

Bakalářská práce



České  
vysoké  
učení technické  
v Praze

**F3**

Fakulta elektrotechnická

## **Malé modulární reaktory a jejich možné uplatnění v energetice České republiky**

Michal TŮMA

Vedoucí práce: Mgr. Ing. Vít Klein, Ph.D.  
2023



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Tůma** Jméno: **Michal** Osobní číslo: **491875**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávací katedra/ústav: **Katedra elektroenergetiky**  
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**  
Specializace: **Aplikovaná elektrotechnika**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Malé modulární reaktory a jejich možné uplatnění v energetice České republiky.**

Název bakalářské práce anglicky:

**Small modular reactors and their possible application in the energy industry of the Czech Republic.**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Konstrukce malých modulárních reaktorů.
- 2) Hlavní parametry malých modulárních reaktorů.
- 3) Možnosti použití malých modulárních reaktorů v České republice.
- 4) Závěrečná doporučení.

Seznam doporučené literatury:

- 1) Malé jaderné reaktory. [Online] <http://malereaktory.cz/smr-ve-svete>
- 2) Small Nuclear Power Reactors. [Online], <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx>
- 3) Advanced Small Modular Reactors. [Online] <https://www.energy.gov/ne/advanced-small-modular-reactors-smrs>
- 4) Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities. [Online] [https://www.oecd-nea.org/jcms/pl\\_57979/small-modular-reactors-challenges-and-opportunities](https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_57979/small-modular-reactors-challenges-and-opportunities)

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Mgr. Vít Klein, Ph.D. katedra elektroenergetiky FEL**

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

Datum zadání bakalářské práce: **01.02.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **20.05.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2023**

Ing. Mgr. Vít Klein, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Zdeněk Müller, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta



# Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou bakalářskou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 9. 12. 2022

Michal Tůma



## Poděkování

Rád bych zde poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Mgr. Ing. Vítu Kleinovi, Ph.D., za jeho podnětné rady, podporu a čas, který mi věnoval. Velmi si cením, že zajistil zprostředkování schůzek s Ing. Viktorem Černým, místopředsedou představenstva a výkonným ředitelem Elektrárny Temelín II, a. s., kterému tímto rovněž děkuji za cenné informace a věnovaný čas.

Závěrem bych chtěl poděkovat rodině a přátelům za podporu.

Michal Tůma





## Abstrakt

Tato bakalářská práce se věnuje malým modulárním reaktorům. Práce se nejdříve zabývá základními principy, které jsou využívány u malých modulárních reaktorů. Dále jsou popsány konstrukce jednotlivých typů reaktorů včetně jejich parametrů. Druhá polovina práce zkoumá možnosti využití malých modulárních reaktorů jednak v energetice České republiky a jednak jejich využití v neelektrických aplikacích. Dále práce nastiňuje silné a slabé stránky malých modulárních reaktorů a popisuje nejpodstatnější rizika a příležitosti pro nasazení malých modulárních reaktorů. Hodnocení je provedeno formou kvantitativní SWOT analýzy. Výsledky této SWOT analýzy potom slouží pro formulaci doporučení pro úspěšné nasazení malých modulárních reaktorů obecně a pro Českou republiku zvlášť.

**Klíčová slova:** ČEZ, malé modulární reaktory, reaktor, SMR, SMR pro Českou republiku, SWOT analýza pro SMR

## Abstract

This bachelor's thesis is devoted to small modular reactors. The work first deals with basic principles that are used in small modular reactors. Furthermore, the construction of individual types of reactors are described including their parameters. The second half of the thesis explores implementation possibilities of small modular reactors both in the energy industry of the Czech Republic and in non-electrical applications. The work outlines strengths and weaknesses of small modular reactors and describes the most significant risks and opportunities affecting introduction of small modular reactors. The evaluation is carried out in the form of a quantitative SWOT analysis. Results of the SWOT analysis are then reformulated into recommendations for the successful deployment of small modular reactors in general and for the Czech Republic in particular.

**Keywords:** CEZ, small modular reactors, reactor, SMR, SMR for the Czech Republic, SWOT analysis for SMR



# Obsah

Seznam použitých zkratk.....	III
Seznam tabulek .....	IV
Seznam obrázků .....	V
ÚVOD.....	1
1. Jaderné síly a jaderná energie.....	2
1.1. Jaderná síla.....	2
1.2. Vazebná energie atomu .....	3
1.3. Separční energie atomu.....	4
1.4. Štěpná reakce .....	5
1.5. Štěpné produkty.....	7
1.6. Záření $\alpha$ , $\beta$ , $\gamma$ .....	8
1.7. Moderátor .....	8
1.8. Chladicí médium.....	9
1.9. Kritické množství a multiplikační faktor.....	9
2. Malé modulární reaktory.....	11
2.1. Definice malých modulárních reaktorů.....	11
2.2. Proč se zabývat malými modulárními reaktory – ekonomické hledisko.....	11
2.3. Přepočtené náklady na energii (LCOE) pro malé modulární reaktory.....	13
2.4. Současný stav vývoje malých modulárních reaktorů.....	13
3. Konstrukce vodou chlazených malých modulárních reaktorů.....	14
3.1. Tlakovodní reaktory (PWR).....	14
3.2. Varné reaktory (BWR).....	18
3.3. Těžkovodní reaktory (PHWR) .....	20
4. Konstrukce pokročilých malých modulárních reaktorů.....	22
4.1. Vysokoteplotní reaktory chlazené plynem a grafitem moderované (HTGR) .....	22
4.2. Rychlé reaktory (FNR).....	24
4.3. Reaktory založené na roztavených solích (MSR).....	26
5. Parametry malých modulárních reaktorů.....	28
5.1. Výstupní teploty chladicího média pro jednotlivé typy SMR.....	28
5.2. Délka palivové kampaně .....	29
5.3. Integrovaná / smyčkové uspořádání.....	29
5.4. Ochrana do hloubky (Defense in Depth).....	30
5.5. Pasivní bezpečnostní systémy .....	30

