Popisovaný projekt sestává ze sedmi grafitových bloků a celkový výkon činí 900 MWth.

Použitím takovýchto kanálů utváří návrh reaktoru velice modulárním a je možné tedy postavit reaktor s různým počtem kanálů. Výstavba jaderných elektráren pomocí modulů značně zjednodušuje a urychluje proces schvalování. Tím je výstavba ekonomičtější a levnější. Porovnání modulárního (vlevo) a integrálního (vpravo) typu reaktoru je na následujícím obrázku.



Obrázek 1 Modulární a integrální typ reaktoru PB-AHTR

Parametr	modulární typ	integrální typ
průměr koule (cm)	3,0	6,0
tepelný výkon (MWth)	900	2400
průměrná hustota výkonu jádra (MW/m <sup>3</sup> )	30	10,3
počet průtočných kanálů	127	1
průměr průtočného kanálu (m)	0,198	6,7
průměrná výška jádra (m)	3,2	6,61
vstupní / výstupní teplota (°C)	600/704	600/704
průtočná hmotnost chladiva (kg/s)	3630	9670
průměrná rychlost chladiva (m/s)	0,38	0,14
tlaková ztráta v reaktoru (kPa)	440	73
výkon čerpadla	1200	514
specifický výkon čerpadla (kW/MWth)	1,3	0,21

Tabulka 2 Srovnání modulárního a integrálního typu reaktoru PB-AHTR

### 3.3 Experimentální zařízení

Činnost těchto typů reaktorů je testována na zmenšených modelech, které jsou geome-

	<b>PB-AHTR</b>	<b>APP</b>	<b>PREX</b>
pracovní látka	Flibe	Flibe	voda
vstupní teplota	600 °C	600 °C	20 °C
výstupní teplota	704 °C	704 °C	20 °C
hustota kapaliny	1990 - 1940 [kg/m <sup>3</sup> ]	1990 - 1940 [kg/m <sup>3</sup> ]	999 [kg/m <sup>3</sup> ]
hustota koulí	1680 - 1810 [kg/m <sup>3</sup> ]	1680 - 1810 [kg/m <sup>3</sup> ]	843 [kg/m <sup>3</sup> ]
velikost koulí	6 cm	6 cm	2,5 cm
hustota plnění	60%	60%	60%
počet koulí	1 200 000	26 000	8 300
aktivní výška	6,4 m	2,13 m	0,99 m
průměr	6,8 m	1,7 m	0,406 m
průtočná plocha	36,3 m <sup>2</sup>	2,27 m <sup>2</sup>	0,12 m <sup>2</sup>
průměr studeného úseku	20 cm	20 cm	10,2 cm

tricky podobné plánovaným reaktorům. Zmenšena je jak pracovní oblast, její výška nebo rychlost proudění, tak třeba i celkový výkon experimentálního zařízení. Na modelových zařízeních je testována např. proveditelnost konstrukce, materiálová odolnost pracovních médií při vysoké teplotě nebo funkčnost celého systému. Tyto zkušební zařízení hrají důležitou roli ve vývoji a udělování licencí. Na základě těchto licencí jsou vývojářům poskytovány finance pro další experimenty resp. pro výstavbu zařízení.

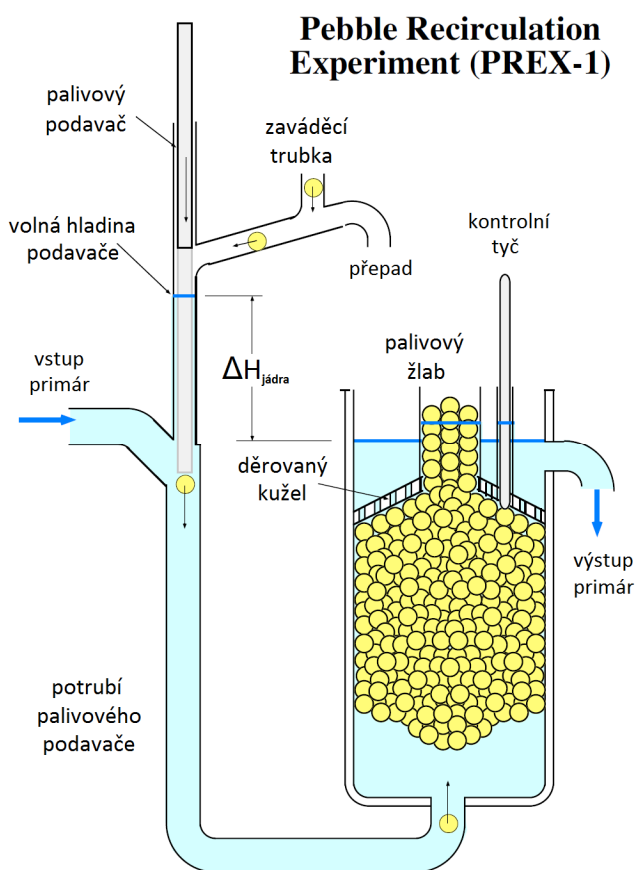
Jedním takovým experimentálním zařízením zaměřeným na recirkulaci palivových koulí je PREX (PebbleRecirculation Experiment). Jako médium nahrazující roztavené sole je zvolena voda a koule simulující jaderné palivo jsou z polypropyleny. Poměr hustot těchto materiálů je podobný poměru hustot skutečných palivových koulí a roztavené soli.

Tabulka 3 - Srovnání experimentů

### 3.4 Vkládání a vyjímání koulí [11]

V PB-AHTR jsou nadnášené koule o průměru 6 cm vháněny do ochlazené části stojatého potrubí pomocí pístu. Dále jsou pak tyto koule strhávány proudem chladicí kapaliny až do prostoru reaktorové nádoby. V této části se koule vlivem vztlakové síly vznesou do horní části pod děrovaný kužel (reflektor), kde se vytváří shluk. V horní části děrovaného kužele je žlab (trubka), kudy koule opouští reaktorovou nádobu. Postupně se tak koule, co se vznesly ke spodní části shluku, dostávají k horní části a nádobu opouští.

V PREX je to podobné. Koule o průměru 2,5 cm jsou také vháněny za pomoci pístu kanálem o průměru 5 cm přes hvězdicové připojení. Tento kanál se následně rozšiřuje na průměr 10 cm, který je dlouhý 1 m. Koule jsou pak chladivem unášeny přes dvě 90° kolena a ústí do spodní části nádoby. Geometrie tohoto prezentovaného modelu přesně neodpovídá měřítku. Polypropylenové koule by měly být vháněny přímo do potrubí o průměru 10 cm. Tento rozdíl bude mít vliv na dynamiku koulí zejména v rozšiřující se oblasti. Vháněním jednotlivých koulí nebo několika koulí najednou bylo prokázáno, že tento způsob vkládání koulí do nádrže je možný a proveditelný.



Obrázek 5 Schéma PREX



Obrázek 4 PREX

Protože PREX je zmenšeným modelem prototypu APP, má tudíž jinou geometrii odvodu koulí. APP má čtyři kanály pro odvod palivových koulí, kdežto PREX má pouze jediný. Tento reflektor je provedený děrovaným kuželem pod úhlem  $45^\circ$  zužující se od stěny směrem nahoru. Otvory v kuželu jsou o průměru 1,2 cm, aby byl umožněn prostup tekutého média a zároveň byly koule zadrženy. Celková prostupná plocha je 28%. Kanál pro odvod koulí je umístěn uprostřed kužele, má průměr 10 cm a jeho délka je 60 cm. Tento reflektor je u reaktorů chlazenými solemi vyroben z grafitu podobně jako u reaktoru chlazeného heliem.

V rovnovážném stavu lze pozorovat, že vztlková síla je dostatečná pro překonání tření mezi koulemi samotnými a tření mezi koulemi a stěnou nádoby a vynese je 3 až 4 průměry koule nad volnou hladinu. Na PREX bylo pozorováno, že tento vztlak je jen mírně závislý na množství průtoku kapaliny a že postačuje pro dosažení výšky odvodového kanálu. Mechanismus odebírání koulí je opět u reaktorů s tekutými solemi podobný jako u reaktorů chlazenými plynem.

