

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra energetiky

Návrh výměníku tepla pro pasivní havarijní systém jaderné elektrárny

**Proposal of Heat Exchanger for Passive System of Nuclear Power
Plant**

Student:

Petr Glabazňa

Vedoucí bakalářské práce:

prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.

Ostrava 2016

Zadání bakalářské práce

Student: **Petr Glabazňa**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 3907R009 Provoz energetických zařízení
Téma: **Návrh výměníku tepla pro pasivní havarijní systém jaderné elektrárny**
Proposal of Heat Exchanger for Passive System of Nuclear Power Plant
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Vypracujte návrh výměníku tepla - kondenzátoru pro pasivní havarijní systém zaručující snížení tlakového maxima v kontejnmentu jaderné elektrárny o jmenovitém výkonu 500 MWe v průběhu havárie LOCA. Proveďte základní tepelné výpočty a navrhnete základní rozměry výměníku tepla. Graficky proveďte v programu SolidWorks anebo jiném.

Seznam doporučené odborné literatury:

Hejzlar, R.: *Stroje a zařízení jaderných elektráren*. Díl 1. a 2. Vydavatelství ČVUT v Praze, 2005. 385 s. ISBN 80-01-03189-6.
Mátal, O.: *Jaderné reaktory a jejich chlazení*. Nakladatelství CERN VUT v Brně. 2001. 116 s. ISBN 80-214-2028-6.
Hezoučký, F.: *Základy teorie provozních režimů jaderných elektráren s tlakovodními reaktory*. Vydavatelství ČVUT v Praze, 2005. 185 s. ISBN 80-01-03324-4.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.**

Datum zadání: 31.10.2015

Datum odevzdání: 16.05.2016



prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty



Mistopřisežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 16. 5. 2016

Petr Glabazňa.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 16.5.2016

.....Petr Glabazňa.....

podpis

Jméno a příjmení autora práce: Petr Glabazňa

Adresa trvalého pobytu autora práce: Spojovací 2248, 760 01 Zlín

Anotace bakalářské práce

GLABAZŇA P. *Návrh výměníku tepla pro pasivní havarijní systém jaderné elektrárny: Bakalářská práce.* Ostrava: VŠB - TUO, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2016, 50 s. Vedoucí práce: prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.

Tato bakalářská práce se zabývá především návrhem havarijního kondenzátoru jako pasivního prvku bezpečnosti pro případ roztržení primárního okruhu jaderné elektrárny. Práce se skládá z více částí, v nichž je mimo jiné popsán i základní princip fungování samotné jaderné elektrárny včetně některých jejích bezpečnostních prvků. Krátce je zde popsán i konkrétní druh havárie, pro kterou byl kondenzátor navržen. V praktické části jsou dále uvedeny potřebné výpočty pro návrh kondenzátoru, součástí práce je i výkres sestavy.

Annotation of bachelor thesis

GLABAZŇA P. *Proposal of Heat Exchanger for Passive System of Nuclear Power Plant: Bachelor Thesis.* Ostrava: VŠB - TUO, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Energetics, 2016, 50 p. Thesis head: prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.

This bachelor thesis is mainly dealing with proposal of emergency heat exchanger for case of disruption of primary circuit in nuclear power plant. The thesis includes many parts in those is also described an elementary functional principle of nuclear power plant with some of its emergency systems. There is also shortly described a case of the specific accident which was the heat exchanger designed for. In a practic part of thesis are included needed calculations for designing heat exchanger and the last part of this thesis is an assembly drawing.

Obsah

1. Úvod	11
2. Princip fungování jaderné elektrárny	12
2.1 Primární okruh elektrárny	12
2.1.1 Jaderný reaktor	13
2.1.2 Parogenerátor	15
2.1.3 Kompenzátor objemu	16
2.2 Sekundární okruh elektrárny	16
2.2.1 Turbína	16
2.2.2 Kondenzátor	17
2.2.3 Regenerační ohříváky	17
2.3 Terciální okruh elektrárny	18
2.3.1 Chladicí věže	18
3. Bezpečnost	18
3.1 Pasivní havarijní systém	19
3.2 Aktivní havarijní systém	19
3.3 Kontejnment	20
3.3.1 Kontejnmenty s tlakovodním reaktorem (PWR)	20
3.3.2 Kontejnmenty s varným reaktorem (BWR)	21
3.4 LOCA	22
4. Ledový kondenzátor	23
4.1.1 LOCA havárie s ledovým kondenzátorem	24
5. Parafinový kondenzátor	25
5.1 Experimentální projekt parafinového kondenzátoru	26
5.2 Výběr materiálu	28
5.2.1 Výběr konkrétního parafínu	30
6. Výpočet pasivního výměníku tepla	31
6.1 Tlak na konci havárie:	32
6.2 Výpočet kondenzace par	34
6.3 Množství zkondenzované páry	37
6.4 Doba tavení parafínu	38
7. Konstrukční materiál kondenzátoru	42

7.1	Pevnostní výpočet	44
8.	Závěr.....	45
9.	Seznam použité literatury	46
10.	Seznam obrázků	49
11.	Seznam grafů	49
12.	Seznam tabulek.....	49
13.	Seznam příloh	49

Seznam použitých značek

Zkratka	Jednotka	Název
F	[N]	Tlaková síla
Gr	[1]	Grashofovo kritérium
I_0	[kJ]	Entalpie parafínu před prvním časovým krokem
I_1	[kJ]	Entalpie parafínu po prvním časovém kroku
Ja	[1]	Jakobovo kritérium
L	[m]	Výška teplosměnné plochy
Nu	[1]	Nusseltovo kritérium
Pr	[1]	Prandtlovo kritérium
Q	[J]	Teplo
Q_v	[kW]	Tepelný výkon
S	[m ²]	Teplosměnná plocha výměníku
S_k	[m ²]	Kontrolní plocha
T	[K]	Teplota
T_2	[K]	Teplota v kontejnmentě po havárii
V	[m ³]	Objem
V_3	[m ³ /kg]	Měrný objem nasycené kapaliny po havárii
V_4	[m ³ /kg]	Měrný objem páry po havárii
V_c	[m ³]	Celkový objem v kontejnmentě po havárii
V_k	[m ³]	Objem vzduchu v kontejnmentě
V_p	[m ³]	Objem vody v primárním okruhu
V_{pt}	[m ³]	Objem parafínu v trubkách
V_{v1}	[m ³ /kg]	Měrný objem páry v kontejnmentě před havárií
X	[1]	Suchost páry v celém objemu
c	[J/(kgK)]	Měrná tepelná kapacita
c_{kap}	[J/(kgK)]	Měrná tepelná kapacita kapalné fáze
c_p	[kJ/(kgK)]	Měrná tepelná kapacita za stálého tlaku
c_{pev}	[J/(kgK)]	Měrná tepelná kapacita pevné fáze
d	[m]	Vnitřní průměr kondenzátoru
g	[m/s ²]	Gravitační zračlení
i_0	[kJ/kg]	Měrná entalpie parafínu před prvním časovým krokem
i_1	[kJ/kg]	Měrná entalpie parafínu po prvním časovém kroku
l	[J/kg]	Latentní teplo

m_I	[kg]	Hmotnost vody v primárním okruhu
m_{pt}	[kg]	Hmotnost parafínu v trubkách
m_{pz}	[kg]	Hmotnost parafínu v zásobníku
m_v	[kg]	Celkové množství vody před havárií
m_{v1}	[kg]	Hmotnost vodní páry v kontejnmentě před havárií
m_{vz}	[kg]	Hmotnost vzduchu v kontejnmentě
n	[1]	Počet výměníků
p_a	[MPa]	Atmosférický tlak
p_{celk}	[kPa]	Celkový tlak v kontejnmentě po havárii Potřebný tlak pro otevření klapky na vstupu do výměníku
p_k	[MPa]	
p_p	[MPa]	Tlak vody v primárním okruhu
p_{t1}	[kPa]	Parciální tlak vzduchu v kontejnmentě před havárií
p_v	[kPa]	Parciální tlak vody po havárii
p_{v1}	[kPa]	Parciální tlak vodní páry v kontejnmentě před havárií
p_{vz}	[kPa]	Parciální tlak vzduchu po havárii
q	[kW/m ²]	Měrný tepelný tok
q_1	[kJ]	Předané teplo během jednoho časového kroku
r	[J/(kgK)]	Měrná plynová konstanta
t	[m]	Tloušťka stěny kondenzátoru
t_1	[°C]	Počáteční teplota v kontejnmentě
t_2	[°C]	Teplota v kontejnmentě po havárii
t_p	[°C]	Teplota vody v primárním okruhu
t_s	[°C]	Teplota sytosti par
t_w	[°C]	Teplota povrchu
$\Delta\tau$	[s]	Délka časového kroku
α	[W/(m ² K)]	Součinitel přestupu tepla
η	[Pas]	Dynamická viskozita kondenzátu
λ	[W/(mK)]	Tepelná vodivost
ρ	[kg/m ³]	Hustota
ρ_1	[kg/m ³]	Hustota kondenzátu
ρ_2	[kg/m ³]	Hustota suché páry
ρ_{kap}	[kg/m ³]	Hustota kapalných fází
ρ_p	[kg/m ³]	Průměrná hustota parafínu v tuhé a kapalných fázích
ρ_{pev}	[kg/m ³]	Hustota pevných fází

σ_{dov}	[MPa]	Dovolené namáhání v tlaku
σ_{tlak}	[MPa]	Namáhání v tlaku
τ	[s]	Čas kondenzace páry
τ_{55}	[s/kg]	Doba do dosažení teploty tání pro parafín RT 55
τ_{70}	[s/kg]	Doba do dosažení teploty tání pro parafín RT 70HC
$\tau_{\text{celk}55}$	[s]	Celková doba tání parafínu RT 55
$\tau_{\text{celk}70}$	[s]	Celková doba tání parafínu RT 70HC
ν	[m ² /s]	Kinematická viskozita kondenzátu
φ	[1]	Relativní vlhkost v kontejnmentě před havárií
\dot{m}	[kg/s]	Hmotnostní tok kondenzátu
\dot{m}_{celk}	[kg/s]	Celkový hmotnostní tok kondenzátu

1. Úvod

S vývojem nových generací jaderných reaktorů se požadavky na bezpečnost jaderných elektráren neustále zvyšují. Pasivní bezpečnostní prvky, které pro své fungování nepotřebují vnější zdroj energie či zásah operátora, tak zaujímají čím dál větší roli při výstavbě nových jaderných elektráren.

Tato práce se věnuje návrhu pasivního bezpečnostního kondenzátoru pro případ havárie spojené s roztržením primárního potrubí. Začátek práce popisuje základní princip jaderné elektrárny a následně i prvky její bezpečnosti. Dále je krátce popsána i samotná havárie, pro kterou je havarijní kondenzátor navrhován.

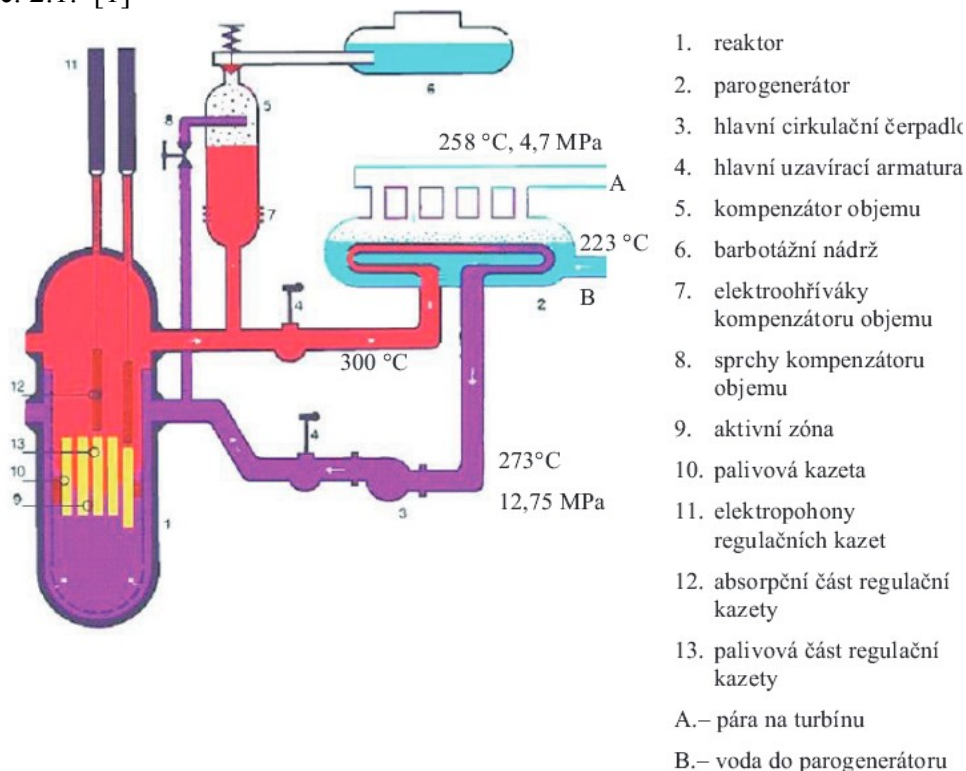
V další části se práce věnuje praktickým výpočtům již zmíněného kondenzátoru a výběru konkrétního teplotnosného média. Součástí práce je i výkres sestavy kondenzátoru s podstavcem pro ustavení v kontejnmentě.