6.	Možnosti uplatnění malých modulárních reaktorů v České republice .....	32
6.1.	Elektrické energie.....	32
6.2.	Podpůrné služby.....	33
6.3.	Vodík.....	33
6.4.	Další možné aplikace malých modulárních reaktorů .....	35
6.5.	Shrnutí využitelnosti malých modulárních reaktorů .....	35
7.	Závěrečné doporučení.....	37
7.1.	Kvantitativní SWOT analýza pro malé modulární reaktory.....	37
7.2.	Vymezení pojmů pro SWOT analýzu.....	37
7.2.1.	Silné stránky malých modulárních reaktorů .....	37
7.2.2.	Slabé stránky malých modulárních reaktorů .....	38
7.2.3.	Příležitosti pro malé modulární reaktory.....	38
7.2.4.	Rizika pro malé modulární reaktory.....	39
7.3.	Výsledná SWOT analýza .....	40
7.4.	Malé modulární reaktory v etapách.....	42
7.4.1.	Etapa I.....	42
7.4.2.	Etapa II.....	42
7.4.3.	Etapa III.....	42
7.5.	Celkové doporučení pro malé modulární reaktory.....	43
7.6.	Doporučení pro Českou republiku .....	44
7.7.	První malý modulární reaktor v České republice.....	45
7.7.1.	Technologické kritérium .....	45
7.7.2.	Kritérium zapojení českého průmyslu.....	46
7.7.3.	Kritérium ceny investice .....	47
7.7.4.	Závěrečné doporučení pro výběr prvního malého modulárního reaktoru.....	47
	Závěr.....	48
	Zdroje:.....	49

## Seznam použitých zkratek

BWR	Boiling water reactor, varný reaktor
ČR	Česká republika
FBR	Fast breeder reactor, rychlý množivý reaktor
FNR	Fast neutron reactor, rychlý reaktor
FOAK	First of a kind, první svého druhu
HTGR	High temperature gas reactor, vysokoteplotní plynem chlazený reaktor
HWR	Heavy water reactor, těžkovodní reaktor
LCOE	Levelized cost of energy, přepočtené náklady na energii
LWR	Light water reactor, lehkovodní reaktor
MSR	Molten salt reactor, reaktor založený na roztavených solích
MWe	Výkon elektrický v megawattech
MWt	Výkon tepelný v megawattech
OZE	Obnovitelné zdroje energie
PHWR	Pressure heavy water reactor, tlakovodní těžkou vodou chlazený reaktor
PWR	Pressure water reactor, tlakovodní lehkou vodou chlazený reaktor
SMR	Small modular reactor, malý modulární reaktor

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Kvantitativní SWOT analýza.....	40
Tabulka 2: Zvažované typy SMR pro jadernou elektrárnu Temelín.....	45
Tabulka 3: Parametry zvažovaných SMR a zjednodušené hodnocení designů .....	46

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Průběh štěpné reakce uranu .....	6
Obrázek 2: Kompenzace úspor z rozsahu u SMR .....	12
Obrázek 3: Tlakovodní reaktor (PWR).....	15
Obrázek 4: Varný reaktor (BWR) .....	18
Obrázek 5: Těžkovodní reaktor (PHWR).....	20
Obrázek 6: Vysokoteplotní plynem chlazený reaktor (HTGR) .....	23
Obrázek 7: Rychlý množivý reaktor (FBR).....	25
Obrázek 8: Možnosti uplatnění jaderné energie.....	32





# ÚVOD

Elektrická energie je motorem současné společnosti. Tato forma energie nás provází v každodenním životě ať v práci, nebo při většině volnočasových aktivit. Současná společnost nemá alternativy k této formě energie, která se snadno přenáší na velké vzdálenosti a velmi snadno se přeměňuje na jiné formy energií. Pro generování elektrické energie využíváme několik typů elektráren. Jedná se o elektrárny spalující fosilní paliva, elektrárny jaderné a elektrárny využívající obnovitelné zdroje energie.

Energetický sektor čelí novým výzvám, kdy na jedné straně je rostoucí poptávka po elektrické energii zapříčiněná rostoucí životní úrovní obyvatel a růstem HDP. Na straně druhé jsou kladeny požadavky na omezování uvolňovaného CO<sub>2</sub> do ovzduší. Přílišné uvolňování skleníkových plynů způsobuje globální oteplování, jež způsobuje změny, které se dotýkají nás všech. To klade požadavky na omezování uhelných a plynových elektráren, které ovšem poskytují potřebný výkon v síti a potřebnou flexibilitu sítě. Jednou z variant, jak tyto zdroje vhodně nahradit, můžou být právě malé modulární reaktory, které poskytnou výkon a flexibilitu, jenž budou zásadní při zvyšování podílu obnovitelných zdrojů na energetickém mixu.

V následujících kapitolách jsou popsány hlavní typy konstrukcí modulárních jaderných reaktorů a základní principy jejich fungování. Další část práce popisuje nejdůležitější parametry malých modulárních reaktorů. Klíčové kapitoly shrnují možnosti uplatnění technologie modulárních jaderných reaktorů v podmínkách energetiky ČR. Výsledky kvantitativní SWOT analýzy potom, slouží jako podklad pro formulaci doporučení pro jejich možné široké uplatnění v energetice vůbec a poté zvláště v podmínkách České republiky.

Motivací k této práci je vyhotovit text, který se pokouší stručně, ale uceleně hovořit o této problematice a čtenáři může poskytnout základní vstupní informace k tématu.