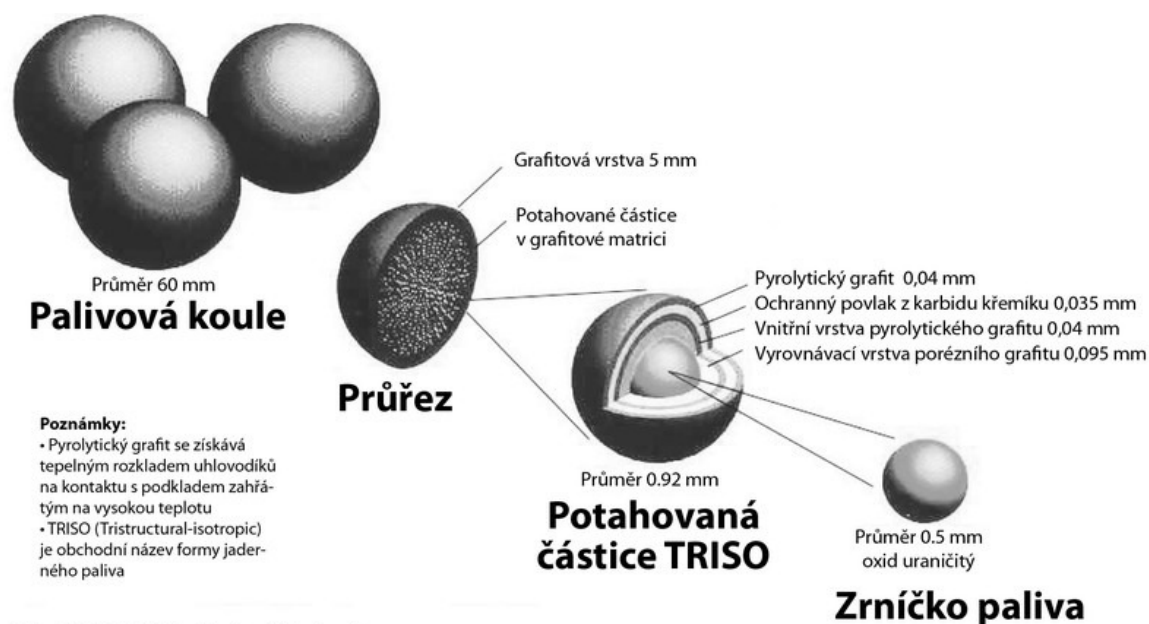
## 4 Fyzikální vlastnosti použitých látek a elementů

Vlastnosti a chování pracovních látek jsou podstatné pro samostatný návrh ať už reaktoru samotného, tak pro návrh modelového zařízení. Je potřeba při návrhu konstrukčního materiálu brát v potaz např. korozivní účinky. Navržený materiál musí odolávat vnitřnímu i vnějšímu zatížení a to většinou i při velmi vysokých teplotách.

### 4.1 Palivové články [11]

Hmotnost klasických 6 cm velikých palivových koulí je v rozmezí od 190 do 205 gramů což odpovídá hustotě v rozmezí 1680 - 1810 kg/m<sup>3</sup>. Rozmezí je dáno obsahem těžkých kovů v grafitových koulích, tudíž může být upraveno v průběhu výroby. To může být porovnáno s hustotou flibe při teplotě 700 °C (1940 kg/m<sup>3</sup>) a při teplotě 1000 °C (1790 kg/m<sup>3</sup>). Je předpokládáno, že struktura uvnitř koulí je homogenní. Každá koule má 5 mm tlustou vnější obálku z grafitu o vysoké hustotě, konkrétně 1900 kg/m<sup>3</sup>. Vztlková síla na palivové koule je vždy pozitivní, i když je sůl teplotně pod provozními podmínkami. Grafit je použit jako stavební materiál a moderátor a zároveň slouží pro přenos tepla do soli. Koule jsou definovány svojí hustotou a velikostí, ale také plnicím faktorem (Packing Factor - PF).

Plnicí faktor je dán podílem objemu částic TRISO ku vnitřnímu objemu koule. Nicméně poškození koulí a jejich vztlková síla by měla být přijatelná po celou dobu jejich životnosti, proto je horní hranice plnicího faktoru na 25%. Tento různý plnicí faktor dává počet TRISO částic v jedné kouli od 8000 do 40000 a tedy rozmezí obsahu těžkých kovů v kouli od 4,9 do 19,6 gramů.



Obrázek 6 Palivové koule

Problémem při prostupu tepla z palivových koulí by mohlo být uvíznutí plynu na jejich povrchu, tedy když tekutá sůl nesmáčí grafitový povrch. Je proto důležité zachovat na těchto elementech dokonale hladký povrch. S tím souvisí i kontrola před opětovným vhněním do reaktoru. Koule proběhnou reaktorem několikrát za dobu své životnosti a na každé je také měřená míra vyhoření. Podle toho je buď koule zlikvidována anebo je znovu vložena do recirkulačního obvodu. V něm se koule shromažďují v horní části (pod děrovaným kuzelem, viz obr. 1) vlivem vztlakové síly. Předpokládáme, že shluk koulí je homogenní. Poměr objemů koulí a chladiva v této oblasti je možné nazvat jakousi uceleností, v angličtině Pebble Bed Compactness (PBC)

## 4.2 Roztavená sůl [9]

Jak již bylo uvedeno, jedná se o sloučeninu dvou látek a to v takovém poměru, aby její teplota tavení byla co nejnižší. Dosahované hranice rozpustnosti solí je v rozmezí 300 - 500 °C. Toto rozmezí platí pouze pro dvousložkové směsi, které oproti jednosložkové soli mají teplotu tavení až o 500 °C nižší. Jednou z alternativ se uvažují sole flibe složené z LiF a BeF<sub>2</sub> a to téměř v poměru 2:1 (66:34). Výsledná fluoridová sůl pak bude mít chemický vzorec <sup>7</sup>Li<sub>2</sub>BeF<sub>4</sub>. Tyto sole musí osahovat pouze izotop lithia sedm (<sup>7</sup>Li), protože izotop lithia šest zachycuje tisíckrát více neutronů než <sup>7</sup>Li, ale tyto neutrony jsou potřeba pro štěpení transuranů. Sůl flibe je transparentní což je vhodné pro optickou kontrolu reaktorových komponent. Tato sůl je využita např. v experimentu PB-AHTR (Pebble Bed - Advanced High Temperature Reactor), tedy v pokrokovém vysokoteplotním reaktoru s palivem ve formě kulových částic jaderného paliva TRISO.

Hustota soli flibe je pro teplotu 700 °C rovna 1940 kg/m<sup>3</sup>. V literatuře je uváděn i vzorec pro výpočet hustoty soli pro danou teplotu. Jeho tvar je  $\rho = 2,413 - 4,88 \cdot 10^{-4} \cdot T$ , kde T



je teplota v Kelvinech a výsledná hustota v jednotkách  $\text{g/cm}^3$ . Tento tvar je použitelný ale pouze v rozmezí teplot 800 - 1080 K. Bod tání této konkrétní sole je na hranici  $459^\circ\text{C}$  a bod varu až při teplotě  $1430^\circ\text{C}$ . Dalším důležitým údajem je viskozita a ta je pro tuto teplotu  $2,9 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ .

### 4.3 Fyzikální vlastnosti kandidujících látek

#### 4.3.1 Glycerin [15],[16]

Je znám též pod názvem glycerol (nezaměňovat s glykolem), je to bezbarvá kapalná látka bez zápachu, jehož teplota tání je  $20^\circ\text{C}$  a při této teplotě má hustotu  $1261 \text{ kg/m}^3$ . Závislost glycerinu na teplotě je lineární a je možné ji popsat rovnicí  $y = 1,2733 - 0,0006x$ , kde  $y$  je hustota v  $\text{g/cm}^3$  a  $x$  je teplota v  $^\circ\text{C}$ . Molární hmotnost je  $92,09 \text{ g/mol}$  a je rozpustný ve vodě. Jeho mísením s vodou je možné dosáhnout různých hustot a viskozit potřebných pro náš model.

#### 4.3.2 Dowtherm A[7],[13]

Tato chemická sloučenina je vyráběna z bifenyly (difenyly) nebo z etylenglykolu. Je to průmyslové teplotnosné medium olejovitého charakteru, které sestává ze dvou látek a to z fenyl-etheru v množství 73,5% a z difenyly ve zbylém množství 26,6%. Jeho nejčastější použití je v nízkotlakých systémech s teplotou do  $288^\circ\text{C}$ . Za atmosférického tlaku je kapalný v rozsahu od 14 do  $257^\circ\text{C}$ . Existuje i řada kongenerů jako např. Dowtherm G, Dowtherm HT nebo Dowtherm 4000, které se však v praxi tolik nevyskytují.