2. Princip fungování jaderné elektrárny

Jaderná elektrárna se principiálně podobá uhelné elektrárně. Funkci kotle, jež produkuje páru pro pohon turbíny, zastupuje jaderný reaktor. Reaktorem cirkuluje chladivo, které tak získává tepelnou energii. V případě dvouokruhových elektráren chladivo (nejčastěji voda) odevzdává své teplo v parogenerátoru vodě sekundárního okruhu, ta se vypaří a výsledná pára pohání turbínu. U jednookruhových elektráren se voda vypařuje přímo v reaktoru a pára pak putuje na turbínu.

2.1 Primární okruh elektrárny

Primární okruh slouží k produkci a přenosu tepelné energie. Jeho součástí je reaktor, cirkulační smyčky a kompenzátor objemu. Jedna cirkulační smyčka se skládá z parogenerátoru, hlavního cirkulačního čerpadla, dvou hlavních uzavíracích armatur a potrubí studené a horké větve. Schématické zobrazení primárního okruhu lze vidět na Obr. č. 2.1. [1]

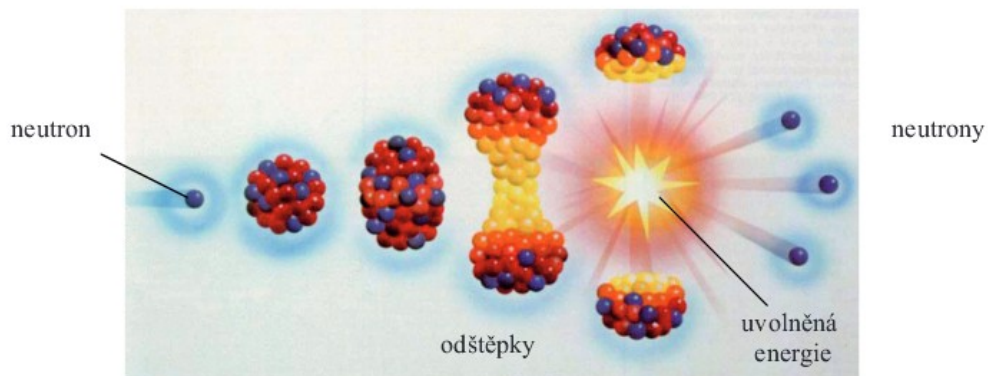


Obr. č. 2.1 Schéma primárního okruhu [2]

2.1.1 Jaderný reaktor

Jaderný reaktor je zařízení, v němž probíhá štěpení jader uranu neutrony. Při této jaderné reakci je produkováno značné množství tepelné energie, která je odváděna a dále transformována na mechanickou a elektrickou energii.

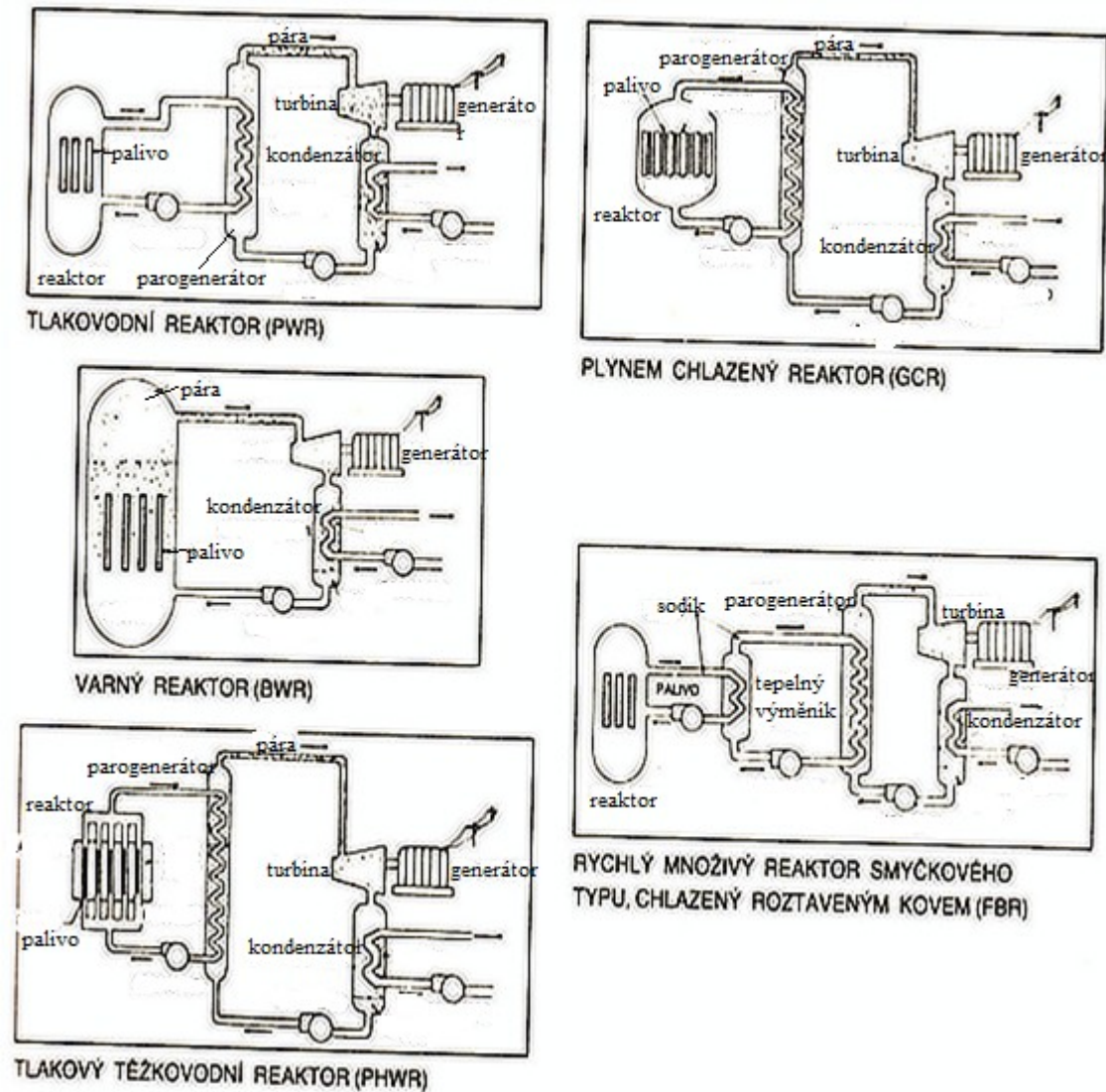
Při štěpení těžkých jader neutrony se jádro rozdělí na dva zhruba stejné fragmenty. Neutron, který pronikne do jádra, způsobí jeho vybuzení a kmitání. Jádro se protahuje do elipsoidu, až se rozdělí (viz. Obr. č.2.2). Energie, potřebná pro rozdělení jádra, je nazývána aktivační energií. Produktem štěpení mohou být také až tři rychlé neutrony, které jsou schopny vyvolat další štěpné reakce, tento jev se pak nazývá řetězová štěpná reakce. [1, 3]



Obr. č. 2.2 Štěpení těžkého jádra neutronem [2]

Více než 80 [%] instalovaného výkonu jaderných reaktorů je produkováno v lehkovodních reaktorech, které se dělí na dva typy: varné reaktory (BWR) a tlakovodní reaktory (PWR). Jako palivo slouží oxid uranický obohacený na 2,2 až 3,5 [%] U^{235} , pokrytý zirkoniovou slitinou. Typ tlakovodního reaktoru využívají i jaderné elektrárny Dukovany a Temelín. Moderátorem a zároveň chladičem je v reaktoru PWR voda o teplotě 250 - 330 [°C] a tlaku 7 - 20 [MPa]. Vysoký tlak udržuje vodu v tekutém skupenství, což je pro správný chod reaktoru nezbytné. Moderátor slouží pro zpomalování rychlých neutronů, čímž zároveň zvyšuje pravděpodobnost zásahu jádra. Reaktor typu BWR využívá jednookruhový cyklus. Voda cirkulující aktivní zónou se mění na páru a ta přímo pohání turbínu. Různé typy jaderných reaktorů jsou uvedeny na obr. č. 2.3. [4, 5]

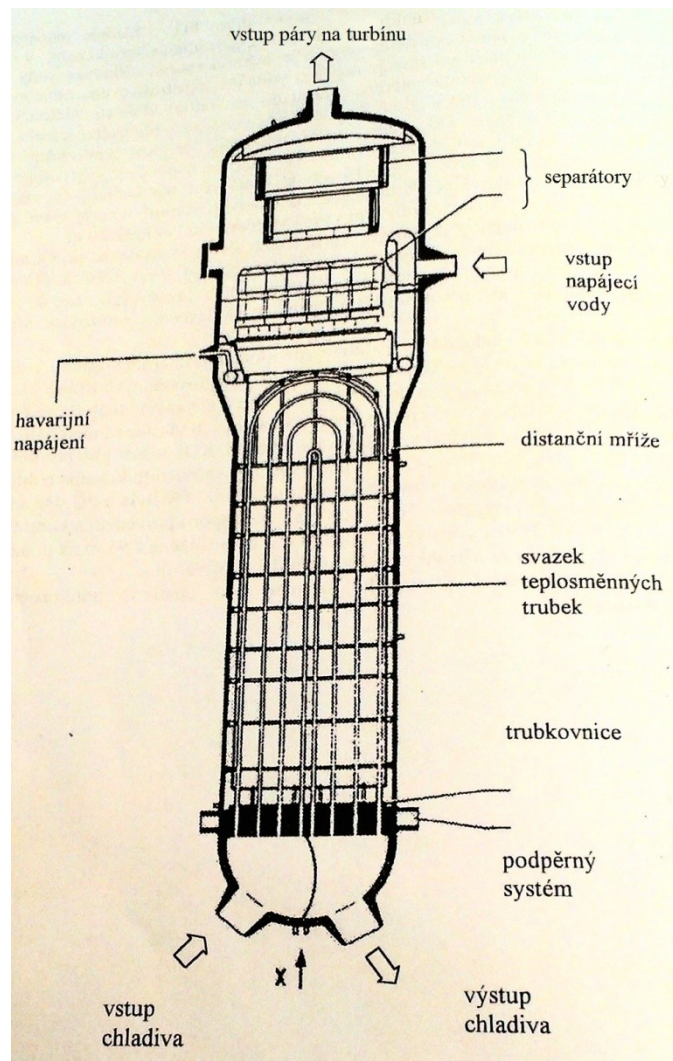
Rychlost řetězové štěpné reakce a tedy i výkon reaktoru se reguluje pomocí regulačních tyčí a změnou koncentrace kyseliny borité v chladivu. Bor funguje jako dobrý absorbátor neutronů. [2]



Obr. č. 2.3 Typy jaderných reaktorů [5]