# 1. Jaderné síly a jaderná energie

Úvodem této práce bude přiblíženo, jakých principů je využíváno v jaderných reaktorech. Částečně se také zabývá způsobem, jak je možné spustit jaderné štěpení, druhy vznikajících produktů a jakým způsobem lze využít uvolněnou energii a s čím souvisí.

## 1.1. Jaderná síla

Atom libovolného prvku se skládá z atomového jádra a atomového obalu. V atomovém obalu jsou ve vrstvách záporně nabitě elektrony, které obíhají jádro. Atomové jádro<sup>1</sup> obsahuje kladně nabitě protony a neutrálně nabitě neutrony. Pokud vyjdeme z Coulombova zákona, tak částice o stejném náboji se odpuzují silou o velikosti dle vztahu uvedeného níže.

$$F_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \cdot \frac{|Q_1 \cdot Q_2|}{r^2} = \frac{1}{4\pi \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}} \cdot \frac{|1,602 \cdot 10^{-19}|^2}{(10^{-15})^2} \cong 230,77 \text{ N} \quad (1.1)$$

Coulombův zákon – síla působící na dva protony

kde:

$F_e$ ...Síla působící na obě nabitě částice (N)

$\epsilon_0$ ...Permitivita vakua ( $\text{F} \cdot \text{m}^{-1}$ )

$\epsilon_r$ ...Relativní permitivita (–)

$Q$ ...Elektrický náboj (C)

$r$ ...Vzdálenost mezi částicemi (m)

Z Coulombova zákona nám plyne, že se dva protony odpuzují nezanedbatelnou silou. Tudiž v jádrech atomů existují velké odstředivé síly, které s počtem protonů rostou.<sup>2</sup> Přesto jádra stabilních atomů drží pohromadě. Tento stav je dán tím, že v jádru atomů existuje ještě jedna síla, která je větší než síla elektromagnetická. Touto silou se mezi sebou přitahují protony i neutrony. Zmíněnou sílu nazýváme silou jadernou nebo ji označujeme jako silnou interakci.

O jaderných silách můžeme říci:<sup>3</sup>

Jaderné síly působí na velmi malé vzdálenosti (řádově okolo  $10^{-15}$  m), ale na těchto vzdálenostech překonávají síly elektromagnetické.

Jaderné síly působí mezi protony a neutrony.

Jaderné síly projevují vlastnosti nasycení.

---

<sup>1</sup> Rozměry jádra atomu jsou řádově rovny  $10^{-15}$ .

<sup>2</sup> ENCYKLOPEDIE FYZIKY. Vazebná energie jádra [online].

<sup>3</sup> Tamtéž

## 1.2. Vazebná energie atomu

Nukleony je souhrnné označení pro protony a neutrony. Z protonů a neutronů se skládá jádro atomu. Nukleony v jádru atomu na sebe navzájem působí přitažlivými jadernými silami.

Vazebná energie je rovna energii, kterou je nutné dodat, aby došlo k rozdělení jádra na jednotlivé nukleony. Pokud bychom naopak z těchto nukleonů jádro složily, tak dojde k uvolnění energie. Tuto energii nazýváme energií vazebnou.<sup>4</sup>

Dalo by se předpokládat, že součet klidových hmotností jednotlivých nukleonů je stejný jako hmotnost jádra z nich složeného. Experimentálně bylo zjištěno, že výše uvedené tvrzení není pravdivé a naopak součet klidových hmotností jednotlivých nukleonů je větší než klidová hmotnost jádra z nich složeného. Platí tak následující nerovnost.

$$m_j < Zm_p + Nm_n \quad (1.2)$$

Klidová hmotnost jádra atomu

kde:

$Z$ ...Počet protonů (–)

$N$ ...Počet neutronů (–)

$m_p$ ...Klidová hmotnost protonu (kg)

$m_n$ ... Klidová hmotnost neutronu (kg)

$m_j$ ... Klidová hmotnost jádra (kg)

Rozdíl sumy klidových hmotností samostatných nukleonů a klidové hmotnosti jádra z nich složeného, nazýváme hmotnostní úbytek (nebo také defekt). Vazebná energie souvisí s hmotnostním úbytkem právě přes Einsteinův vztah popisující vztahy mezi energií a hmotou ( $E = mc^2$ ).<sup>5</sup>

$$E_j = \Delta m \cdot c^2 = (Zm_p + Nm_n - m_j) \cdot c^2 \quad (1.3)$$

Vztah pro vazebnou energii

kde:

$E_j$ ...Vazebná energie (eV)

$c$ ...Rychlost světla (m · s)

$\Delta m$ ...Hmotnostní úbytek (kg)

$Z$ ...Počet protonů (–)

$N$ ...Počet neutronů (–)

$m_p$ ...Klidová hmotnost protonu (kg)

$m_n$ ... Klidová hmotnost neutronu (kg)

$m_j$ ... Klidová hmotnost jádra (kg)

---

<sup>4</sup> ENCYKLOPEDIIE FYZIKY. Vazebná energie jádra [online].