Hlavní teplotnosnou látkou na místo tekuté soli je v experimentech používáno dowthermu A, jelikož použití vody postačuje jen pro hydrodynamické simulace. Pro teplotní rozmezí 600 -  $850^\circ\text{C}$  sole flibe je teplotní rozmezí dowthermu od  $63^\circ\text{C}$  do  $191^\circ\text{C}$ . Hustota Dowthermu A je  $1056 \text{ kg/m}^3$  při teplotě  $25^\circ\text{C}$ .

## 5 Tlakové ztráty [14]

Při proudění tekutiny v jakémkoliv prostředí dochází k poklesu tlaku a ke snižování rychlosti proudu. Je to způsobeno jednak odporem prostředí, které se vůči proudící tekutině nepohybuje a jednak vlastním třením v tekutině. V obou případech dochází ke ztrátě kinetické energie a přeměně na tepelnou energii. Tento proces je nazýván disipace. Tlakové ztráty je ještě možné rozdělit na místní ztráty a ztráty třením.

### 5.1 Místní tlakové ztráty

Místní tlakové ztráty jsou většinou způsobené nějakou překážkou v proudu, vlivem které dochází ke změně směru toku nebo zmenšení průřezu průtoku. Tímto vzniká neustálené proudění, ve kterém je mnoho vírů, jejichž energie disipuje. Zdrojem těchto ztrát jsou např. kolena, ventily, redukce, rozšíření, zpětné klapky, filtrační zařízení nebo větvení proudu. Ztráty v těchto oblastech závisí na rychlosti proudu a jejich ztrátové součinitele jsou měřeny v

laboratořích. Dnes již existuje řada grafů a tabulek se ztrátovými součiniteli pro nejběžnější zdroje místních ztrát.

### 5.1.1 Tlaková ztráta rozšířením

Některá literatura uvádí pro náhlé rozšíření proudu tabulkové součinitele. Je však možné tuto ztrátu popsat pomocí několika základních zákonů a vět hydromechaniky. Postupným odvozením a zjednodušením se přijde k tvaru  $\Delta p = \rho \frac{w_1^2}{2} \left(1 - \frac{s_1}{s_2}\right)^2$ . Veličiny s indexem 1 popisují stav před rozšířením, tedy  $w_1$  je rychlost proudu v užším místě.

## 5.2 Ztráty třením

Tyto ztráty se určují na dlouhých přímých potrubních úsecích. Jsou závislé především na délce potrubí, na kterém jsou přímo závislé a nepřímo závislé jsou na průřezu potrubí. S tím souvisí i typ proudění. Může být laminární nebo turbulentní. To je určováno pomocí Reynoldsova čísla, které je  $Re = \frac{w \cdot d}{\nu}$ . Průměr potrubí je označen písmenem  $d$ ,  $w$  je rychlost proudění a  $\nu$  určuje kinematickou viskozitu. Reynoldsovo číslo je bezrozměrné. Pro laminární potrubí se  $Re$  pohybuje do 2300. Turbulentní proudění je tedy pro  $Re > 2300$ . Pro zaručené turbulentní proudění ale  $Re$  musí být větší, než  $10^5$ . Je jasné, že mezi laminárním a turbulentním prouděním je přechodová oblast nazývaný intermitentní a platí pro ni  $2300 < Re < 10^5$ . Drsnost stěny potrubí je také faktor ovlivňující tlakovou ztrátu a to především pro turbulentní proudění. Laminární proudění je na drsnosti stěny téměř nezávislé.

Je-li proudění laminární, ztrátový součinitel je definován tímto vztahem  $\xi_T = \lambda \frac{L}{D}$ . Součinitel tření  $\lambda$  je pro ustálené laminární proudění závislé pouze na  $Re$  a platí  $\lambda = \frac{64}{Re}$ . Podle Bernouliho rovnice je tlaková ztráta rovného úseku potrubí vyjádřena  $\Delta p = \xi_T \rho \frac{w^2}{2} = \lambda \frac{L}{D} \rho \frac{w^2}{2}$

Pro turbulentní proudění se mění tvar součinitele tření. Ten byl na základě měření stanoven německým vědcem Blasiusem,  $\lambda = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re}}$ . V tomto tvaru součinitel tření vyhovuje vyvinutému turbulentnímu proudění v hydraulicky hladké trubce, ale jen pro  $Re = 2300$  až  $10^4$ . Existují další vzorce pro vyšší  $Re$  nebo pro hydraulicky drsné potrubí, které ale pro náš experiment nebudou potřeba.

## 5.3 Odpor koule v prostředí [8]

Na těleso ležící v proudu tekutiny působí tlak, který odpovídá hydrostatickému tlaku a rychlosti obtékání tělesa. Není-li tekutina ideální, působí na těleso i vliv kapalinového tření. Obecně obě složky odporu závisí na umístění tělesa v proudu, jedná-li se např. o desku. Při orientaci desky ve směru proudu je tlaková síla minimální a více se uplatňuje síla vyvozená třením. Celková síla od proudu působící na těleso je dána součtem smykových napětí (tření) a tlakových sil.

Pro malé rychlosti proudění, tj. pro  $Re \approx 1$ , platí podle Stokesse vztah

$$\frac{F}{\frac{1}{2}\rho v^2 \frac{\pi}{4} d^2} = \frac{24}{v}$$

a tedy

$$F = 3\pi\nu\rho v d$$

Oseen rozšířil tuto rovnici o korekci pro vyšší rychlosti proudění, pak

$$F = 3\pi\nu\rho v d \left(1 + \frac{3}{16} Re\right)$$

dosazením tíhové síly působící na kuličku za sílu  $F$ , dostaneme

$$\frac{4}{3}\pi\left(\frac{d}{2}\right)^3 (\rho_k - \rho)g = 3\pi\nu\rho v_s d \left(1 + \frac{3}{16} Re\right)$$

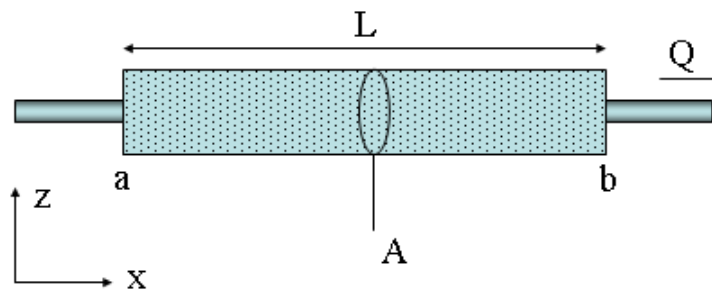
$$v_s = \frac{d^2 g \left(\frac{\rho_k}{\rho} - 1\right)}{18\nu \left(1 + \frac{3}{16} Re\right)} = \frac{d^2 g \left(\frac{\rho_k}{\rho} - 1\right)}{18\nu + \frac{27}{8} \nu D}$$

Rychlost  $v_s$  je označována jako rychlost vznášivá, tedy rychlost pohybu kuličky. Při rovnosti vznášivé rychlosti a rychlosti proudu dojde k vznášení koule v proudu ( $v_s = v$ ). Předpokladem je pohyb proudu směrem vzhůru a hustota koule  $\rho_k$  musí být větší než hustota tekutiny  $\rho$ . Koule je popsána průměrem  $d$ ,  $g$  je gravitační zrychlení,  $\nu$  udává kinematickou viskozitu tekutiny a  $D$  je průměr kanálu pro výpočet  $Re$ .

## 5.4 Tlakové ztráty průchodem pórovitou oblastí

### 5.4.1 Darcy [1],[2]

Jedním ze vztahů pro výpočet tlakových ztrát při průtoku porézní oblastí je uváděn Darcyho zákon, který byl formulován již v roce 1856. Vzorec byl nejprve publikován na základě experimentů, kde se měřily průtokové ztráty vody protékající přes nádobu naplněnou pískem. Později však byl tento vztah odvozen také z Navier-Stokesovy rovnice za předpokladů homogenizace prostředí. Darcyho zákon má využití především v hydrogeologii, ale tohoto zákona je také využíváno k popisu proudění oleje, vody nebo plynu přes ropné nádrže.