2.1.2 Parogenerátor

Parogenerátor je tepelný výměník, který odděluje primární okruh od sekundárního. Horká voda o vysokém tlaku proudí z reaktoru do parogenerátoru, kde přes stěny trubek předává svou tepelnou energii vodě v sekundárním okruhu. Voda sekundárního okruhu je přeměněna na páru a parovody odvedena na turbínu. Systém dvou okruhů oddělených parogenerátorem má sice nižší účinnost oproti jednookruhovému, ale jeho velkou výhodou je, že radioaktivní voda je uzavřena pouze v primárním okruhu a vůbec tedy nepřichází do styku s turbínou. Na obr. č. 2.4 je schematicky zobrazen svislý typ parogenerátoru, který bývá nejčastěji používán v elektrárnách s tlakovodními reaktory PWR. [6, 9]



Obr. č. 2.4 Svislý parogenerátor [9]

2.1.3 Kompenzátor objemu

Při velkém objemu chladiva (řádově stovky [m³]) je nutno počítat s jeho objemovou teplotní roztažností. Pro kompenzaci objemu se používá vertikální tlaková nádoba, která je připojena k horké větvi primárního okruhu. Pomocí elektropřihříváčů či sprch dokáže kompenzátor objemu rovněž regulovat tlak v primárním okruhu. Bez kompenzátoru objemu by hrozilo popraskání potrubí a následný únik radioaktivního chladiva do kontejnmentu. [6]

2.2 Sekundární okruh elektrárny

V sekundárním okruhu dochází k přeměně tepelné a tlakové energie páry na mechanickou energii turbíny. Hlavními částmi jsou: turbína, generátor, kondenzátor, regenerační ohříváky a kondenzační a napájecí čerpadla. [6]

2.2.1 Turbína

Turbína je tepelný motor, který mění tepelnou a tlakovou energii páry na mechanickou energii. Turbíny jsou prakticky nejpoužívanější parní motory pro pohon elektrických generátorů. Výkony turbín se pohybují od několika [kW] až po v současné době nejvyšší 1500 [MW]. [7, 24]

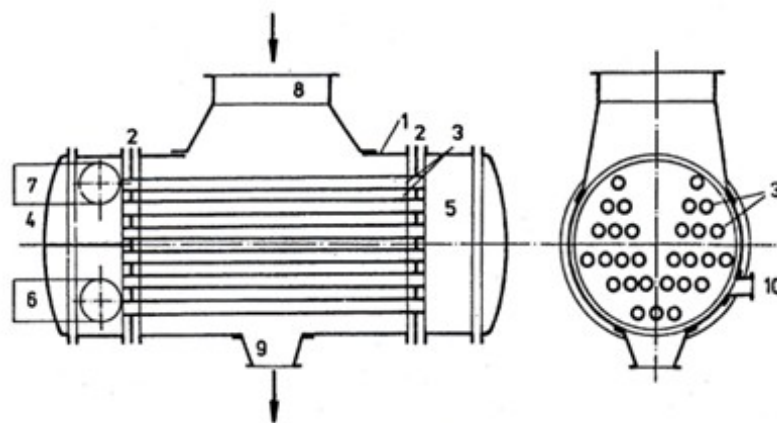
Turbíny bývají nejčastěji zařazeny v sekundárním okruhu, to se týká elektráren s tlakovodními a plynem chlazenými reaktory. Mohou být ale zařazeny i v primárním (elektrárny s varnými reaktory) nebo v terciálním okruhu (elektrárny s rychlými reaktory chlazenými sodíkem). [7, 24]

Nejvýhodnější je použití turbín na přehřátou páru s co nejvyšší vstupní teplotou a tlakem páry. Tyto turbíny mají oproti turbínám na páru sytou vyšší účinnost. Jsou však zatím vhodné pouze pro terciální okruh elektráren s rychlými reaktory a pro sekundární okruh elektráren s reaktory chlazenými plynem. U varných a tlakovodních elektráren se používají hlavně turbíny na sytou páru. [7, 24]

2.2.2 Kondenzátor

V kondenzátoru se z pracovní látky odvádí nevyužitelná část tepla. Pára z turbíny se v kondenzátoru mění opět na kapalinu (kondenzát), ta je čerpána zpět do parogenerátoru. [7, 24]

Povrchový kondenzátor zobrazený na obr. č. 2.5, je základním typem kondenzátoru umístěvaným za parními turbínami. Systém trubek, jímž proudí chladicí kapalina, tvoří teplosměnnou plochu, na níž pára kondenzuje. Ve spodní části kondenzátoru je sběrač kondenzátu, který zásobuje kondenzátem čerpadla. [7]



1 - plášť kondenzátoru, 2 - trubkovnice, 3 - kondenzátorové trubky, 4, 5 - vodní komory, 6 - vstupní hrdlo chladicí vody, 7 - výstupní hrdlo chladicí vody, 8 - vstupní hrdlo páry, 9 - výstupní hrdlo kondenzátu, 10 - odsávání parovzdušné směsi).

Obr. č. 2.5 Schéma povrchového kondenzátoru [7]

2.2.3 Regenerační ohříváky

Regenerační ohříváky zvyšují účinnost oběhu vody a vodní páry zvyšováním teploty napájecí vody na vstupu do parogenerátoru. Použitím velkého počtu regeneračních ohříváků je možné se přiblížit Carnotovu oběhu. Napájecí voda by byla ohřáta na teplotu varu při odpovídajícím tlaku produkované páry v parním generátoru. Při zvyšujícím se počtu regeneračních ohříváků rostou samozřejmě náklady a také složitost, proto se vhodný počet ohříváků určuje optimalizačními výpočty. U dvouokruhových elektráren bývá počet regeneračních ohříváků nejčastěji mezi 7 - 9. Teplota napájecí vody parního generátoru bývá tedy kolem 220 [°C]. Ohříváky jsou vytápěny párou z určitých odběrů turbíny. [7, 24]

2.3 Terciální okruh elektrárny

Terciálním okruhem proudí chladicí voda, která má za úkol zkondenzovat páru procházející kondenzátorem. Kondenzátor tedy odděluje sekundární okruh od terciálního. Voda terciálního okruhu se svého tepla zbaví v chladicích věžích a proudí opět do kondenzátoru. Se snižující se teplotou vody terciálního okruhu roste podtlak v kondenzátoru, a tím se zvyšuje účinnost turbíny. [7]

Terciální okruh tvoří: potrubí a kanály chladicí vody, oběhová čerpadla a chladicí věže. Elektrárny, které jsou postaveny blízko řeky či moře a disponují tedy dostatečným množstvím průtočné vody, chladicí věže nemají. Kondenzátor je v takovém případě chlazen přímo průtočnou vodou a odpadají tím pádem i obavy o negativním dopadu velkého množství vodních par na ekosystém. [7]

2.3.1 Chladicí věže

Chladicí věže s tvarem rotačního hyperboloidu a výškou 125 [m] jsou při pohledu na elektrárnu její dominantou. Tyto věže slouží pro ochlazování vody terciálního okruhu. Voda je ve věžích rozstříkována, aby bylo chlazení účinnější. Část vody se samozřejmě odpaří, ale skupenské teplo potřebné pro odpaření je hlavním činitelem pro snížení teploty chladicí vody. Zchlazená voda se shromažďuje v bazénu na dně věže, odkud je čerpadly čerpána opět do kondenzátoru. [6]

3. Bezpečnost

Na bezpečnost jaderných elektráren je kladen velký důraz. Radioaktivní materiál a radioaktivní záření se nikdy nesmí dostat do okolí a ohrozit tak personál elektrárny nebo obyvatele a životní prostředí mimo elektrárnu. Jaderná elektrárna musí být konstruována tak, aby odolala živelným pohromám, pádu letadla, teroristickým útokům či lidským chybám. [8]

První bariérou proti úniku štěpných produktů je samotná struktura paliva oxidu uraničitého, která při běžném provozu dokáže zadržet 99 [%] radioaktivních produktů. Zbývající 1 [%] by měl zadržet zirkoniový obal palivové tyče. Další bariérou je reaktorová nádoba, která je hermeticky uzavřená. Poslední bariéru tvoří velká

železobetonová schránka - kontejnment. V něm bývá ukryt primární okruh s bazénem pro vyhořelé palivo. [8]

Další prvek výrazně zvyšující bezpečnost je systém autoregulace, který v případě náhlé změny výkonu reaktoru jej dokáže vrátit zpět do provozních hodnot. Současný vývoj se těmto typům reaktorů s vnitřní bezpečností věnuje. [8]

3.1 Pasivní havarijní systém

Pasivní bezpečnostní prvky fungují samočinně na základě fyzikálních zákonů. Pro svou funkci nepotřebují zásah operátora ani dodávku elektrické energie. Tyto systémy mohou například pomáhat snížit tlak v kontejnmentě při LOCA havárii, tedy havárii, při které unikne chladivo z primárního okruhu, následkem poklesu tlaku se přemění v páru a vyplní kontejnment. Pro zkondenzování páry lze z pasivních prvků využít ledový či parafínový kondenzátor. [10]

Dalším prvkem pasivního systému jsou havarijní tyče. Tyto tyče visí nad reaktorem díky elektromagnetům. V případě výpadku proudu se elektromagnety vypnou a havarijní tyče se s pomocí gravitace zasunou do reaktoru. Havarijní tyče pohltí neutrony a štěpná reakce se zastaví. Dále se mezi pasivní prvky řadí i dvojitý kontejnment, v němž dochází k ochlazení vnitřní ocelové obálky pomocí přirozeného oběhu vzduchu. [10]

Mezi výhody pasivních prvků tedy patří automatická funkčnost bez zásahu obsluhy s pomocí fyzikálních zákonů, ale nevýhodou jsou obtíže při jejich testování. [10]

3.2 Aktivní havarijní systém

Pro chod aktivních systémů je potřebný zdroj elektrické energie a zásah operátora. Jako zdroj energie je často využívána samotná elektrárna. V případě poruchy a přerušení produkce elektřiny mívají elektrárny v záloze dieselové agregáty a záložní akumulátory, které zajistí potřebný pohon. [10]

Aktivní havarijní systémy v případě potřeby dochlazují aktivní zónu nebo v ní zvyšují koncentraci kyseliny borité, která pohlcuje neutrony, a tím snižuje počet štěpných reakcí. [10]

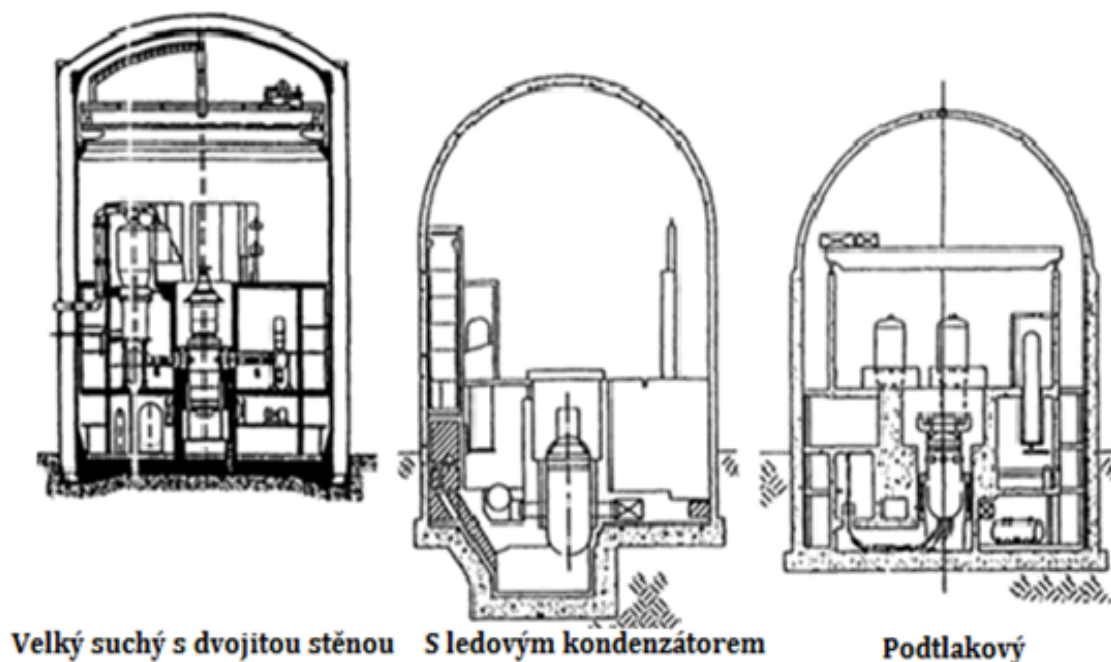
K nevýhodám těchto systémů patří možnost poruchy či chyba lidského faktoru a již zmíněná nutnost vnějšího zdroje energie. Výhodou je naopak možnost chlazení primárního okruhu včetně samotného reaktoru systémem sprch. [10]