<sup>5</sup> Tamtéž

### 1.3. Separační energie atomu

Vazebná energie roste s rostoucím nukleonovým číslem. Pro další analýzu bude vhodnější dále vycházet z energie separační. Ta je definována jako podíl energie vazebné ku počtu nukleonů u zkoumaného prvku. Separační energie pro jednotlivé prvky a výsledná křivka je uvedena na grafu 1.

$$\varepsilon_j = \frac{E_j}{A} \quad (1.4)$$

Vztah pro separační energii

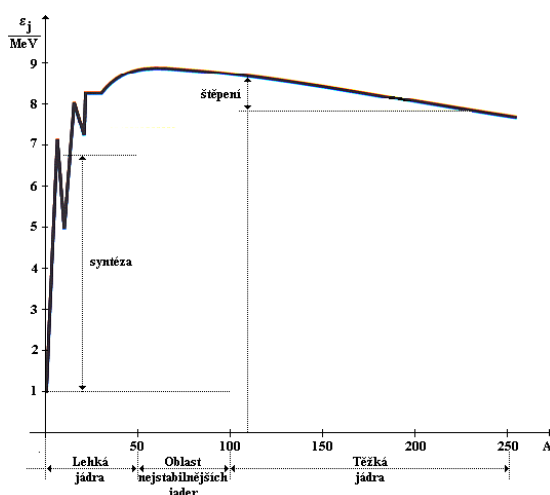
kde:

$\varepsilon_j$ ...Separační energie (eV)

$E_j$ ...Vazebná energie (eV)

$A$ ...Počet nukleonů (–)

Graf 1: Křivka separační energie pro jednotlivé prvky<sup>6</sup>



Jaderná energie, která nás zajímá v této práci, je částí vazebné energie nukleonů. Z uvedeného grafu můžeme vyčíst, že zkoumaná křivka vykazuje maximum. Maximum separační energie nastává u atomu železa. Tímto maximem je křivka rozdělena na dvě poloviny, které mají zásadně odlišné vlastnosti z pohledu způsobu, jakým prvky z daných polovin uvolňují energii.

V první polovině se nacházejí prvky s lehkými jádry. Neboli prvky s nižším nukleonovým číslem<sup>7</sup> než má železo. Prvky z této oblasti uvolňují část své vazebné energie při slučování jader<sup>8</sup>. Je to dáno tím, že nukleony v novém jádru budou vázány silněji než tomu bylo před sloučením. Tímto sloučením dojde k uvolnění potenciální energie, která je daná jadernou silou. Proces slučování lehkých jader za vzniku jader těžších prvků nazýváme fúzí. Termojaderná fúze je proces, který probíhá za vysokých teplot a tlaků. Příkladem tohoto procesu je fúze na slunci. V pozemských podmínkách je fúze zatím ve stádiu výzkumu a vývoje.

<sup>6</sup> ENCYKLOPEDIÉ FYZIKY. Jaderné štěpení [online].

<sup>7</sup> Nukleonové číslo udává počet protonů a neutronů v jádru atomu.

<sup>8</sup> Syntéza jader = slučování atomových jader

Ve druhé polovině křivky se nacházejí prvky s těžkými jádry. Tyto prvky jsou prvky, které mají vyšší nukleonové číslo než železo. Pokud bychom chtěli část vazebné energie získat z těchto prvků, je zapotřebí tyto prvky rozštěpit. Je tomu tak proto, že jaderná síla vykazuje schopnost sycení. Proto, když dojde k rozštěpení těžkého jádra na jádra lehčí, tak nově vzniklá jádra odštěpků jsou vázána silněji. Tímto rozštěpením dojde k uvolnění části potenciální energie. Tento způsob uvolňování energie z jaderného paliva je využíván v současných jaderných blocích a také v malých modulárních reaktorech.

## 1.4. Štěpná reakce

Zásadním objevem pro štěpné reakce bylo zjištění, že neutrony o nižší energii, jež nejsou odpuzovány elektrickými silami můžou vniknout do štěpeného jádra a inicializovat jeho štěpení. O tento objev se zasloužili Otto Hahn, Fritz Strassmann a Lisa Meitnerová roku 1938. První reaktor zkonstruoval tým pod Enricem Fermim a spouštěn byl roku 1942 na půdě Chicagské univerzity.<sup>9</sup>

Vhodné nuklidy pro štěpnou reakci v jaderných reaktorech jsou takové těžké prvky, které vykazují větší nukleonové číslo než je 230. Jsou to prvky, které při svém štěpení uvolňují část své vazebné energie. Tyto prvky vznikají při explozích supernov, při kterých se uloží část energie do jejich jaderných vazeb.

Nuklidy, které v současné době využíváme jako jaderné palivo, vykazují lichý počet nukleonů. Izotopy se sudým počtem nukleonů vykazují velkou stabilitu. Jádra těchto izotopů při srážce s neutronem většinou reagují jeho pohlcením, a proto nejsou vhodné pro štěpné reakce.

Pouze jeden z dnes využívaných nuklidů se vyskytuje volně v přírodě. Jedná se o uran  ${}_{92}^{235}\text{U}$ . Ostatní štěpné materiály vznikají v reaktorech za pomoci neutronového ozařování  ${}_{92}^{238}\text{U}$  a  ${}_{90}^{232}\text{Th}$ .<sup>10</sup>

Nuklidy využívané v dnešních jaderných reaktorech jsou uvedeny níže:<sup>11</sup>

- ${}_{92}^{235}\text{U}$  Uran
- ${}_{94}^{239}\text{Pu}$  Plutonium
- ${}_{92}^{233}\text{U}$  Uran
- ${}_{94}^{241}\text{Pu}$  Plutonium

Jadernou štěpnou reakci spouštíme v jaderných reaktorech s pomocí neutronů, které se srazí s jádrem štěpeného prvku. Tyto neutrony můžeme rozdělit do několika skupin podle jejich energie, a to na neutrony rychlé a tepelné.

---

<sup>9</sup> HEŘMANSKÝ, Bedřich a Ivan ŠTOLL. Energie pro 21. století.