Obrázek 7

Darcyho vztah pro určení průtočného objemu  $\dot{Q}$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] při konstantní výšce  $v$  sobě zahrnuje tlakovou ztrátu  $\Delta p$  [ $\text{Pa}$ ] na dané vzdálenosti  $L$  [ $\text{m}$ ], propustnost média  $k$  [ $\text{m}^2$ ], průřez kanálu  $A$  [ $\text{m}^2$ ] a dynamickou viskozitu proudícího média  $\eta$  [ $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ]. Tento vztah má tedy podobu

$$\dot{Q} = \frac{-k \cdot A}{\eta} \frac{(p_b - p_a)}{L}$$

Znaménko mínus u propustnosti média je z toho důvodu, že tlak v místě **a** je vyšší než v místě **b**, a tedy jejich rozdíl je též záporný. Dostáváme kladný výsledek, což značí průtok ve směru osy  $x$ .

Darcyho zákon platí pro stacionární proudění, proto je uváděn jen v závislosti na délce  $x$ , nikoliv na čase  $t$ .

Kdybychom z předchozího vztahu chtěli vypočítat tlakovou ztrátu, vzorec by vypadal následovně.

$$p_b - p_a = \Delta p = \frac{L \cdot \dot{Q} \cdot \eta}{-k \cdot A}$$

Jedinou neznámou je pro nás propustnost  $k$  [ $\text{m}^2$ ], kterou je však možné spočítat hned dvěma způsoby a to buď vztahem, který určil Kožený-Carman a má podobu

$$k = \frac{\epsilon^3}{36c(1 - \epsilon)^2} d^2$$

$\epsilon$  - pórovitost [-] (viz. kapitola Uspořádání koulí)

$d$  - průměr elementu [ $\text{m}$ ]

$c$  - Kožený-Carman konstanta (pro kulovité elementy  $c = 5$ )

a nebo podle vzorce s hydraulickou vodivostí

$$k = K \frac{\eta}{\rho \cdot g} = \frac{Kv}{g}$$

$K$  - hydraulická vodivost [m/s]

$\eta$  - dynamická viskozita [Pa.s]

$v$  - kinematická viskozita [m<sup>2</sup>/s]

$\rho$  - hustota [kg/m<sup>3</sup>]

$g$  - gravitační zrychlení [m/s<sup>2</sup>]

Samotná propustnost je většinou určována v laboratořích za ustálených podmínek nebo použitím různých řešení pro difúzní rovnice pro nestacionární proudění. Propustnost je třeba měřit buď přímo podle Darcyho zákona, nebo pomocí odhadu za pomoci empiricky odvozených vzorců. Je ale možné hydraulickou vodivost určit podle vzorce a propustnost následně vypočítat.

Vzhledem k tomu, že těmito rovnicemi se nejčastěji posuzuje průchodnost vody půdou, určení samotné hydraulické vodivosti je často zdlouhavé a náročné. Existuje několik metod, které se liší přesností a také použitelností. Pro náš případ postačí tzv. laboratorní metoda s konstantním tlakem kapaliny. Vychází se z rovnice objemového průtoku

$$\frac{V}{t} = \dot{Q} = Av$$

z Darcyho zákona máme rovnici pro rychlost proudění sestávající ze součinu hydraulické vodivosti a jednoduchého simplexu zvaný hydraulický gradient. Ten je dán podílem hydraulické výšky  $h$  a výšky pórovité oblasti  $L$

$$v = Ki \qquad i = \frac{h}{L}$$

Dosadíme do rovnice objemového průtoku a vyjádříme požadovanou hydraulickou vodivost.

$$K = \frac{\dot{Q}L}{Ah}$$

Dosažením do předchozí Darcyho rovnice se nám tvar zjednoduší na obyčejnou rovnici

$$\Delta p = -\rho gh$$

### 5.4.2 Ergun [3]

Další často uváděnou možností, jak spočítat tlakovou ztrátu průchodem kapaliny pórovitou oblastí je použití Ergunovy rovnice. Na levé straně této rovnice je koeficient tření, který je nepřímou závislostí na Reynoldsově čísle. Základní vztah tedy je

$$f_p = \frac{150}{Re_p} + 1,75$$

příčemž  $f_p$  a  $Re_p$  jsou definovány takto

$$f_p = \frac{\Delta p}{L} \frac{D_p}{\rho V_s^2} \left( \frac{\epsilon^3}{1-\epsilon} \right)_a \quad Re_p = \frac{D_p V_s \rho}{(1-\epsilon)\eta}$$

L - délka pórovité oblasti [m]

$V_s$  - povrchní rychlost [m/s] (rychlost kapaliny v prázdné trubce při stejném objemovém průtoku)

$D_p$  - ekvivalentní průměr pórovité oblasti [m]

$\epsilon$  - pórovitost [-]

(Pro lepší představu o tvaru pórovité oblasti ji uvažujeme v prostoru válce)

Dosažením do původní rovnice dostaneme rovnici ve tvaru

$$\frac{\Delta p}{L} \frac{D_p}{\rho V_s^2} \left( \frac{\epsilon^3}{1-\epsilon} \right) = \frac{150\eta(1-\epsilon)}{D_p V_s \rho} + 1,75$$

a z ní pak úpravou dostaneme tlakový spád

$$\Delta p = \frac{150\eta V_s L (1-\epsilon)^2}{D_p^2 \epsilon^3} + \frac{1,75 V_s^2 \rho L (1-\epsilon)}{D_p \epsilon^3}$$

### 5.4.3 Kožený-Carman [6]

Asi nejznámější metodou, jak spočítat tlakové ztráty průchodem pórovitou oblastí je podle rovnice Kožený - Carman. První, kdo tuto rovnici sestavil byl Kožený, později tuto rovnici doplnil Carman. Výsledný tvar je tedy

$$\Delta p = \frac{180 V_s \eta L (1-\epsilon^2)}{\Phi_s^2 D_p^2 \epsilon^3}$$

Rovnice obsahuje většinou stejné proměnné jako v předchozích případech až na  $\Phi$  což je faktor určující kulatost. Pro kulová tělesa je tedy  $\Phi = 1$ . Obecně jsou všechny tyto rovnice platné pouze pro laminární proudění.

#### 5.4.4 Kugeler a Schulten [9],[10]

Další z nejpoužívanějších vzorců používaných pro výpočet tlakové ztráty v reaktorech využívající palivo ve formě koulí byl definován dvěma německými fyziky Kurtem Kugelerem a Rudolfem Schultenem.

$$\Delta p = \psi \frac{1 - \epsilon}{\epsilon^3} \frac{H}{d_p} \frac{1}{2\rho} \left( \frac{\dot{m}}{A} \right)^2$$

kde

$$\psi = \frac{320}{\frac{Re}{1-\epsilon}} + \frac{6}{\left( \frac{Re}{1-\epsilon} \right)^{0,1}}$$

a  $Re$  je definováno

$$Re = \frac{\dot{m} d_p}{A}$$

$\dot{m}$  - hmotnostní průtok [kg/s]

$A$  - celková průtočná plocha reaktorem [m<sup>2</sup>]

$H$  - délka kulového lože [m]

$d_p$  - průměr koulí [m]

Tento definovaný vzorec je možný použít pro  $1 < \frac{Re}{1-\epsilon} < 10^5$  a pro pórovitost v rozsahu  $0,36 < \epsilon < 0,42$ . Uvedený hmotnostní průtok je možné také stanovit z rovnice

$$\dot{m} = \rho v A \quad \text{nebo z výrazu} \quad \dot{m} = \frac{P}{c_p \Delta T}$$

$v$  - rychlost proudění [m/s]

$c_p$  - měrná tepelná kapacita [kJ/kg.K]

$\Delta T$  - teplotní rozdíl chladiva při průtoku zóny [K]