3.3 Kontejnment

Kontejnment je velká betonová stavba, která odděluje primární okruh od vnějšího okolí. Má za úkol chránit primární okruh před vnějšími vlivy, k nimž patří například tornáda či pád letadla. Při interních haváriích typu LOCA je úkolem kontejnmentu chránit okolí před únikem radioaktivních materiálů. Ačkoliv některé z dřívějších reaktorů byly postaveny bez kontejnmentů (např. reaktory moderované grafitem a chlazené plynem nebo lehkovodní reaktory), kontejnmenty u současných generací reaktorů jsou už samozřejmostí. [11]

3.3.1 Kontejnmenty s tlakovodním reaktorem (PWR)

Kontejnmenty pro PWR reaktory bývají postaveny z železobetonu, předpjatého betonu nebo z jejich kombinace. Staví se buď s jednou, nebo dvěma stěnami. Existují tři hlavní druhy kontejnmentů pro PWR reaktory, a to: velký suchý, podtlakový a kontejnment s ledovým kondenzátorem. Velký suchý kontejnment je navržen tak, aby v případě LOCA havárie dokázal pojmout veškerý objem chladicí kapaliny primárního okruhu. Při LOCA havárii v kontejnmentu s ledovými kondenzátory je unikající pára ochlazována a kondenzována pomocí ledu. Díky tomu kontejnment nemusí odolávat příliš vysokému tlaku a náklady na jeho stavbu tak klesají. V podtlakovém kontejnmentě je udržován stálý podtlak, díky čemuž z něj nic neunikne. U tohoto typu lze snadno odhalit jakékoli netěsnosti. Výše zmíněné typy kontejnmentů lze vidět na obr. č. 3.1. [10, 11]



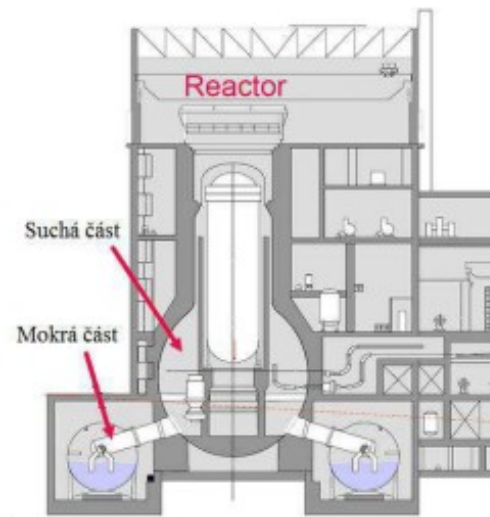
Obr. č. 3.1 Kontejnmenty s reaktorem PWR [11]

3.3.2 Kontejnmenty s varným reaktorem (BWR)

Většinou se jedná o ocelové nádoby, někdy jsou však postaveny z železobetonu nebo předpjatého betonu. Elektrárny s BWR reaktory v USA používají ocelové kontejnmenty posílené betonovou konstrukcí. [11]

Tyto kontejnmenty jsou vybaveny systémem snižování tlaku pro případ LOCA havárie. Skládají se z části suché a mokré. Suchá část je složena z tlakové nádoby a mokrá část, která obklopuje suchou, obsahuje vodu. V případě havárie je pára vedena do mokré části, kde zkondenzuje. [10]

Tento typ kontejnmentu se dělí ještě na tři druhy: Mark I (viz. obr. č. 3.2) až Mark III, přičemž vyšší pořadové číslo značí bezpečnější či efektivnější koncepci. [10]



Obr. č. 3.2 Kontejnment Mark I [10]

3.4 LOCA

Jedna z nezávažnějších havárií jaderné elektrárny je havárie typu LOCA (Loss of coolant accident). Jedná se o ztrátu chladiva primárního okruhu vlivem prasknutí potrubí. Prasknutím hlavního napájecího potrubí reaktoru se vyznačuje LB-LOCA (Large break LOCA), v případě této havárie je výrazně sníženo až znemožněno chlazení reaktoru chladicí kapalinou a hrozí přehřátí paliva. Tato havárie je brána jako nejvyšší projektová havárie a poskytuje tedy základ pro navrhování bezpečnostních systémů. [12]

Chladivo při úniku z primárního okruhu se následkem dekomprese mění v páru, která vyplní kontejnment. V kontejnmentě tak vzroste tlak a teplota a hrozí jeho následné porušení. Kontejnmenty jsou pro takový případ navrhovány. V předchozí kapitole je zmíněno několik konkrétních kontejnmentů a jejich principy pro vypořádání se s takovou situací. V zásadě lze kontejnmenty rozdělit do dvou kategorií: plnotlaké a kontejnmenty se systémem pro potlačení tlaku. [12]

Při vyprazdňování primárního okruhu dochází i bez zasunutých absorbčních tyčí k zastavování štěpné reakce a tepelný výkon reaktoru klesá. To je způsobeno vodní párou, která nedokáže zpomalovat neutrony stejně dobře jako kapalná voda. Aby ale nebylo znova dosaženo kritického stavu, je nezbytné, aby byly absorbční tyče zasunuty před znovuzaplavením aktivní zóny. [12]

Při nižších a středních únicích chladiva se zapojí vysokotlaká havarijní čerpadla, která do okruhu čerpají vodu s velkým množstvím boru. Do několika sekund však dojde k obnažení paliva. Obal paliva nesmí přesáhnout 1200 [°C], jinak by došlo k jeho tavení a hrozil by únik štěpných materiálů. Jestliže dojde k poklesu tlaku primárního okruhu pod 6 [MPa], jsou automaticky otevřeny ventily hydroakumulátorů, které vstříknou značné množství kyseliny borité do potrubí. Později jsou zapojena nízkotlaká čerpadla, která dovedou dodávat velké množství vody, a jsou tak schopna znovuzaplavení aktivní zóny a dlouhodobého odvádění zbytkového tepla. [12]

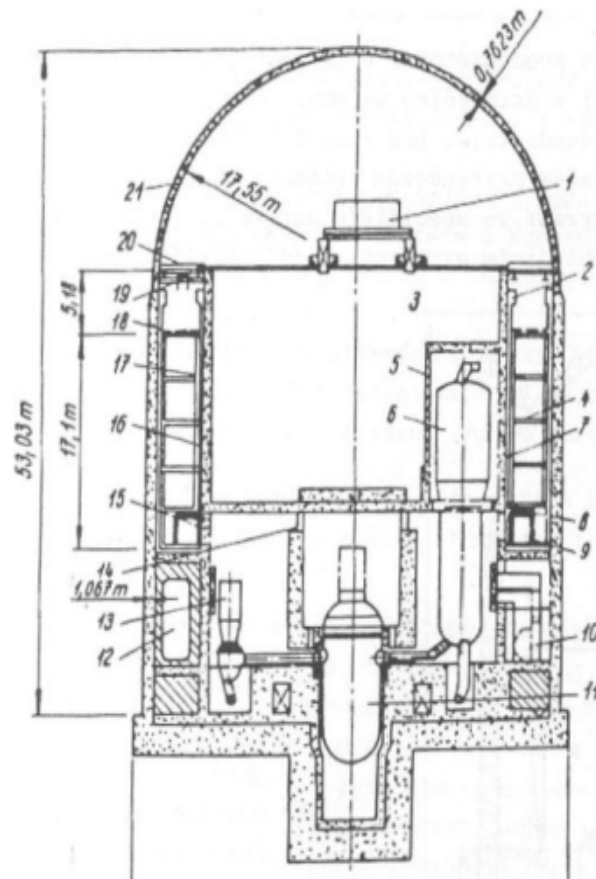
4. Ledový kondenzátor

Americká firma Westinghouse vyvinula tento pasivní prvek bezpečnosti, který v případě LOCA snižuje tlak v kontejnmentě, díky tomu se snížily náklady na jeho výstavbu. Poprvé byl kontejnment s ledovým kondenzátorem použit v elektrárně D. C. Cook roku 1975. V současné době je tento systém zaveden u devíti amerických, dvou japonských a na jedné finské elektrárně. Podrobnější schéma kontejnmentu s ledovými kondenzátory je na obr. č. 4.1. [10]

Led je v kondenzátoru umístěn ve speciálních koších, jež umožňují v případě potřeby průchod páry skrz. Přesný tvar ledu patří mezi tajemství firmy Westinghouse, ale nejspíš se jedná o kuličky nebo ledovou tříšť. Pro výkon 1000 [MWe] je zapotřebí 1100 tun ledu. Ten je během provozu udržován v tuhém stavu, což zvyšuje náklady na provoz. [10, 13]

Kontejnmenty s kondenzátory bývají dvojité, primární ocelovou obálku chrání sekundární železobetonový obal. Jejich objem je až o polovinu menší než u plnotlakých kontejnmentů. Kontejnment je dimenzován na relativně nízký tlak 70 - 105 [kPa]. [10]

1. jeřáb
2. Chladič vzduchu
3. nosná stěna jeřábové dráhy
4. nosná konstrukce ledového kondenzátoru
5. dělicí stěna
6. parní generátor
7. nosník
8. základová konstrukce ledového kondenzátoru
9. prázdný prostor
10. ventilátor
11. reaktor
12. hydro-akumulátor
13. hlavní oběhové čerpadlo
14. průtokové kanály
15. vstupní klapky ledového kondenzátoru
16. izolace
17. ledová výplň
18. výstupní otvory kondenzátoru
19. mostový jeřáb
20. výstupní klapky
21. ocelové vyložení



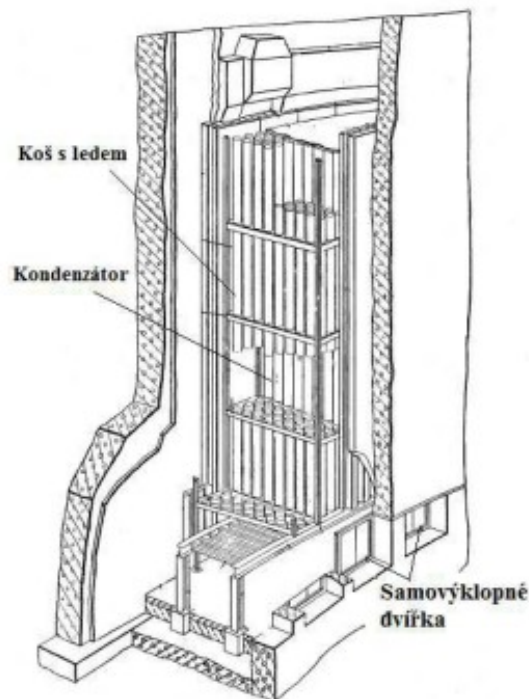
Obr. č. 4.1 Schéma kontejnmentu s ledovým kondenzátorem [13]

4.1.1 LOCA havárie s ledovým kondenzátorem

Po gilotinovém přetržení potrubí a následném úniku páry do kontejnmentu se zvýšením tlaku na hodnotu $0,17$ [MPa] otevřou samovýklopné dveře, jimiž pára proudí do kondenzátoru. Pára projde kondenzátorem přes koše s ledem smíšeným s kyselinou boritou, zkondenzuje a rozpustí led. Směs rozpuštěného ledu a zkondenzované páry steče do nádrží vespod kontejnmentu. Následné chlazení je zajištěno sprchami, které jsou napájeny zásobníky a později i z nádrží se zkondenzovanou párou a roztátým ledem. [10]

Mezi výhody ledového kondenzátoru patří především snížení tlaku v kontejnmentu během LOCA, a tedy i výrazné snížení nákladů na jeho výstavbu. Další výhodou je, že se v ledu zadrží velké množství radioaktivních materiálů. A nakonec lze rozpuštěný led

i zkondenzovanou páru využít pro chlazení sprchovým systémem. Kondenzátor je zobrazen na obr. č. 4.2. [10, 13]



Obr. č. 4.2 Ledový kondenzátor [10]

5. Parafínový kondenzátor

Velkou nevýhodou ledového kondenzátoru je nutnost udržení ledu v pevném skupenství, což klade velké energetické nároky, a následně se tak zvyšují náklady na provoz. Nabízí se tedy řešení vyměnit led za materiál, který je při běžných podmínkách v tuhém stavu, a který dokáže nakumulovat stejné nebo vyšší množství tepla. [10, 13]

Kalorimetrickou rovnicí lze vyjádřit množství tepla, které je daný materiál schopný naakumulovat.