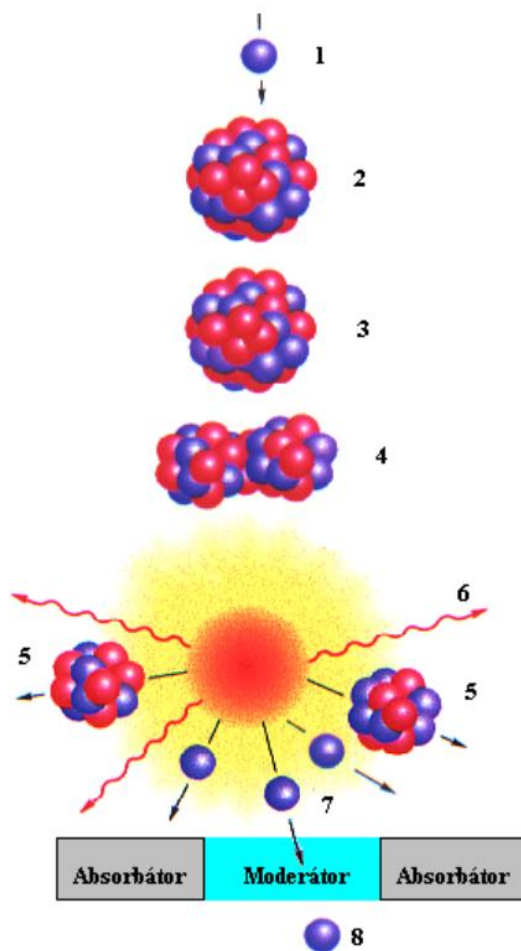
<sup>10</sup> ENCYKLOPEDIA FYZIKY. Jaderné štěpení [online].

<sup>11</sup> Tamtéž

Energie rychlých neutronů nabývá hodnot nad 0,5 MeV. Velká část energie těchto částic je ve formě energie kinetické. Jaderné štěpení za pomoci rychlých neutronů je využíváno v množivých reaktorech. Štěpení za pomoci rychlých neutronů je technologicky komplikované, ale přináší odlišnější využívání paliva oproti tepelným neutronům. V současné době jen v několika reaktorech a ve valné většině se jedná o experimentální reaktory.

Dalším způsobem spuštění jaderné štěpné reakce je využití tepelných neutronů. Tepelné neutrony dosahují energií do 0,5 eV. Hlavní výhodou tohoto přístupu je, že tyto neutrony mají výrazně větší pravděpodobnost se srazit s jádrem štěpeného materiálu a tím spustí štěpnou reakci. Těchto tepelných neutronů je využíváno ve valné většině jaderných reaktorů.

Na obrázku 1 je uvedena štěpná reakce  $^{235}_{92}\text{U}$  spuštěna tepelným neutronem. Tepelný neutron (1) o malé kinetické energii se srazí s izotopem uranu  $^{235}_{92}\text{U}$  (2). Jádro uranu neutron absorbuje a vznikne nestabilní izotop  $^{236}_{92}\text{U}$  (3). Přijetím neutronu dojde k oscilaci jádra (4), které se následně rozštěpí na dva excitované štěpné produkty (5) za vzniku elektromagnetického záření (gama záření) (6) a uvolnění dvou až tří neutronů (7).<sup>12</sup>



Obrázek 1: Průběh štěpné reakce uranu<sup>13</sup>

<sup>12</sup> ENCYKLOPEDIE FYZIKY. Jaderné štěpení [online].

<sup>13</sup> Tamtéž

## 1.5. Štěpné produkty

Po rozštěpení jádra vzniknou dva excitované<sup>14</sup> štěpné produkty (5.1) a (5.2). Tyto produkty si mezi sebou rozdělí zbývající protony a neutrony z původního jádra. V našem ilustračním případě se jednalo o uran  $^{236}_{92}\text{U}$ . Jak si mezi sebou nově vzniklá jádra rozdělí neutrony a protony je otázkou určité pravděpodobnosti. U nově vzniklých produktů nabývají ve většině případů nukleonová čísla hodnot ze dvou intervalů. Těžší ze štěpných produktů nabývá počtu nukleonů z intervalu 125–155. U lehčího jádra štěpného produktu nabývá počet nukleonů z intervalu 80–110.<sup>15</sup>

Nově vzniklá jádra jsou radioaktivní a obsahují nadbytek neutronů, kterých se zbavují pomocí  $\beta^-$  přeměny.  $\beta^-$  přeměna způsobuje přeměnu neutronu na proton a vznik antineutrína a elektronu, který je vyzářen do okolí. Touto přeměnou se jádro atomu snaží přeměnit na jádro stabilnější. V souvislosti s těmito přeměnami zavádíme pro každý radioaktivní nuklid takzvaný poločas přeměny. Ten nám stanovuje dobu, za jak dlouho se přemění polovina atomových jader ve vzorku.

Při rozštěpení jednoho atomu uranu  $^{235}_{92}\text{U}$  dojde k uvolnění energie kolem 200 MeV. Z této energie připadá 170 MeV na energii kinetickou, kterou získají nově vzniklé odštěpky ze štěpné reakce. Energie kinetická odpovídá přibližně 80 % z celkové uvolněné energie. Díky dodané kinetické energii štěpné trosky interagují s ostatními částicemi, což zapříčiňuje přeměnu energie kinetické na energii tepelnou. Zbývající část energie uvolněné při štěpení připadá na štěpné neutrony, záření gama, záření beta minus a neutrína.<sup>16</sup>

---

<sup>14</sup> Excitovaný atom je takový atom, který byl dodáním energie excitován do vyšší energetické hladiny.

<sup>15</sup> HEŘMANSKÝ, Bedřich a Ivan ŠTOLL. Energie pro 21. století.