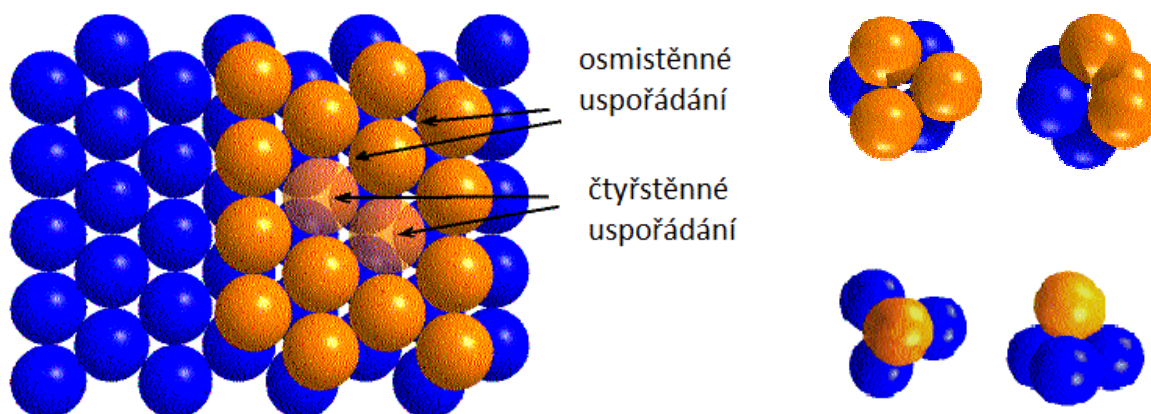
## 6 Uspořádání koulí[4],[18]

### 6.1 Pórovitost

V předchozích vztazích se vyskytovala proměnná označovaná řeckým písmenem  $\epsilon$  a nazývala se pórovitost. Je to bezrozměrná veličina vyjadřující objemový podíl volného prostoru v materiálu. Jeho hodnota se pohybuje od 0 do 1, přičemž hodnota 0 znamená, že

prostor je zcela vyplněn celistvým materiálem bez pórů. Nebo v procentuálním vyjádření je pórovitost v rozmezí 0-100%. Pórovitost může být úměrná hydraulické vodivosti.

Pro řešení pórovitosti oblasti naplněné kulovými elementy přichází do úvahy další faktor a tím je nahodilé uzavřené plnění (anglicky RandomClosePacking - RCP). Je to empirický parametr používaný pro stanovení podílu pevných částic v celkovém prostoru. Byly prováděny experimenty s kulovými částicemi a bylo zjištěno, že dosažitelné maximální plnění je necelých 64% což je podstatně méně než teoretická hodnota plnění 74,048 %, které je dosaženo při hexagonálním uspořádání. To jen dokazuje, že faktor RCP je nezbytný pro přesnější definování objemového podílu částic a tím i pórovitosti. Tyto hodnoty jsou pro kulovité elementy zaneseny do následující tabulky



Obrázek 8 Uspořádání koulí

Model	popis	pórovitost	plnicí hustota
nejtější pravidelné uspořádání	koordinační číslo* = 6	0,4764	0,5236
velmi volné nahodilé uspořádání	Koule se volně, pomalu usadí	0,44	0,56
volné nahodilé uspořádání	Koule spadnou nebo jsou ručně uspořádány	0,40 - 0,41	0,59 - 0,60
náhodné uspořádání	např. při "vylití" koulí	0,375 - 0,391	0,609 - 0,625
Uzavřené náhodné uspořádání	dosaženo při vibraci	0,359 - 0,375	0,625 - 0,641
Nejtěsnější pravidelné uspořádání	koordinační číslo* = 12	0,2595	0,7405

\* koordinační číslo vyjadřuje počet sousedících koulí

Tabulka 4 Uspořádání koulí



Jak již bylo naznačeno, palivové koule jsou unášeny roztavenou solí do nádoby, většího kruhového průřezu. Koule jsou vzhledem k nižší hustotě, než jakou má roztavená sůl, nadnášeny vztlakovou silou. Koule jsou zachytávány v horní oblasti nádoby pod děrovaným kuželem. Uspořádání koulí v tomto shluku není možné ovlivnit, proto se koule samy nahodile rozmísťují a tímto uspořádáním dosahují koule teoretického maximálního plnicího poměru 74.05 % resp. 60 % což odpovídá modelu s volným nahodilým uspořádáním koulí. Tento podíl určuje objem palivových koulí v celkovém zaplněném prostoru. Zbytek, tedy 25.95 % resp. 40 % zaujímá roztavená sůl. Další možností, jak zvýšit maximální plnicí poměr by bylo použití koulí o různých velikostech. Tato možnost však není v jaderných reaktorech využívána, protože by to přineslo řadu komplikací jako např. náročnější výrobu palivových koulí nebo problém s recirkulací paliva. Při uspořádání všech koulí do čtyřstěnné matice a vložení menší koule do prostředí by vzrostl teoretický maximální plnicí poměr o necelé procento na hodnotu 74.77 %. Další možností je osmistěnné uspořádání koulí s menší koulí uprostřed, přičemž maximální plnicí poměr by byl 84.53 %. Dalšího navýšení poměru objemu koulí ku objemu roztavené soli by nastalo při čtyřstěnném a osmistěnném uspořádání zároveň. Pak by tento poměr byl roven 85.29 %.

použité uspořádání	poloměr vložené koule	zaplněný objem koulemi	celkový zaplněný objem	maximální plnicí poměr	maximální nárůst
žádné	-	16,76 R <sup>3</sup>	22,63 R <sup>3</sup>	74,05%	-
čtyřstěnné	0,215 R	16,92 R <sup>3</sup>	22,63 R <sup>3</sup>	74,77%	1%
osmistěnné	0,414 R	19,13 R <sup>3</sup>	22,63 R <sup>3</sup>	84.53 %	14%
čtyř. a osmi.	-	19,30 R <sup>3</sup>	22,63 R <sup>3</sup>	85,29%	15%

Tabulka 5 Možnost zvýšení plnění

S další možností, jak spočítat pórovitost, přišli Kugeler a Schulten roku 1989. Jejich vztah má tvar  $\epsilon = 0,375 + 0,34 \frac{d_p}{D}$ ,  $d_p$  je průměr kulových článků a  $D$  je průměr zóny. Plnicí hustota (Packing Factor) se pak určí jednoduchým vztahem  $PF = 1 - \epsilon$ . Podíl hmoty kulových článků v prostoru vzrůstá při použití kulových článků o různé velikosti.

## 7 Teorie podobnosti [8]

Před samotným konstruováním technických zařízení je potřeba propočítat jejich vlastnosti požadované provozem. To je např. pevnost konstrukce, odvod tepla, míra opotřebení a s tím související spolehlivost. Ne všechny tyto vlastnosti a děje je možné matematicky popsat a určit, proto se vytvoří zmenšený, nebo podle potřeby zvětšený fyzikální model. Jelikož solný reaktor je velkým dílem, jeho postavení by bylo zdlouhavé a nákladné. Pro účely měření a experimentů je jeho výstavba naprosto zbytečná, proto se vytvoří pouze model a to jen té oblasti, o kterou se zajímáme. Model je rozměrově podobné dílo v určitém poměru vůči výchozímu dílu. Teorie podobnosti zavádí kritéria podobnosti, což jsou bezrozměrové zlomky se-

skupující většinou fyzikální, geometrické a kinematické veličiny a tyto zlomky mají hlubší fyzikální význam. Mezi jednotlivými kritérii popisovaného procesu existuje závislost, takže je možné z nich sestavit kritériální rovnice a s nimi dále pracovat. Kritéria podobnosti slouží k popisu chování jak díla, tak modelu. Tyto rovnice v sobě zahrnují několik různých veličin, které by se museli jednotlivě měřit a to např. při různých teplotách pracovní látky nebo při různých rychlostech proudění a odlišné viskozitě. S využitím kritérií podobnosti stačí měnit pouze jednu veličinu, čímž se měření značně zkrátí a podobnostní kritéria se pak přenesou z modelu na dílo.