Kalorimetrická rovnice látek bez fázové přeměny:

$$Q = \int V \cdot \rho \cdot c \cdot dT \text{ [J]} \quad (5.1)$$

Kde $V \text{ [m}^3\text{]}$ je objem látky, $\rho \text{ [kg/m}^3\text{]}$ je její hustota, $c \text{ [J/(kgK)]}$ je měrná tepelná kapacita a $dT \text{ [K]}$ je změna teploty.

V tomto případě je pro akumulaci tepla využita měrná tepelná kapacita látky v určitém rozsahu teplot. Tato rovnice se týká látek, které v rozmezí konkrétních teplot nemění své skupenství. [10, 13]

Kalorimetrická rovnice látek s fázovou přeměnou (PCM):

$$Q = \int V \cdot \rho_{\text{pev}} \cdot c_{\text{pev}} \cdot dT + V \cdot \rho_{\text{kap}} \cdot l + \int V \cdot \rho_{\text{kap}} \cdot c_{\text{kap}} \cdot dT \quad [\text{J}] \quad (5.2)$$

Kde $V \text{ [m}^3\text{]}$ je objem látky, $\rho_{\text{pev}} \text{ [kg/m}^3\text{]}$ hustota látky v pevném stavu, $c_{\text{pev}} \text{ [J/kgK]}$ je měrná tepelná kapacita v pevném stavu, $dT \text{ [K]}$ je změna teploty, $l \text{ [J/kg]}$ je měrné skupenské teplo, $\rho_{\text{kap}} \text{ [kg/m}^3\text{]}$ hustota látky v kapalném stavu a $c_{\text{kap}} \text{ [J/kgK]}$ je měrná tepelná kapacita v kapalném stavu.

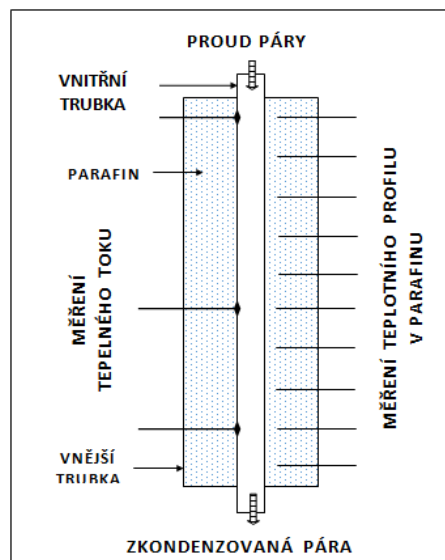
Je zřejmé, že využití PCM (Phase changing materials) je pro kondenzátor nejvýhodnější, zatím je však jako PCM materiál využíván pouze led. [10, 13]

5.1 Experimentální projekt parafínového kondenzátoru

Vzhledem k tomu, že kondenzátor s jiným materiálem než ledem ještě nebyl prakticky nikde zaveden, mezi lety 2012 a 2015 proběhl experimentální projekt ve spolupráci VUT Brno a Texas A&M University. Projekt *Možnosti akumulace a odvodu tepla pro havarijní události typu LOCA v jaderných elektrárnách* se zabýval využitím PCM materiálů, konkrétně parafínů pro havarijní kondenzátor.

Volba materiálu pro kondenzátor by měla zohledňovat cenovou dostupnost, bezpečnost, snadnou manipulaci a vhodné termodynamické vlastnosti jako jsou měrná tepelná kapacita, latentní teplo, teplota tavení. Pro všechna kritéria však bylo nemožné zvolit jediný materiál, proto byly požadavky nakonec zúženy na použitelnost, cenu a bezpečnost. Jim nakonec nejlépe odpovídaly parafíny, jejichž teplotu tavení si lze zvolit z rozmezí přibližně od -5 až do $90 \text{ [}^\circ\text{C]}$, a které dovedou pohltit zhruba 200 [kJ/kg] tepla při fázové přeměně. Pro experiment byly zvoleny parafíny o teplotách tavení: 28 , 58 a $82 \text{ [}^\circ\text{C]}$. První ze jmenovaných parafínů byl zvolen pro jeho vyšší absorpci tepla při fázové změně. Zbylé dva byly zvoleny pro blízkost provozních teplot v kontejnmentě. Oproti ledu mají parafíny nižší tepelnou vodivost i měrnou tepelnou kapacitu. Jejich výhodou pro experiment bylo hlavně snadné použití a chemická inertnost vůči konstrukčním materiálům. Za nevýhodu by se dala považovat nízká viskozita v kapalném stavu, a tedy zvýšené požadavky na těsnost zařízení. Další nevýhodou by mohlo být snížení hustoty během změny skupenství, což má za následek zvýšení objemu uvnitř zařízení. [15]

Kondenzátor je tvořen dvěma trubkami, z nichž jedna je uvnitř druhé. Vnější trubka je naplněna parafinem a vnitřní trubkou proudí pára souproudě se vznikajícím kondenzátem (viz. obr. č. 5.1). Parametry jako teplota a tlak proudící páry, které by se neměly příliš lišit od parametrů páry proudící do ledového kondenzátoru v případě LOCA, jsou systémem zaznamenávány. Měřicími senzory byl zjišťován hlavně tepelný tok a teplota parafínu v deseti bodech po výšce zařízení. Experimentální zařízení je zobrazeno na obr. č. 5.2. [15]



Obr. č. 5.1 Schéma experimentálního zařízení [15]

Experiment s použitím parafínů jako PCM materiálů pro kondenzátor přinesl velmi dobré výsledky. Odvod tepla byl třikrát intenzivnější, než se předpokládalo, a tím se tedy ukázalo, že využití parafínu pro odvádění tepla v pasivních havarijních kondenzátorech či v jiných zařízeních, má smysl. Bohužel je nepravděpodobné, že ve stávajících kondenzátorech bude led nahrazen vhodnějšími materiály. Parafíny jako PCM by mohly být využity i pro pasivní chlazení bazénu s vyhořelým palivem. A samozřejmě by se s nimi mohlo počítat u nových projektů. [15]



Obr. č. 5.2 Experimentální zařízení v laboratoři [15]

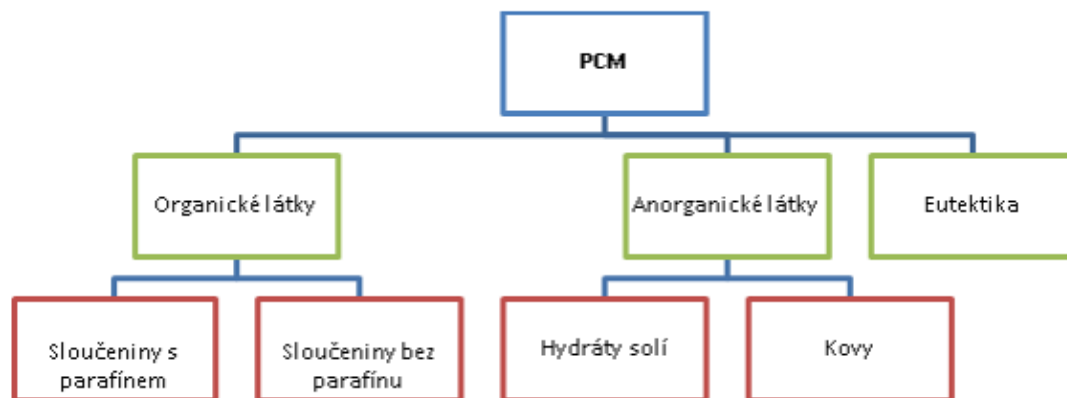
5.2 Výběr materiálu

Dále se tato práce bude zabývat návrhem kondenzátoru s jiným PCM materiálem než ledem, jako pasivního prvku bezpečnosti pro případ LOCA havárie v jaderné elektrárně.

Jak ukazuje obr. č. 5.3, lze PCM materiály vybírat z několika hlavních druhů.

Zvolená kritéria pro hledaný PCM materiál:

- levný a dostupný
- bezpečný
- chemicky inertní vůči konstrukčním materiálům kondenzátoru a nekorozivní
- nehořlavý
- vyšší tepelná vodivost
- vysoká měrná tepelná kapacita a latentní teplo.



Obr. č. 5.3 Rozdělení PCM materiálů [18]

Organické materiály:

Výhody:

- chemicky stabilní
- nekorozivní a nezpůsobují korozi
- vysoké měrné skupenské teplo tání

Nevýhody:

- jsou hořlavé
- vysoká změna objemu při změně fáze
- nízká tepelná vodivost [18]

Anorganické materiály:

Výhody:

- nehořlavé
- vyšší tepelná vodivost
- vysoké měrné skupenské teplo tání

Nevýhody:

- způsobují korozi
- rozklad při vyšších teplotách [18]

Eutektické materiály:

Výhody:

- chemická stabilita

Nevýhody:

- způsobují korozi
- nízká teplota tání [18]

Jelikož anorganické a eutektické materiály způsobují korozi, jsou tak nevhodné pro využití v kondenzátorech. Z organických látek jsou rovněž nevhodné sloučeniny bez parafínu kvůli jejich vyšší ceně a hořlavosti. Naproti tomu sloučeniny s parafínem disponují vyšším latentním teplem, vhodnou teplotou tání a příznivou cenou. [10, 18]

5.2.1 Výběr konkrétního parafínu

Parafíny byly zvoleny z produktů firmy Rubitherm, která se zabývá jejich výrobou. Firma dělí své produkty do několika kategorií, pro náš případ bude nejvhodnější kategorie RT, která obsahuje organické produkty s nejvyšší tepelnou kapacitou. Konkrétně byly vybrány materiály s podobnými teplotami tání jako použité materiály v experimentu (viz. kap. 7.1). Jedná se tedy o produkty RT 55 a RT 70HC.

RT 55:

- teplota tání: 51 - 57 [°C]
- tepelná kapacita: 170 kJ/kg (mezi teplotami 48 až 63 [°C])
- hustota (pevný stav 15 [°C]): 0,88 [g/cm³]; hustota (kapalina 80 [°C]): 0,77 [g/cm³]
- teplota vzplanutí: >200 [°C] [14]

RT 70HC:

- teplota tání: 69 - 71 [°C]
- tepelná kapacita: 260 [kJ/kg] (mezi teplotami 62 až 77 [°C])
- hustota (pevný stav 15 [°C]): 0,88 [g/cm³]; hustota (kapalina 80 [°C]): 0,77 [g/cm³]
- teplota vzplanutí: > 200 [°C] [14]

6. Výpočet pasivního výměníku tepla

Cílem je stanovit přestup tepla při kondenzaci páry, která se uvolňuje při havarijní situaci spojené s roztržením potrubí primárního okruhu.

Jestliže je stěna o teplotě povrchu t_w [°C] ve styku s párami kapaliny o teplotě sytosti t_s [°C] a $t_w < t_s$, nastane na chladnějším povrchu kondenzační proces. Podle charakteru kondenzátu na ploše může jít o kondenzaci blánovou nebo kapkovou. Blánová nastane při smáčivé kapalině, která vytvoří blánu, film. Kapková nastává u nesmáčivé kapaliny a vytváří kapky různé velikosti. [16, 17]

Rozlišujeme tři dílčí procesy:

- molekulární a molární transport plynné fáze k fázovému rozhraní
- vlastní změna skupenství plynné fáze
- odvod skupenského tepla kondenzačního vrstvou kondenzátu do ochlazovacího povrchu [16]

Při havárii LOCA s únikem vody z primárního okruhu dochází ke zvýšení teploty a tlaku při stejném objemu v kontejnmentě.

V tabulce číslo 5.1 je popsán výsledný a koncový stav po havárii LOCA pro 600 [MWe] blok elektrárny Westinghouse.