<sup>16</sup> Tamtéž

## 1.6. Záření $\alpha$ , $\beta$ , $\gamma$

Ionizující záření má využití v technických, zemědělských i zdravotnických aplikacích. V případě jaderného reaktoru jsou zdroji záření štěpné reakce a následné přeměny štěpných produktů na prvky stabilnější. V případě jaderného reaktoru jsou ionizující záření vedlejším produktem a snažíme se toto záření odstínit, protože dlouhodobé vystavení vysokým intenzitám těchto záření způsobuje poškození buněk a jejich DNA, což může zapříčinit vznik rakoviny.<sup>17</sup>

Alfa záření je tok částic alfa, což je tok jader helia se dvěma neutrony. Alfa částice vykazuje vysokou hmotnost a kladný náboj. Částice alfa ztrácí velkou část své energie již při malých vzdálenostech. Při kontaktu s jinými atomy způsobuje jejich ionizaci nebo excitaci. Při alfa rozpadu izotopu uranu  $^{238}_{92}\text{U}$  na izotop thoria  $^{234}_{90}\text{Th}$  dojde právě k uvolnění záření alfa.

Záření beta mínus je tok částic elektronů. Toto záření vykazuje záporný elektrický náboj a vzniká při rozpadu neutronu na proton a antineutrino. Při kontaktu s jiným atomem beta záření způsobuje excitaci nebo ionizaci.  $\beta^-$  záření je ve vzduchu pohlceno po výrazně delší vzdálenosti než záření alfa.

Záření gama je elektromagnetické záření s velmi krátkou vlnovou délkou.<sup>18</sup> Toto záření nevykazuje žádný elektrický náboj. Ze všech zmíněných druhů záření je nejpronikavější a nelze jej plně odstínit. Při kontaktu s jiným atomem způsobuje gama záření jeho ionizaci. Záření gama můžeme například pozorovat při štěpné reakci, kde dochází k uvolnění vysokoenergetického elektromagnetického záření, jež odpovídá gama záření. K druhotnému uvolnění gama záření dochází, když dojde k deexcitaci štěpných produktů.

## 1.7. Moderátor

Pokud chceme udržet řetězovou štěpnou reakci, tak je zapotřebí nově uvolněné rychlé neutrony dostatečně zpomalit, abychom získali potřebné tepelné neutrony, které budou inicializovat další štěpné reakce ve štěpném materiálu. Zpomalování neutronů zajišťujeme za pomoci pružných srážek s atomy moderátoru. Využívanými moderátory jsou demineralizovaná lehká voda, těžká voda<sup>19</sup> a grafit.

### Lehká voda

Demineralizovaná lehká voda je nejběžnějším chladícím médiem a moderátorem u velkých reaktorů a je také nejčastěji uvažována pro připravované designy SMR. Nevýhodou lehké vody je, že do jisté míry pohlcuje neutrony, což zapříčiňuje horší neutronovou bilanci.

S rostoucí teplotou klesá i hustota vody, což zapříčiňuje zhoršení schopnosti moderace rychlých neutronů. Páry lehké vody vykazují minimální moderační schopnosti.

---

<sup>17</sup> ČEZ. RADIOAKTIVITA SLOUŽÍ [online].

<sup>18</sup> Vlnová délka záření gama dosahuje hodnot menších než 300 pm.

<sup>19</sup> Oxid deuteria se skládá z atomu kyslíku a dvou atomů deuteria. Což jsou izotopy vodíku s přidaným jedním neutronem.



## Těžká voda

Těžká voda se skládá z atomu kyslíku a dvou izotopů vodíku, takzvaného deuteria, což je vodík, který ve svém jádře obsahuje jeden proton a jeden neutron. Deuterium se od běžného vodíku odlišuje svou dvojnásobnou hmotností a minimálně pohlcuje neutrony. Tato vlastnost pozitivně ovlivňuje neutronovou ekonomiku reaktoru a umožňuje využívat i méně obohacených jaderných paliv. Velkou nevýhodou těžké vody je její komplikovaná výroba a i její cena.

## Grafit

Grafit může být využit pro moderaci rychlosti neutronů. V porovnání s těžkou vodou má nižší moderační schopnosti. Vhodnou vlastností je, že je žáruvzdorný.<sup>20</sup>

## 1.8. Chladicí medium

Účelem chladicího media je odvádět výkon vznikající v objemu palivových tyčí mimo reaktor, kde je možné výkon vzniklý štěpnou reakcí dále využít.

Reaktorové palivo je dimenzováno na určité teploty. Při překročení těchto teplot může dojít k roztavení palivových tyčí a úniku radioaktivních štěpných produktů do primárního okruhu nebo při závažnější havárii i do okolí. Po ukončení štěpných reakcí v jaderném palivu probíhají další procesy, která generují teplo, jež je nutné odvádět, aby nedošlo k poškození palivových tyčí.

Jako chladicí medium lze využít lehkou vodu, těžkou vodu, plyny, kapalně kovy nebo roztavené soli.

## 1.9. Kritické množství a multiplikační faktor

Během štěpné reakce dochází k uvolnění dvou až tří neutronů. Pokud tyto neutrony inicializují další štěpné reakce a takto by to pokračovalo, tak můžeme mluvit o řetězové štěpné reakci, které se snažíme dosáhnout v aktivní zóně reaktoru. Ne všechny nově uvolněné neutrony jsou schopny inicializovat další štěpení, jelikož mohou tyto neutrony být pohlceny, uniknout z prostoru štěpné reakce nebo mohou inicializovat jiné štěpné reakce.<sup>21</sup> Pro popis vývoje řetězové štěpné reakce vycházíme ze statistického chování soustavy a využíváme popisu tzn. multiplikačního koeficientu, jenž popisuje poměr počtu neutronů po sobě jdoucích generací.

$$k = \frac{n_k}{n_{k-1}} \quad (1.5)$$

Multiplikační koeficient

kde:

$k$ ...Multiplikační koeficient (—)

$n_k$ ...Počet neutronů generace  $k$  (—)

$n_{k-1}$ ...Počet neutronů generace  $k-1$  (—)

---

<sup>20</sup> ČEZ. GRAFIT – MODERÁTOR [online].