Pro sestavení kritériálních rovnic jsou v našem případě rozhodujícími veličinami: střední rychlost proudění, délka (příp. průměr) sledované oblasti, drsnost stěn a elementů, hustota a kinematická viskozita tekutiny a pak také tlakový spád. Pomocí dimenzionální analýzy je možné sestavit rovnice, které jsou vhodné pro popis proudění. Vypsání veličiny označíme neznámými a vypíšeme k nim jednotky

$$K = (\bar{w})^{a_1}; (l)^{a_2}; (\rho)^{a_3}; (v)^{a_4}; (\Delta p)^{a_5}$$

$$[1] = [m \cdot s^{-1}]^{a_1}; [m]^{a_2}; [kg \cdot m^{-3}]^{a_3}; [m^2 s^{-1}]^{a_4}; [kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}]^{a_5}$$

z neznámých proměnných sestavíme pro každou jednotku vlastní rovnici

$$m: \quad a_1 + a_2 + 2a_4 - a_5 = 0$$

$$s: \quad -a_1 - a_4 - 2a_5 = 0$$

$$kg: \quad a_3 + a_5 = 0$$

z rovnice  $x = n - k$ , kde  $n$  je počet veličin mající pro daný případ vliv,  $k$  je počet základních jednotek, učíme počet kritérií, které si mohou zvolit. Volbou  $a_1 = 1$ ;  $a_5 = 0$  dopočítáme zbylé neznámé a z výše uvedených rovnic dostaneme  $a_2 = 1$ ;  $a_3 = 0$ ;  $a_4 = 0$ . Získáme rovnici známou jako Reynoldsovo číslo  $Re = \frac{\bar{w}l}{\nu}$ . Obdobně volbou  $a_1 = -2$ ;  $a_5 = 1$  získáme Eulerovo číslo

$$Eu = \frac{\Delta p}{\rho w^2}$$

## 8 Grafický návrh experimentálního zařízení

Cílem experimentálního zařízení je stanovit tlakové ztráty průchodem oblastí vyplněné kuličkami a ověřit platnost výše uvedených vzorců pro výpočet rozdílů tlaků. Zařízení vychází z již fungujícího experimentu PREX, který byl navržen pro ověření možnosti vyměňovat koule v průběhu štěpné reakce. To znamená vkládat koule do systému, ve kterém stále proudí

tekutina a zase je z reaktorové nádoby odebírat. Díky vlastnostem tekutých solí je možné systém provozovat za normálního tlaku a to i při teplotách dosahujících okolo 1000 °C. Pro zkoumání tlakové ztráty postačuje experiment při běžné teplotě (20 °C) na rozdíl od experimentů zaměřených na přestup tepla. Ty využívají např. Dowthermu, který při zachování podobnosti s vlastním dílem, tedy jaderným reaktorem, postačuje pro simulaci tepelných procesů v teplotním rozsahu 63 - 191 °C.

Samotný návrh sestává z válcové nádoby o vnitřním průměru 1 metr a výšce 2 metry. Průměr nádoby odpovídá zhruba 6 krát zmenšené nádobě jaderného reaktoru PB-AHTR integrálního typu. Toto měřítko bylo zvoleno na základě velikosti originálních palivových koulí v tomto typu reaktoru, které mají průměr 6 cm. Tedy předpokládaná velikost koulí pro experiment je 1 cm. Teprve při zachování poměru velikostí koulí a velikostí oblasti vyplněné koulemi, budou naměřené výsledky odpovídat řešené oblasti v reaktoru. To znamená, že kdyby bylo v experimentu použito koulí o původním průměru 6 cm, naměřená tlaková ztráta by nebyla v podobnosti s tlakovou ztrátou v reaktoru.

V této nádobě je umístěn děrovaný kužel, který drží koule v proudu tekutiny. V kuželu jsou otvory o průměru 7 mm rozmístěny po celém obvodu. Celková průtočná plocha těchto otvorů je téměř 0,06 m<sup>2</sup>, což je více jak trojnásobek průtočné plochy napájecího potrubí. Vrcholový úhel kuželu je navržen po vzoru již zmíněného experimentu a činí 90°. Průměr kanálu pro odvod koulí je 8 cm. Délka tohoto kanálu není přesně definovaná, je však možné ji upravit pro zvolené množství tekutiny v nádobě. Ještě lepším řešením tohoto návrhu by bylo tuto délku udělat flexibilní. Délku by bylo možné přizpůsobit podle stávající hladiny tekutiny a také podle toho, zda v danou chvíli budu chtít koule z nádoby odebírat, či nikoliv. Řešením by bylo tento kanál udělat dvouplášťový s možností vnější plášť posouvat podle potřebné výšky. V PREX experimentu bylo zjištěno, že koule svojí vztlakovou silou překonávají tření mezi sebou a mezi stěnou pláště a jsou vytlačovány 3 až 4 průměry koule nad volnou hladinu. Bylo také zjištěno, že proudící tekutina má jen minimální vliv na celkovou vztlakovou sílu koulí. Celý tento kužel je vycentrovaný uprostřed válce pomocí mříže.

Nad prostorem kuželu je vývodní potrubí o průměru 150 mm, na kterém je umístěno cirkulační čerpadlo. To by mělo pro experiment poskytovat průtočné množství alespoň 15 m<sup>3</sup>/hod. Nejlepší volbou by bylo čerpadlo elektronicky řízené s nastavitelným výkonem. Ve výkresu je čerpadlo znázorněno jen schematicky. Zvolený typ čerpadla pro konstrukci se může lišit jak roztečí, tak i průměrem přípojného potrubí. Čerpadlo vhání tekutinu potrubím do spodní části válcové nádoby.

K hlavnímu potrubí s cirkulačním čerpadlem je připojeno potrubí o vnitřním průměru 32 mm. To je určeno pro vhánění nových koulí do systému. Potrubí vede k horní části válce, kde je vytvořen systém pro vkládání koulí. Pro celý vhánějící systém je na válci vytvořena kapsa se dnem o sklonu do prostoru válce. Princip je založený na otáčejícím se bubnu s osou rotace umístěnou v rovině volné hladiny. Buben má po obvodu otvory skrz, které se při natočení stávají součástí podávacího potrubí.



Horní část bubnu je nad hladinou, což umožní samovolné vložení koule např. ze zásobníku do průběžného otvoru. Buben je rotačně uložen v jakémsi plášti, který při pootočení vnitřní části zabraňuje vypadnutí koule. Jakmile se koule dostane do prostoru potrubí, je stržena proudem a unášena do hlavního potrubí. Pohon krmného bubnu může být ruční, nebo jej může zajišťovat elektrický motor. Rychlost proudu potřebná pro dopravení kuličky o průměru 1 cm, hustoty  $930 \text{ kg/m}^3$  v tekutině o hustotě  $1060 \text{ kg/m}^3$  a kinematické viskozitě  $1,49 \cdot 10^{-6}$  je ve svislém směru podle výše uvedených vzorců  $0,034 \text{ m/s}$ . Jestliže této rychlosti nebude v navrženém bypassu dosaženo, bude nutné umístit před systém vkládající koule pomocné čerpadlo o nižším výkonu.

Obrázek 9 Grafický návrh zařízení

Pro částečnou automatizaci vkládání koulí do rotačního bubnu, může být nad tímto umístěna násypka resp. zásobník, viz. příložený obrázek.

Konstrukční materiál může být jako v případě PREX zvolen průhledný pro lepší představu o procesu a výšce lože z koulí uvnitř válce.

## 8.1 Měření tlakových ztrát

Nejprve je nutné provést přibližný výpočet tlakové ztráty pro navržený výkon čerpadla. Samotné měření na experimentu je opět možné udělat několika způsoby. Prvním způsobem je měření pomocí manometrů, což je dost nepřesné zvláště v případě malých tlakových diferencí. Další možností je vytvořit soustavu spojených nádob. Tento způsob je využit i v PREX. Jedná se o trubice umístěné vedle sebe, jejichž spodní část je připojena flexibilní hadicí k válci. Připojení jednotlivých trubic je rozmístěno po celé výšce válce. Na trubicích se odečítá výška volné hladiny a tím se zjistí tlak v připojeném místě. Nebylo by od věci experiment vybavit např. indukčním průtokoměrem, který pracuje bez jakýchkoliv pohyblivých částí a to i pro světlosti potrubí DN 200. Získané průtočné množství poslouží ke snazšímu

zpracování výsledků. Instalace průtokoměru by byla zbytečná, kdyby hlavní cirkulační čerpadlo bylo vybaveno vlastním nastavením průtokového objemu. Pak by průtokoměr sloužil pouze pro kontrolu.

## 8.2 Numerické řešení

Po samotném návrhu zařízení máme k dispozici veškerá data potřebná pro číselné určení tlakových ztrát a podobností podle již zmíněných vzorců.