Tab. č. 6.1 Zadané parametry

	Voda v primárním okruhu	Stav v kontejnmentě před havárií	Stav po havárii
Tlak [Mpa]	$p_p = 15,5$	$p_a = 0,101325$	$p_k = 0,15$
Objem [m ³]	$V_p = 177$	$V_k = 29223$	$V_c = 29400$
Teplota [°C]	$t_p = 213,6$	$t_1 = 27$	výpočet
Suchost (X) [1] / relativní vlhkost (φ) [1]	/	$\varphi = 0,8$	výpočet

Kde p_k je tlak, při kterém se otevře klapka na vstupu do výměníku. Objem V_c je součet vzduchového objemu kontejnmentu s objemem primárního okruhu.

6.1 Tlak na konci havárie:

Zjištění parciálního tlaku vypařené vody v kontejnmentě na počátku:

$$p_{v1} = \varphi \cdot p_1 \text{ [kPa]} \quad (6.1)$$

$$p_{v1} = 0,8 \cdot 3,56 = 2,85 \text{ [kPa]}$$

Kde φ [1] je relativní vlhkost v kontejnmentě před havárií a p_1 [kPa] je tlak vodní páry při počáteční teplotě v kontejnmentě t_1 [°C]. [26]

Odečtením parciálního tlaku vypařené vody od tlaku atmosférického dostaneme parciální tlak vzduchu nacházejícího se uvnitř kontejnmentu:

$$p_{t1} = p_a - p_{v1} \text{ [kPa]} \quad (6.2)$$

$$p_{t1} = 101,325 - 2,85 = 98,5 \text{ [kPa]}$$

Kde p_a [kPa] je atmosférický tlak a p_{v1} [kPa] je parciální tlak vypařené vody ze vzorce č. (6.1).

Hmotnost vodní páry v kontejnmentě před havárií se pak stanoví jako:

$$m_{v1} = \frac{V_k}{V_{v1}} \text{ [kg]} \quad (6.3)$$

$$m_{v1} = \frac{29223}{48,5} = 602 \text{ [kg]}$$

Kde V_k je [m³] objem vzduchu v kontejnmentě před havárií a V_{v1} [m³/kg] je měrný objem páry při počáteční teplotě v kontejnmentě t_1 [°C] a atmosférickém tlaku p_a [MPa]. [26]

Dále určíme hmotnost vody v primárním okruhu:

$$m_1 = \frac{V_p}{V_1} \text{ [kg]} \quad (6.4)$$

$$m_1 = \frac{177}{0,00168} = 105357 \text{ [kg]}$$

Kde V_p [m³] je objem chladiva v primárním okruhu a V_1 [m³/kg] je měrný objem vody v primárním okruhu před havárií při teplotě t_p [°C] a tlaku p_p [MPa]. [26]

Celkové množství vody na počátku LOCA tedy bude:

$$m_v = m_{v1} + m_l \text{ [kg]} \quad (6.5)$$

$$m_v = 105357 + 602 = 105959 \text{ [kg]}$$

Kde m_{v1} [kg] je hmotnost vodní páry v kontejnmentě před havárií ze vzorce č. (6.3) a m_l [kg] je hmotnost vody v primárním okruhu ze vzorce (6.4).

A nyní lze zjistit suchost páry v celém objemu V_c :

$$X = \frac{\frac{V_c - V_3}{m_v}}{V_4 - V_3} [1] \quad (6.6)$$

$$X = \frac{\frac{29400}{105959} - 0,00108}{0,536 - 0,00108} \doteq 0,52 [1]$$

Kde V_3 [m³/kg] je měrný objem a je určen pro nasycenou kapalinu při teplotě t_2 [°C] na konci havárie. A V_4 [m³/kg] je měrný objem páry při teplotě t_2 [°C] na konci havárie. V_c [m³] je součet objemu kontejnmentu s objemem primárního okruhu a m_v [kg] je celkové množství vody na počátku havárie ze vzorce č. (6.5). [26]

Výsledná teplota v kontejnmentě $t_2 = 138$ [°C] byla odhadnuta na základě analýzy LOCA havárie provedené Farzadem Choodbarem Rahimem, z tabulek byl pak odečten příslušný tlak vody $p_v = 340$ [kPa]. [23, 26]

Parciální tlak vzduchu po havárii:

$$p_{vz} = \frac{m_{vz} \cdot r \cdot T_2}{V_c} \text{ [kPa]} \quad (6.7)$$

$$p_{vz} = \frac{34395 \cdot 287,1 \cdot 411,15}{29400} = 138 \text{ [kPa]}$$

Kde m_{vz} [kg] je hmotnost vzduchu v kontejnmentě, r [J/(kgK)] je měrná plynová konstanta, V_c [m³] je součet vzduchového objemu kontejnmentu a objemu primárního okruhu a T_2 [K] je konečná teplota v kontejnmentě.

Celkový tlak v kontejnmentě pak určíme následujícím součtem:

$$p_{\text{celk}} = p_v + p_{vz} \text{ [kPa]} \quad (6.8)$$

$$p_{\text{celk}} = 340 + 138 = 478 \text{ [kPa]}$$

Kde p_v [kPa] je výsledný tlak vody v kontejnmentě a p_{vz} [kPa] je parciální tlak vzduchu po havárii ze vzorce č. (6.7).

Na konci jaderné havárie spojené s roztržením primárního potrubí bude v kontejnmentě tlak 478 [kPa] při teplotě 138 [°C] a suchosti páry 0,52 [1].

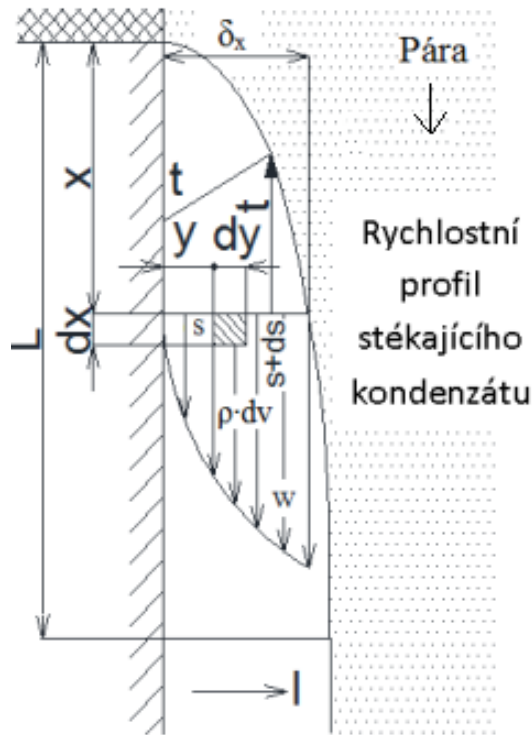
Uvedený výpočet uvažuje s nejhorší variantou, při které se veškerá voda v kontejnmentě vypaří.

6.2 Výpočet kondenzace par

Odvod skupenského tepla kondenzačního z fázového rozhraní vrstvou kondenzátu do ochlazovacího prostoru má na množství zkondenzované páry největší vliv. Tento odvod je podmíněn tepelným odporem vrstvy kondenzátu, který závisí na tloušťce vrstvy a intenzitě proudění. [16, 17]

Páry kapaliny, které nesmáčí materiál kondenzačního povrchu, kondenzují ve formě kapiček, které se při pohybu shlukují do větších kapek. Převážná část povrchu je prakticky holá. Součinitel prostupu tepla je při kapkové 2 až 20 krát vyšší než při kondenzaci blánové. Zajištění podmínek pro dlouhodobou existenci kapkové kondenzace v průmyslovém měřítku je velmi náročné. Protože nejsou k dispozici ani vhodné materiály kondenzačních ploch, ani výpočtové vztahy, uvažujeme při výpočtu vždy kondenzaci blánovou. Film stéká vlastní tíhou dolů a je doplněn novou kondenzující párou. [16, 17]

Z důvodu vyšší hodnoty součinitele přestupu tepla, budeme uvažovat souproude proudění páry a stékajícího filmu zkondenzované kapaliny. Blánovou kondenzaci zobrazuje obr. č. 6.1. [17]



Obr. č. 6.1 Blánová kondenzace [17]

Řešení přestupu tepla při blánové kondenzaci provedl Nusselt v roce 1916:

$$Nu = 0,943 \cdot \left(\frac{Gr \cdot Pr}{Ja} \right)^{0,25} [1] \quad (6.9)$$

Kde Gr [1] je Grashofovo kritérium, Pr [1] Prandtlovo kritérium určeno pro střední teplotu zkondenzované vrstvy kapaliny 120 [°C] a Ja [1] je Jakobovo kritérium. [26]

Grashofovo kritérium:

$$Gr = g \cdot \frac{L^3 \cdot (\rho_1 - \rho_2)}{v^2 \cdot \rho_1} [1] \quad (6.10)$$

Kde g [m/s^2] je gravitační zrychlení, L [m] je výška teplosměnné plochy kondenzátoru a v [m^2/s] je kinematické viskozita zkondenzované vrstvy kapaliny. Dále $\rho_1 = 949,9$ [kg/m^3] je hustota kapaliny a $\rho_2 = 0,97$ [kg/m^3] je hustota suché páry. [26]

Kinematická viskozita:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho_1} [\text{m}^2/\text{s}] \quad (6.11)$$

$$\nu = \frac{2,4 \cdot 10^{-4}}{946,9} = 2,53 \cdot 10^{-7} [\text{m}^2/\text{s}]$$

Kde η [Pas] je dynamická viskozita zkondenzované vrstvy kapaliny, při střední teplotě vrstvy 120 [°C], ρ_1 [kg/m³] je pak hustota kapaliny. [26]

Nyní můžeme z rovnice č. (6.10) vypočítat Grashofovo kritérium:

$$\text{Gr} = 9,81 \cdot \frac{6^3 \cdot (946,9 - 0,97)}{(2,53 \cdot 10^{-7})^2 \cdot 946,9} = 330 \cdot 10^{14} [1] \quad (6.12)$$

Jakobovo Kritérium:

$$\text{Ja} = \frac{c_p (t_s - t_w)}{l} [1] \quad (6.13)$$

$$\text{Ja} = \frac{4,23 \cdot (115,15 - 50)}{2215,6} = 0,126 [1]$$

Kde c_p [kJ/(kgK)] je měrná tepelná kapacita kapalné fáze, t_s [°C] je teplota suché páry při daném tlaku, teplota stěny trubky je t_w [°C]. Dále latentní teplo l [kJ/kg] je rozdíl entalpií plynné a kapalné fáze. [26]

Následně můžeme vypočítat Nusseltovo kritérium z rovnice č. (6.9):

$$\text{Nu} = 0,943 \cdot \left(\frac{330 \cdot 10^{14} \cdot 1,5}{0,126} \right)^{0,25} = 23608,6 [1] \quad (6.14)$$

Součinitel přestupu tepla při blánové kondenzaci:

$$\alpha = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda}{L} [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})] \quad (6.15)$$

$$\alpha = \frac{23608,6 \cdot 0,68}{6} = 2675,6 [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})]$$

Kde λ [W/(mK)] je tepelná vodivost kapalné fáze Nu [1] je Nusseltovo kritérium z rovnice č. (6.14) a L [m] je výška teplosměnné plochy. [26]

6.3 Množství zkondenzované páry

Parafínové kondenzátory budou umístěny po obvodu stěny kontejnmentu o vnitřním průměru 45 [m] v množství $n = 30$ [1].

V kondenzátoru vyrobeném z plastických hmot bude v trubkonvici 2000 trubek, délka trubky bude 6000 [mm] a průměr 32 x 3 [mm].

Teplosměnná plocha trubky je tedy 0,602 [m²] a při počtu trubek 2000 je celková plocha 1204 [m²].

Objem parafínu uvnitř trubky je 0,00318 [m³], celkově je ve výměníku 6,36 [m³] parafínu.

Měrný tepelný tok při kondenzaci páry:

$$q = \alpha \cdot (t_s - t_w) \text{ [kW/m}^2\text{]} \quad (6.16)$$

$$q = 2675,6 \cdot (115 - 50) = 174,3 \text{ [kW/m}^2\text{]}$$

Kde α [kW/m²] je součinitel přestupu tepla ze vzorce č. (6.15). Dále t_s [°C] je teplota suché páry při daném tlaku a teplota stěny trubky je t_w [°C].