<sup>21</sup> HEŘMANSKÝ, Bedřich. Jaderné reaktory.

Podle multiplikačního koeficientu lze odlišit tři stavy štěpné řetězové reakce. Stav podkritický je stav, kdy  $k$  je menší než jedna a řetězová reakce ustává. Stav nadkritický je stav, kdy  $k$  je větší než jedna a řetězová reakce narůstá. Posledním stavem je stav kritický, kdy  $k$  je rovno jedné a řetězová reakce nemění svoji intenzitu.<sup>22</sup>

Aby bylo možné dosáhnout udržitelné štěpné řetězové reakce je zapotřebí nashromáždit dostatek štěpného materiálu neboli dosáhnout kritického množství. Toto množství je minimální hmotnost štěpného materiálu pro dané uspořádání. Pokud bychom nashromáždili méně štěpného materiálu, než je kritické množství, tak dochází k úniku více neutronů, než je zapotřebí pro udržení řetězové štěpné reakce. Kritické množství je úměrné zejména na následujících faktorech uvedených níže.<sup>23</sup>

Potřebné kritické množství je ovlivněno volbou štěpného materiálu i na stupni obohacení. S rostoucím stupněm obohacení roste totiž pravděpodobnost, že uvolněný neutron inicializuje další štěpení právě díky vyšší koncentraci štěpitelného izotopu ve štěpném materiálu.<sup>24</sup>

Kritické množství je také ovlivněno tvarem, do jakého je uspořádán štěpný materiál. S klesajícím poměrem mezi plochou a objemem klesá i kritické množství pro daný materiál. Nejnižší kritické množství vykazuje uspořádání štěpného materiálu do tvaru koule.<sup>25</sup>

Kritické množství je ovlivněno schopností moderátoru zpomalovat rychlé neutrony a schopností neutrony pohlcovat. Reflektor kritické množství ovlivňuje schopností vracet neutrony zpět do štěpného materiálu.

---

<sup>22</sup> HEŘMANSKÝ, Bedřich. Jaderné reaktory.

<sup>23</sup> ULLMANN, Vojtěch. Jaderné reakce a jaderná energie [online].

<sup>24</sup> Tamtéž

<sup>25</sup> Tamtéž

## 2. Malé modulární reaktory

### 2.1. Definice malých modulárních reaktorů

Malý modulární reaktor je jaderné zařízení, ve kterém probíhají štěpné reakce, při kterých je uvolňována energie, která se přeměňuje na energii tepelnou. Takto vzniklá energie může být využita pro výrobu elektrické energie nebo v technologických aplikacích umožňujících využití tepelné energie.

Mezinárodní agentura pro atomovou energii definuje malé modulární reaktory jako reaktory, jejichž elektrický výkon se pohybuje od 15 MWe do 300 MWe.<sup>26</sup> Při konstrukci malých modulárních reaktorů je kladen důraz na modulárnost a možnost tovární výroby. Právě u malých modulárních reaktorů je nahrazena úspora z rozsahu (využívaná u velkých jaderných bloků) za úsporu ze sériové výroby, což má za následek zvýšení předvídatelnosti výstavby a snížení rizik spojených s výstavbou. Moduly je možné přepravovat a skládat až na místě a tím zvýšit předvídatelnost výstavby a snížit rizika oproti velkým reaktorům.

Malé modulární reaktory (dále jen SMR) využívají různých konstrukcí, principů činnosti a mohou se lišit také v oblasti užití.

### 2.2. Proč se zabývat malými modulárními reaktory – ekonomické hledisko

Jaderné elektrárny jsou spolehlivé a disponují nízkými variabilními náklady, což je velmi příznivé. S výstavbou velkých jaderných elektráren jsou ovšem spojeny velké počáteční investiční náklady.

Výstavba takového zařízení je technicky náročná a každá elektrárna je do jisté míry originál. To má vliv na dobu výstavby zařízení a nese velké riziko pro zvyšování nákladů. Proto velké jaderné bloky byly a jsou dimenzovány na velké výkony, aby bylo dosaženo úspory z rozsahu vyrobené elektrické energie. Hlavní důvod, proč se nestaví více jaderných zařízení v Evropě, jsou právě potřebné velké počáteční investice a velká rizika spojená s výstavbou. Dlouhá doba výstavby a rizika s tím spojená mají za následek, že průměrně 40 %<sup>27</sup> z celkových nákladů je spojeno s náklady spojenými s financováním projektu (v Evropě).

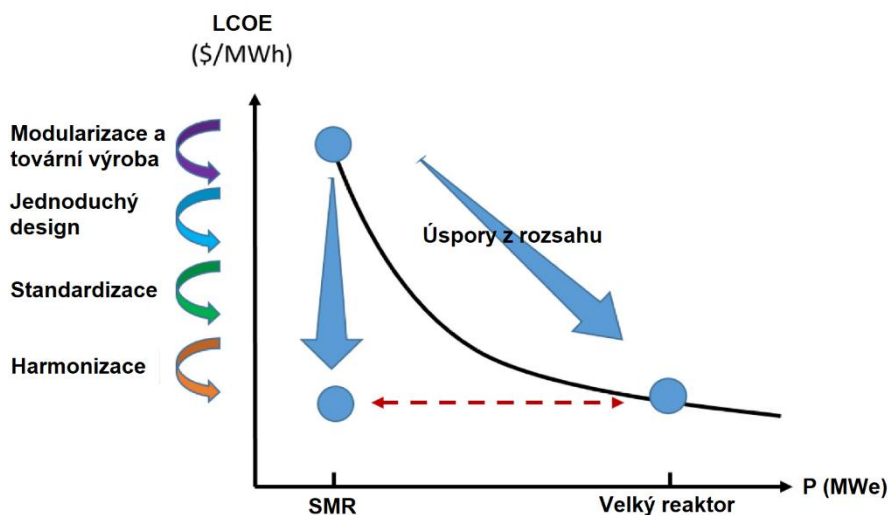
SMR jsou menší, dimenzované na menší výkony a jsou složeny z modulů. Vlivem zmíněných skutečností mohou elektrárny se SMR vyžadovat výrazně nižší investice a tím snižují jednu z největších bariér pro výstavbu nových jaderných elektráren.