### 8.2.1 Podobnost

Navrhovaný systém je podobný s modulárním typem reaktoru PB-AHTR alespoň co se týče průtočného množství. Při sestavování podobnosti s integrálním typem byla vypočtena rychlost proudění až 3,2 m/s pro zvolený průměr potrubí 150 mm. Pro normální rychlosti by průměr potrubí musel být 1 metr, což by bylo z hlediska čerpání tekutiny těžko proveditelné. Platí tedy analogie s modulárním typem. Objemový průtok experimentálního zařízení 16 m<sup>3</sup>/hod je snadno dosažitelný. Reynoldsova čísla lze považovat za shodná.

	modulární typ	experiment
objemový průtok [m <sup>3</sup> /hod]	6736	16
hmotnostní průtok [kg/s]	3630	4,72
průměr potrubí [m]	0,198	0,15
rychlost proudu [m/s]	0,38	0,2515
hustota tekutiny [kg/m <sup>3</sup> ]	1940	1062
hustota koulí [kg/m <sup>3</sup> ]	1740	930
viskozita tekutiny [m <sup>2</sup> /s]	0,0000029	0,00000149
Reynoldsovo číslo	25945	25319

Tabulka 6 Srovnání Modulárního typu reaktoru a experimentu

### 8.2.2 Tlakové ztráty

Při obecném dosazení veškerých potřebných údajů (jako např. propustnost) do Darcyho tvaru pro tlakové ztráty se veškeré údaje popisující vlastnosti kuličkového lože vykrátily a tudíž Darcyho zákon vyjadřuje tlakový rozdíl pouze od rozdílu výšek hladin. Tento vztah je použitelný spíše pro řešení tlakové ztráty průchodem zeminy.

Číselné hodnoty pro výpočty tlakových ztrát jsou:

$$\eta = 0,0021 \text{ [Pa.s]}$$

$$V_s = 0,2515 \text{ [m/s]}$$

$$L \doteq 1 \text{ [m]}$$

$$\epsilon = 0,4$$

$$S_p \doteq 10 \% S = 0,07854 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$D_p = \sqrt{\frac{S_p}{\pi}} \cdot 2 = 0,3162 \text{ [m]}$$

$$d_p = 0,01 \text{ [m]}$$

$$\dot{m} = 4,72 \text{ [kg/s]}$$

$$A = \pi D^2/4 = 0,7854 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$\rho = 1062 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$\phi = 1$$

Darcy:

$$\Delta p = -\rho g h = -1062 \cdot 9,81 \cdot 1$$

$$\Delta p_D = -10418,22 \text{ [Pa]}$$

Ergun:

$$\Delta p = \frac{150\eta V_s L(1-\epsilon)^2}{D_p^2 \epsilon^3} + \frac{1,75 V_s^2 \rho L(1-\epsilon)}{D_p \epsilon^3}$$

dosazením dostaneme

$$\Delta p = \frac{150 \cdot 0,0021 \cdot 0,2515 \cdot 1(1-0,4)^2}{0,01^2 \cdot 0,4^3} + \frac{1,75 \cdot 0,2515^2 \cdot 1062 \cdot 1(1-0,4)}{0,01 \cdot 0,4^3}$$

$$\Delta p = 4456,3 + 110207,2$$

$$\Delta p_E = 114663,4 \text{ [Pa]}$$

Carman - Kožený:

$$\Delta p = \frac{180 V_s \eta L (1-\epsilon^2)}{\Phi_s^2 D_p^2 \epsilon^3}$$

$$\Delta p = \frac{180 \cdot 0,2515 \cdot 0,0021 \cdot 1(1-0,4^2)}{1^2 \cdot 0,01^2} \frac{1}{0,4^3}$$

$$\Delta p_{CK} = 12477,54 \text{ [Pa]}$$

Kugeler a Schulten:

$$\Delta p = \psi \frac{1 - \epsilon}{\epsilon^3} \frac{H}{d_p} \frac{1}{2\rho} \left( \frac{\dot{m}}{A} \right)^2$$

nejprve spočteme hodnotu  $\psi$ ,  $Re$ 

$$Re = \frac{\dot{m} d_p}{A} = \frac{4,72 * 0,01}{0,7854} = 0,06$$

$$\psi = \frac{320}{\frac{Re}{1-\epsilon}} + \frac{6}{\left( \frac{Re}{1-\epsilon} \right)^{0,1}}$$

$$\psi = \frac{320}{\frac{0,06}{1-0,4}} + \frac{6}{\left( \frac{0,06}{1-0,4} \right)^{0,1}} = 3202,4$$

$$\Delta p = 3202,4 * \frac{1 - 0,4}{0,4^3} * \frac{1}{0,01} * \frac{1}{2 * 1062} \left( \frac{4,72}{0,7854} \right)^2$$

$$\underline{\Delta p = 51049,86 [Pa]}$$

Pro návrh cirkulačního čerpadla budeme vycházet z nejvyšší vypočtené hodnoty. Některá čerpadla však při objemovém průtoku  $16\text{m}^3/\text{hod}$  poskytují tlak 0,3 - 0,4 bar, takže toto kritérium pro nás nebude limitující.



Graf 1

Tlakové ztráty byly pro každou metodu vypočteny v závislosti na pórovitosti. Hodnoty byly zaneseny do grafu a bylo zjištěno, že největších rozdílů mezi jednotlivými výpočtovými metodami je dosahováno při nejtěsnějším pravidelném uspořádání koulí o stejné velikosti, tedy pro pórovitost  $\epsilon = 0,25$ . Při volném pravidelném uspořádání koulí ve válci nebyly hodnoty tolik rozdílné.

## 9 Závěr

Cílem této práce bylo navrhnout experimentální zařízení pro měření průtokových ztrát průchodem kapaliny mezi kulovými elementy. Bylo vypracován přehled současných zařízení pracujících s kulovými elementy a zařízení, které již zkoumají např. způsob vkládání elementů do proudícího média.

Dalším úkolem bylo vypracování podobnostní teorie mezi jadernými reaktory a experimentálním zařízením. Vzhledem k rozmanitosti používaných typů reaktorů není možné připodobnit experiment ke všem typům a vytvořit tak univerzální model. Numerickými výpočty byla prokázána neshoda uváděných vzorců v literatuře pro výpočet tlakových ztrát. Z tohoto důvodu také nemohlo být uvedeno eulerovo podobnostní číslo. Pro samotný návrh skutečného díla je třeba brát v úvahu fakt, že u malých těles se tření v proudě uplatňuje více než u velkých těles.

Na základě této práce by mělo být zkonstruováno zařízení, na kterém bude možné měřit tlakové ztráty při průchodu tekutiny mezi kulovými elementy a ověřit tak správnost uváděných vzorců pro její výpočet.