Tepelný výkon výměníku:

$$Q_v = q \cdot S \text{ [kW]} \quad (6.17)$$

$$Q_v = 171 \cdot 1204 = 209857 \text{ [kW]}$$

Kde q [kW/m²] je měrný tepelný tok při kondenzaci páry ze vzorce č. (6.16) a S [m²] je teplosměnná plocha výměníku.

Hmotnostní tok zkondenzované páry pro jeden výměník:

$$\dot{m} = \frac{Q_v}{l} \text{ [kg/s]} \quad (6.18)$$

$$\dot{m} = \frac{209857}{2215,6} = 94,7 \text{ [kg/s]}$$

Kde Q_v [kW] je tepelný výkon výměníku ze vzorce č. (6.17) a l [kJ/kg] je latentní teplo, které tvoří rozdíl mezi entalpií plynné a kapalně fáze. [26]

Celkový hmotnostní tok zkondenzované páry:

$$\dot{m}_{\text{celk}} = \frac{Q_v \cdot n}{l} \text{ [kg/s]} \quad (6.19)$$

$$\dot{m}_{\text{celk}} = \frac{209857 \cdot 30}{2215,6} = 2841,5 \text{ [kg/s]}$$

Kde Q_v [kW] je tepelný výkon výměníku ze vzorce č. (6.17), n [1] je počet výměníků v kontejnmentu a l [kJ/kg] je latentní teplo, které tvoří rozdíl mezi entalpií plynné a kapalně fáze. [26]

Čas kondenzace páry:

$$\tau = \frac{m_v}{\dot{m}_{\text{celk}}} \text{ [s]} \quad (6.20)$$

$$\tau = \frac{105959}{2841,5} = 37,3 \text{ [s]}$$

Kde m_v [kg] je hmotnost vody v kontejnmentě ze vzorce č. (6.5) a \dot{m}_{celk} [kg/s] je celkový hmotnostní tok zkondenzované páry ze vzorce č. (6.19).

6.4 Doba tavení parafínu

Předané teplo během jednoho časového kroku:

$$q_1 = Q_v \cdot \Delta\tau \text{ [kJ]} \quad (6.21)$$

$$q_1 = 209857 \cdot 1 = 209857 \text{ [kJ]}$$

Kde Q_v [kW] je tepelný výkon výměníku ze vzorce č. (6.17) a $\Delta\tau$ [s] je zvolený časový krok ohřevu.

Hmotnost parafínu v trubkách:

$$m_{\text{pt}} = \rho_p \cdot V_{\text{pt}} \text{ [kg]} \quad (6.22)$$

$$m_{\text{pt}} = 825 \cdot 6,36 = 5247 \text{ [kg]}$$

Kde V_{pt} [m³] je objem parafínu v trubkách a ρ_p [kg/m³] je průměrná hustota parafínu v tuhé a kapalně fázi. [14]

Uvažujeme, že při počáteční teplotě 27 [°C] je měrná entalpie parafínu rovna 0 [kJ/kg], pak se tedy entalpie parafínu před prvním časovým krokem určí následovně:

$$I_0 = i_0 \cdot m_{pt} \text{ [kJ]} \quad (6.23)$$

$$I_0 = 0 \cdot 5247 = 0 \text{ [kJ]}$$

Kde i_0 [kJ] je měrná entalpie parafínu při počáteční teplotě a m_{pt} [kg] je hmotnost parafínu v trubkách ze vzorce č. (6.22).

Entalpie parafínu po prvním kroku:

$$I_1 = I_0 + q_1 \text{ [kJ]} \quad (6.24)$$

$$I_1 = 0 + 209857 = 209857 \text{ [kJ]}$$

Kde I_0 [kJ] je entalpie před prvním časovým krokem ze vzorce č. (6.23) a q_1 [kJ] je předané teplo během jednoho časového kroku ze vzorce č. (6.21).

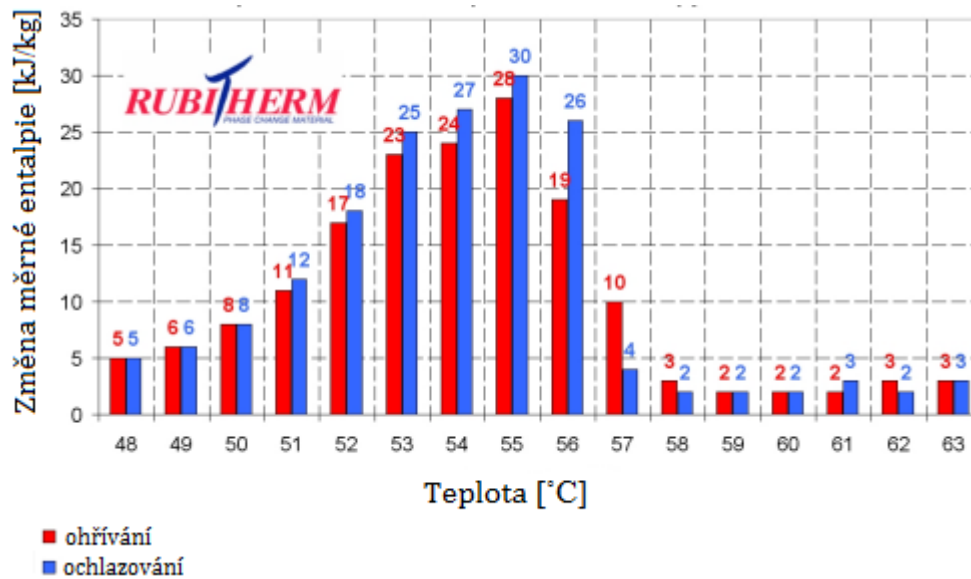
Měrná entalpie parafínu po prvním kroku:

$$i_1 = \frac{I_1}{m_{pt}} \text{ [kJ/kg]} \quad (6.25)$$

$$i_1 = \frac{209857}{5247} \doteq 40 \text{ [kJ/kg]}$$

Kde I_1 [kJ] je entalpie parafínu po prvním časovém kroku z rovnice č. (6.24) a m_{pt} [kg] je hmotnost parafínu v trubkách z rovnice č. (6.22).

K této hodnotě pak z grafu č. 6.1 vyplývá hodnota teploty parafínu po prvním časovém kroku a to 51,6 [°C]. Tab. č. 6.2 pak ukazuje vypočtené hodnoty pro další časové kroky, do doby než parafín dosáhne zaručené teploty tání a to 57 [°C]. [14]



Graf č. 6.1 závislost změny entalpie na teplotě pro parafin RT 55 [14]

Tab. č. 6.2 vypočtené hodnoty pro jednotlivé časové kroky parafinu RT 55

časový krok [s]	entalpie [kJ]	měrná entalpie [kJ/kg]	teplota [°C]
0.	0	0	27
1.	209857	40	51,6
2.	419737	80	53,4
3.	629617	120	54,9
4.	839497	160	61

Interpolací hodnot z tabulky byla zjištěna doba do dosažení 1 [kg] parafinu RT 55 teploty 57 [°C] a to $\tau_{55} = 3,34$ [s/kg].

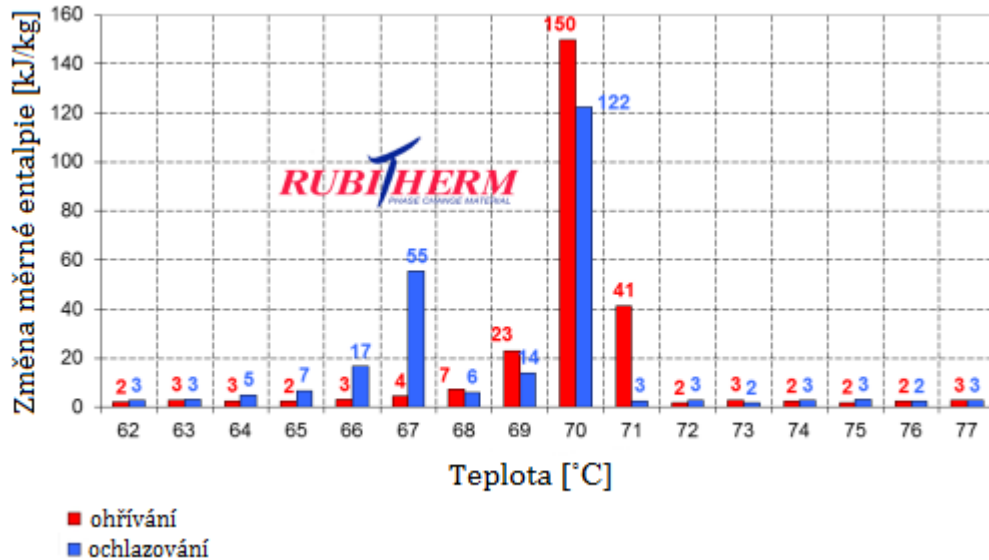
Celková doba přechodového procesu spojeného s kondenzací par pro parafin RT 55:

$$\tau_{\text{celk55}} = \frac{m_{pz} + m_{pt}}{m_{pt}} \cdot \tau_{55} \text{ [s]} \quad (6.26)$$

$$\tau_{\text{celk55}} = \frac{23655 + 5247}{5247} \cdot 3,34 \doteq 18,4 \text{ [s]}$$

Kde m_{pz} [kg] je hmotnost parafinu v zásobníku, m_{pt} [kg] je hmotnost parafinu v trubkách z rovnice č. (6.22) a τ_{55} [s/kg] je doba 1 [kg] parafinu RT 55 do dosažení teploty 57 [°C].

Obdobně byly spočteny i hodnoty pro parafin RT 70HC, jehož závislost změny měrné entalpie na teplotě ukazuje graf č. 6.2. Jelikož má parafin RT 70HC stejnou hustotu jako parafin RT 55, jsou hodnoty entalpie a měrné entalpie po časovém kroku 1 [s] totožné, liší se pouze jejich odpovídající teploty, jak ukazuje tab. č. 6.3. [14]



Graf č. 6.2 závislost změny entalpie na teplotě pro parafin RT 70HC [14]

Tab. č. 6.3 vypočtené hodnoty pro jednotlivé časové kroky parafinu RT 70HC

časový krok [s]	entalpie [kJ]	měrná entalpie [kJ/kg]	teplota [°C]
0.	0	0	27
1.	209857	40	68,7
2.	419737	80	69,22
3.	629617	120	69,49
4.	839497	160	69,75
5.	839520	200	70,07
6.	1049400	240	72

Interpolací hodnot z tabulky byla zjištěna doba do dosažení 1 [kg] parafinu RT 70HC teploty 71 [°C] a to $\tau_{70} = 5,48$ [s/kg].

Celková doba přechodového procesu spojeného s kondenzací par pro parafin RT 70HC:

$$\tau_{\text{celk70}} = \frac{m_{pz} + m_{pt}}{m_{pt}} \cdot \tau_{70} \text{ [s]} \quad (6.27)$$

$$\tau_{\text{celk70}} = \frac{23655 + 5247}{5247} \cdot 5,48 \doteq 30,2 \text{ [s]}$$

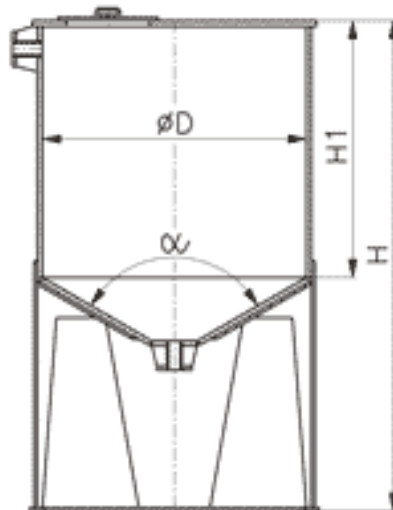
Kde m_{pz} [kg] je hmotnost parafinu v zásobníku, m_{pt} [kg] je hmotnost parafinu v trubkách z rovnice č. (6.22) a τ_{70} je doba 1 [kg] parafinu RT 70 HC do dosažení teploty 71 [°C].

7. Konstrukční materiál kondenzátoru

Pro konstrukční materiál výměníku byl vybrán plast ze série E firmy Celanese. Tato série disponuje vysokou tepelnou vodivostí a to až do $\lambda = 100$ [W/(mK)]. Konkrétně byl zvolen vysoce vodivý polypropylen E 1201. [19]

Jedná se o speciální materiál, který lze mimo jiné použít i pro konstrukci tepelných výměníků. Pevnost v tahu je uvedena jako 22 [MPa], teplotní roztažnost je 0,6 [%] a pevnost v ohybu 37 [MPa]. [19]

Celá konstrukce bude svařovaná a usazená v ocelovém stojanu. Hlavní nádrž bude dodána firmou AVT, s. r. o., která se výrobou nádrží z plastických hmot zabývá. Firma nabízí tři konstrukční varianty. Pro náš případ byla zvolena varianta typu A (viz. Obr. č. 7.1). Jedná se o jednoduchou variantu ustavení plastové nádrže v ocelovém podstavci. Podstavcem pak povedou trubky pro odvod roztaveného parafinu a zkondenzované páry. Je důležité, aby roztavený parafin nepřišel do kontaktu se zkondenzovanou párou, protože kondenzát lze posléze použít i pro napájení aktivního chlazení systémem sprch. Při smíchání kondenzátu a rozpuštěného parafinu by mohlo dojít k ucpání sprch. [20]



Obr. č. 7.1 Varianta typu A usazení nádrže [20]

Nádoba spolu se zásobníkem budou opatřeny povrchovými podélnými žebry, aby se zabránilo jejich zborcení. Provedení žeber bude velice podobné jako na obr. č. 7.2, žebra ale povedou podél válcové plochy ve směru zatížení.



Obr. č. 7.2 Žebrování plastové nádoby [22]

7.1 Pevnostní výpočet

Tlaková síla:

$$F = (m_{pz} + m_{pt}) \cdot g \text{ [N]} \quad (7.1)$$

$$F = (23655 + 5247) \cdot 9,81 \doteq 283529 \text{ [N]}$$

Kde m_{pz} [kg] je hmotnost parafinu v zásobníku, m_{pt} [kg] je hmotnost parafinu v trubkách z rovnice č. (6.22) a g [m/s^2] je gravitační zrychlení.

Kontrolní plocha:

$$S_k \doteq \pi \cdot d \cdot t \text{ [m}^2\text{]} \quad (7.2)$$

$$S_k \doteq \pi \cdot 3,5 \cdot 0,015 = 0,1649 \text{ [m}^2\text{]}$$

Kde d [m] je vnitřní průměr kondenzátoru a t [m] je tloušťka stěny kondenzátoru.

Ověření pevnosti v tlaku:

$$\sigma_{tlak} = \frac{F}{S_k} \leq \sigma_{dov} \text{ [MPa]} \quad (7.3)$$

$$\sigma_{tlak} = \frac{283529}{0,1649} = 1719399,6 \text{ [Pa]} \doteq 1,72 \text{ [MPa]} \leq 39,6 \text{ [MPa]}$$

Pevnost v tlaku je tedy dodržena s bezpečností 23 [1].

Kde F [N] je tlaková síla z rovnice č. (7.1), S_k [m^2] je kontrolní plocha z rovnice č. (7.2) a σ_{dov} [MPa] je dovolené namáhání v tlaku pro plast PP. [21]

8. Závěr

Cílem práce bylo navrhnout pasivní havarijní kondenzátor pro snížení teplotní a tlakové špičky v případě LOCA havárie jaderné elektrárny. Na místo konvenčního ledu byl uvažován parafín, čímž odpadají náklady nutné k chlazení ledu. Velkou nevýhodou ledu je i možnost jeho roztečení v případě poruchy chladicího systému.

Pro konstrukci výměníku byl zvolen speciální plast z důvodu jeho nízké hmotnosti a vysoké tepelné vodivosti. Při výpočtu součinitele přestupu tepla bylo tedy možné vzhledem k nízkému tepelnému odporu a relativně malé tloušťce jednotlivých trubek tepelný odpor plastu zanedbat.

Kvůli složitosti zajištění kondenzace kapkové se součinitel přestupu tepla určil pro případ kondenzace blánové, tedy že teplosměnná plocha bude po celou dobu kondenzace pokryta souvislým filmem kondenzátu. Z důvodu lepšího přestupu tepla byl výměník uvažován jako souproudý, pára bude tudíž proudit shora dolů spolu se vznikajícím kondenzátem.

Na místo ledu byly zvoleny dva druhy parafínu a to parafín RT 55 a RT 70HC od firmy Rubitherm. Druhý ze jmenovaných parafínů dokáže naakumulovat značné množství tepla kolem své teploty tání, dá se však předpokládat, že jeho cena bude vyšší, než je tomu u parafínu RT 55.

9. Seznam použité literatury

- [1] Habrman, Petr a Lumír Kuchař. *Základy Jaderné energetiky a bezpečnosti*. Ostrava: VŠB v Ostravě, 1988
- [2] ČEZ, a. s.. *Vstupní školení do jaderné elektrárny Dukovany* [online]. 2009. [cit. 2015-11-21]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/file/o-spolecnosti/prodovavatele/pravidla-chovani/sd-edu/skripta-pro-vstupni-a-opakovaci-skoleni-dodavatelu.pdf>
- [3] Kolat, Pavel, David Tomášek. *Jaderná energetika* [online]. 2012. [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: https://kke.zcu.cz/about/projekty/enazp/projekty/18_Zaklady-ekologie_48-49/48_IUT/111_Jaderna-energetika—Kolat—P3.pdf
- [4] Kaščejev, Vladimír, Valentin Levandyj, Eduard Wild. *Jadrová energia Minulosť, súčasnosť a budúcnosť*. Bratislava: Alfa, 1990. ISBN 80-05-00605-5
- [5] *Jaderná energetika životní prostředí a člověk*. Praha: Ústřední informační středisko pro jaderný program, 1986
- [6] Technologie a bezpečnost. *Skupina ČEZ*. [online]. 21.11.2015 [cit. 2015-11-21]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/jaderna-energetika/jadernernelektrarny-cez/edu/technologie-a-zabezpeceni.html>
- [7] Raček, Jiří. *Energetická zařízení: stroje a zařízení jaderných elektráren*. Brno: Ústav Elektroenergetiky, 2004
- [8] Bezpečnost jaderných elektráren. *Skupina ČEZ*. [online]. 21.11.2015 [cit. 2015-11-21]. Dostupné z: http://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/03/bezpecnost_2.html
- [9] Matal, Oldřich. *Jaderné reaktory a jejich chlazení*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 2001. ISBN 80-214-2028-6.
- [10] Sklenářová, Lenka. *Možnosti aplikace systémů s akumulací tepla v jaderné energetice*. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2003.
- [11] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Assessment and management of ageing of majornuclear power plant componentsimportant to afety: Concrete containment buildings*. Vídeň: IEA, 1998

- [12] Havárie spojené se ztrátou chladiva (LOCA) . *ATOM INFO*. [online]. 21.11.2015 [cit. 2015-11-21]. Dostupné z: <http://atominfo.cz/2013/12/havarie-spojene-se-ztratou-chladiva/>
- [13] Pluške, Zbyněk. *Možnosti zvyšování jaderné bezpečnosti pro koncept pasivního systému s ledními kondenzátory v případě LOCA havárie*. Diplomová práce. Brno: Fakulta strojního inženýrství, 2012.
- [14] Organic PCM-RT. *Rubitherm*. [online]. 28.12.2015 [cit. 2015-12-28]. Dostupné z: <http://www.rubitherm.eu/en/index.php/productcategory/organische-pcm-rt>
- [15] Martinec, Jiří, Karel Katovský, Cable Kurwitz. *Možnosti akumulace a odvodu tepla pro havarijní události typu LOCA v jaderných elektrárnách*, 2015.
- [16] Blahož, Vladimír, Zdeněk Kadlec. *Základy sdílení tepla*. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2000. ISBN 80-902001-1-7.
- [17] KALČÍK, Josef a Karel SÝKORA. *Technická termomechanika: Učebnice pro vys. školy*. 1. vyd. Praha: Academia, 1973.
- [18] Zavoralová, Pavla. *PCM ve stavebnictví Díl 1: Základní charakteristiky PCM*. *TZB-INFO*. [online]. 20.4.2016 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/izolace-strechy-fasady/7360-pcm-ve-stavebnictvi-dil-1-zakladni-charakteristiky-pcm>
- [19] CoolPoly E-series – Thermally & Electrically Conductive Plastics. *Celanese, The chemistry inside innovation*. [online]. 20.4.2016 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://www.coolpolymers.com/eseries.asp>
- [20] Nádrže válcové stojaté s kuželovým dnem. *AVT, s.r.o. - Technologická zařízení z plastů*. [online]. 20.4.2016 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://www.avthk.cz/nadrze-valcove-stojate-s-kuzelovym-dnem-vsk.html>
- [21] E-konstruktor. *Plasty – mechanické vlastnosti*. [online]. 20.4.2016 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/plasty-mechanicke-vlastnosti>
- [22] Plastové jímky na dešťovou vodu, nádrže na dešťovou vodu. *Eco Aqua Shop*. [online]. 20.4.2016 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://www.eco-aqua-shop.cz/zasobniky-nadrze-jimky-na-destovou-vodu>
- [23] Rahim, Farzad Choobdar. *Analysis of Containment Volume Effect on the Pressure and temperature during LOCA in the AP1000 Reactor Containment*

[online]. 2012. [cit. 2016-04-20]. Dostupné z:

www.ijnese.org/Download.aspx?ID=4852

- [24] Hejzlar, Radko. *Stroje a zařízení jaderných elektráren*. Praha: Vydavatelství ČVUT v Praze, 2005. ISBN 80-01-03189-6.
- [25] Hezoučký, František, Pavel Kaňovský, Ján Naňo. *Základy teorie provozních režimů jaderných elektráren s tlakovodními reaktory*. Praha: Vydavatelství ČVUT v Praze, 2005. ISBN 80-01-03324-4.
- [26] Kadlec, Zdeněk. *Průvodce sdílením tepla pro požární specialisty*. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2009. ISBN 978-80-7385-061-6.

10. Seznam obrázků

Obr. č. 2.1 Schéma primárního okruhu [2]	12
Obr. č. 2.2 Štěpení těžkého jádra neutronem [2]	13
Obr. č. 2.3 Typy jaderných reaktorů [5]	14
Obr. č. 2.4 Svislý parogenerátor [9].....	15
Obr. č. 2.5 Schéma povrchového kondenzátoru [7]	17
Obr. č. 3.1 Kontejnmenty s reaktorem PWR [11]	21
Obr. č. 3.2 Kontejnment Mark I [10].....	22
Obr. č. 4.1 Schéma kontejnmentu s ledovým kondenzátorem [13].....	24
Obr. č. 4.2 Ledový kondenzátor [10].....	25
Obr. č. 5.1 Schéma experimentálního zařízení [15]	27
Obr. č. 5.2 Experimentální zařízení v laboratoři [15].....	28
Obr. č. 5.3 Rozdělení PCM materiálů [18]	29
Obr. č. 6.1 Blánová kondenzace [17].....	35
Obr. č. 7.1 Varianta typu A usazení nádrže [20]	43
Obr. č. 7.2 Žebrování plastové nádoby [22]	43

11. Seznam grafů

Graf č. 6.1 Závislost změny entalpie na teplotě pro parafín RT 55 [14].....	40
Graf č. 6.2 Závislost změny entalpie na teplotě pro parafín RT 70HC [14].....	41

12. Seznam tabulek

Tab. č. 6.1 Zadané parametry	31
Tab. č. 6.2 vypočtené hodnoty pro jednotlivé časové kroky parafínu RT 55	40
Tab. č. 6.3 vypočtené hodnoty pro jednotlivé časové kroky parafínu RT 70HC	41

13. Seznam příloh

Příloha č. 1: Havarijný kondenzátor (výkres sestavy), č. dokumentu:
PEZ01-GLA0032-01

Poděkování

Zde bych rád poděkoval panu prof. Ing. Pavlu Kolatovi, DrSc. za vstřícnou pomoc a cenné rady při zpracování bakalářské práce.