## Citovaná literatura

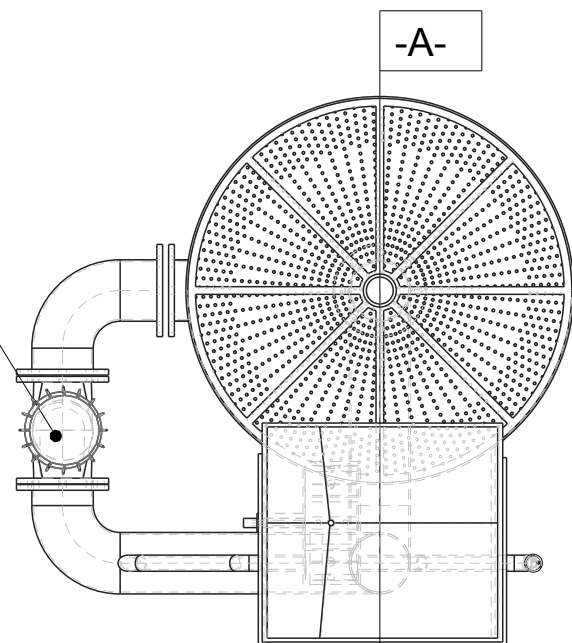
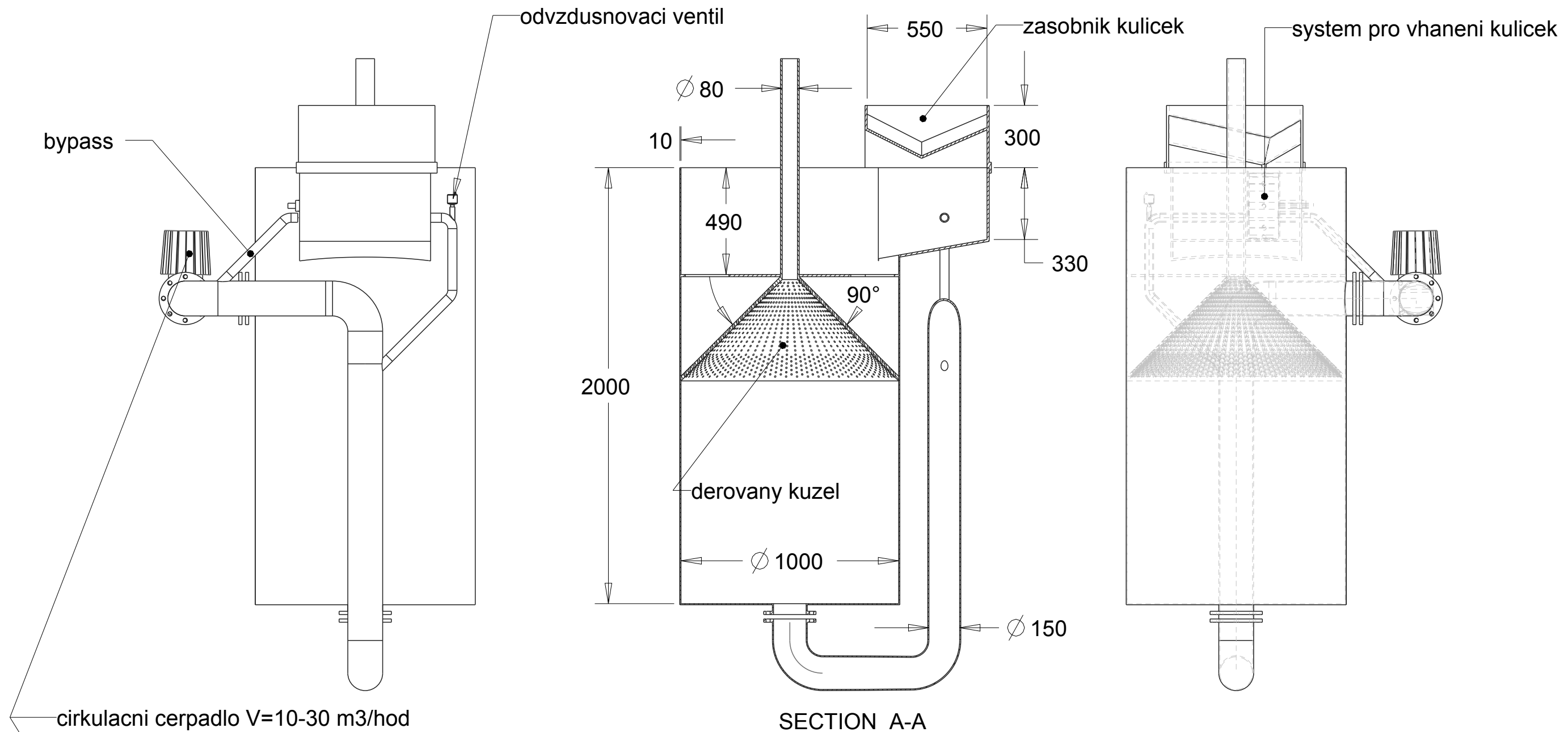
- [1] Hydraulic conductivity. *Wikipedia*. [Online] [Cited: duben 17, 2014.] [http://en.wikipedia.org/wiki/Hydraulic\\_conductivity](http://en.wikipedia.org/wiki/Hydraulic_conductivity).
- [2] Darcy's law. *Wikipedia*. [Online] [Cited: březen 28, 2014.] [http://en.wikipedia.org/wiki/Darcy%27s\\_Law](http://en.wikipedia.org/wiki/Darcy%27s_Law).
- [3] Ergun equation. *Wikipedia*. [Online] [Cited: duben 5, 2014.] [http://en.wikipedia.org/wiki/Ergun\\_equation](http://en.wikipedia.org/wiki/Ergun_equation).
- [4] Close packed structures. [Online] Barbara L. Sauls and Frederick C. Sauls 1998. [Citace: 15. březen 2014.] <http://departments.kings.edu/chemlab/animation/clospack.html>.
- [5] Diphyl. *PubChem Substance*. [Online] National Center for Biotechnology . [Citace: 27. únor 2014.] [http://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/summary/summary.cgi?sid=24868197&loc=es\\_rss#x27](http://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/summary/summary.cgi?sid=24868197&loc=es_rss#x27).
- [6] Kozeny-Carman equation. *Wikipedia*. [Online] [Citace: 21. duben 2014.] [http://en.wikipedia.org/wiki/Kozeny%E2%80%93Carman\\_equation](http://en.wikipedia.org/wiki/Kozeny%E2%80%93Carman_equation).
- [7] Dowtherm A. *The Engineering TollBox*. [Online] [Citace: 8. květen 2014.] [http://www.engineeringtoolbox.com/dowtherm-a-physical-properties-d\\_1591.html](http://www.engineeringtoolbox.com/dowtherm-a-physical-properties-d_1591.html).
- [8] Kožešník, Jaroslav. *Teorie podobnosti a modelování*. Praha : Academia, 1983.
- [9] Koenig, François-Paul Fardin and EV1 Fabien. *Preliminary study of the Pebble-Bed Advanced High Temperature Reactor*. [dokument] místo neznámé : Department of Nuclear Engineering, 2006.
- [10] Valenta, Václav. *Podklady pro minimalizaci hydraulických ztrát v primárním okruhu*.
- [11] P. Bardet, J.Y. An, J.T. Franklin, D. Huang, K. Lee, A. Mai, M. Toulouse and P.F. Peterson. *The Pebble Recirculation Experiment (PREX) for the AHTR*. Idaho : Department of Nuclear Engineering, 2007.
- [12] Peterson, Per F. *Liquid-salt cooled Advanced High Temperature Reactors*. [prezentace] Berkeley : Department of Nuclear Engineering, 2008.
- [13] Dowtherm A. *DOW*. [Online] [Citace: 11. květen 2014.] [http://msdssearch.dow.com/PublishedLiteratureDOWCOM/dh\\_08a5/0901b803808a5b98.pdf?filepath=heattrans/pdfs/noreg/176-01463.pdf&fromPage=GetDoc](http://msdssearch.dow.com/PublishedLiteratureDOWCOM/dh_08a5/0901b803808a5b98.pdf?filepath=heattrans/pdfs/noreg/176-01463.pdf&fromPage=GetDoc).
- [14] Linhart, Jiří. *Mechanika tekutin 1*. Plzeň : ZČU, 2009.
- [15] Vlastnosti glycerinu. [Online] ČVUT, Praha, 1. duben 2005. <http://fyzika.fs.cvut.cz/subjects/f1/seminars/glycerin.pdf>.
- [16] Isobaric properties of water. *NIST*. [Online] U.S. Secretary of Commerce on behalf of the United States of America, 2011. [http://webbook.nist.gov/cgi/fluid.cgi?Action=Load&ID=C7732185&Type=IsoBar&Digits=5&P=1.01325&THigh=&TLow=10&TInc=10&RefState=DEF&TUnit=C&PUnit=bar&DUnit=kg%2Fm3&HUnit=kJ%2Fkg&WUnit=m%2Fs&VisUnit=Pa\\*s&STUnit=N%2Fm](http://webbook.nist.gov/cgi/fluid.cgi?Action=Load&ID=C7732185&Type=IsoBar&Digits=5&P=1.01325&THigh=&TLow=10&TInc=10&RefState=DEF&TUnit=C&PUnit=bar&DUnit=kg%2Fm3&HUnit=kJ%2Fkg&WUnit=m%2Fs&VisUnit=Pa*s&STUnit=N%2Fm).

[17]Wagner, Vladimír. Jaderné reaktory IV. generace využívající roztavené soli. [Online] ÚJF AVČR Řež a FJFI ČVUT Praha, 10. červen 2010. [http://hp.ujf.cas.cz/~wagner/popclan/transmutace/solne\\_reaktory.htm](http://hp.ujf.cas.cz/~wagner/popclan/transmutace/solne_reaktory.htm).

[18] Random close pack. *Wikipedia*. [Online] 18. duben 2014. [http://en.wikipedia.org/wiki/Random\\_close\\_pack](http://en.wikipedia.org/wiki/Random_close_pack).

### Seznam příloh:

PRT0001 - výkres ve formátu A3



meritko	0.002	hmotnost	
kreslil	Patrik Müller	c. vykresu	PRT0001