---

<sup>26</sup> WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. Small Nuclear Power Reactors [online].

<sup>27</sup> INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Benefits and Challenges of Small Modular Fast Reactors [online].

Porovnat velké jaderné elektrárny s elektrárnami se SMR lze například pomocí parametru LCOE. LCOE je poměr mezi celkovou sumou všech nákladů za dobu životnosti elektrárny a celkovou hodnotou vyrobené elektrické energie za dobu životnosti elektrárny.<sup>28</sup> Z tohoto porovnání je patrné, že elektrická energie z elektráren se SMR je pro investory „nákladnější“ než elektrická energie z velkých elektráren. Ovšem díky sériové výrobě a vlivům se sériovou výrobou spojených, lze dosáhnout snížení nákladů u elektráren se SMR a umožnit tak konkurenceschopnost těchto technologií s ostatními zdroji.



Obrázek 2: Kompenzace úspor z rozsahu u SMR<sup>29</sup>

Konstrukční design SMR je možné oproti velkým reaktorům dále zjednodušit. To je dáno hlavně dimenzováním na menší výkony, nižší setrvačností systému a méně jaderného paliva v aktivní zóně. Jedná se například o nižší potřebu stínění díky nižším zásobám paliva, možnost náhrady aktivních bezpečnostních systémů za pasivní a je možné uvažovat i o integrální konstrukci reaktorové nádoby s parogenerátorem.<sup>30</sup> Díky zjednodušení je možné dosáhnout nižší složitosti reaktoru a tím i snížit náklady spojené s výrobou.

Modularizace je způsob zjednodušení výroby zařízení tím, že jednotlivé části jsou rozděleny do modulů, které se vyrobí přímo ve výrobním závodě a poté se převezou a smontují přímo na místě určení. Tento přístup je využíván také při výstavbě velkých jaderných elektráren, ale u SMR je možné jej uplatnit ve výrazně větší míře. Vlivem modularizace a tovární výroby lze dosáhnout vyšší produktivity práce, kontroly kvality, jednodušší aplikace pokročilých výrobních technik a omezení rizik, spojených s opožděním výstavby.<sup>31</sup> Zmíněné vlivy mohou pozitivně ovlivnit investiční náklady do elektrárny se SMR.

Sériová tovární výroba a standardizace přispívají k aktivizaci dodavatelského řetězce a zlepšují proces učení praxí. S rostoucím počtem vyrobených reaktorů se celý výrobní systém zefektivňuje a může dojít k snižování nákladů na jeden SMR.<sup>32</sup>

<sup>28</sup> Do výpočtu LCOE je většinou zahrnuta časová hodnota peněz a klesající výkon elektrárny spojený se stárnutím zařízení.

<sup>29</sup> NUCLEAR ENERGY AGENCY. Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities [online].

<sup>30</sup> Tamtéž

<sup>31</sup> Tamtéž

<sup>32</sup> Tamtéž

## 2.3. Přepočtené náklady na energii (LCOE) pro malé modulární reaktory

Určení LCOE pro SMR je velmi obtížné, jelikož je ovlivněno řadou faktorů. Zejména se jedná o velikost zařízení, konstrukci reaktoru, nákladů na palivo, umístění, dostupné financování a regulační prostředí. Celá situace je o to složitější, protože v současné době není v provozu žádné zařízení, které by mohlo nastínit reálné náklady pro další podobná zařízení. Proto většina uváděných nákladů na SMR nebo jiné parametry hodnotící náklady mohou být považovány pouze za teoretické odhady. Pro reálné hodnoty, jež mohou lépe odpovídat realitě, je nutné počkat na výsledné hodnoty nákladů po dokončení prvních svého druhu (FOAK) SMR.

Společnost NuScale Power (reaktor – NuScale) odhaduje LCOE pro jimi stavěný FOAK elektrárnu se SMR na 110 \$/MWh (2016). Pro další jimi stavěné elektrárny se SMR odhadují LCOE na 90 \$/MWh (2016).<sup>33</sup> Po dosažení vhodného nasazení elektráren se SMR a dosažení úspor spojených se sériovou výrobou a dalšími parametry, odhadují společnosti NuScale Power a GE Hitachi Nuclear Energy hodnoty LCOE okolo 60 \$/MWh.<sup>34</sup> Tyto hodnoty jsou vztaženy k USA a pro EU se mohou lišit vlivem zmíněných faktorů v úvodu této podkapitoly.

Pro srovnání je vhodné uvést, že LCOE pro velké jaderné zdroje, jež budou stavěny mezi lety 2020 až 2025, se odhaduje při diskontní sazbě 7 % na intervalu od 42 \$/MWh (Ruská federace) do 101,8 \$/MWh (Slovenská republika).<sup>35</sup>

## 2.4. Současný stav vývoje malých modulárních reaktorů

Dle Mezinárodní agentury pro atomovou energii jsou v současnosti (2022) ve výstavbě čtyři demonstrační tlakovodní SMR. Tyto reaktory jsou stavěny v Argentině (CAREM), Čínské lidové republice (ACP100) a Ruské federaci (dva KLT-40S).<sup>36</sup> Jedná se o reaktory, které jsou převážně umístěny v areálech velkých jaderných elektráren.

Nejpokročilejším SMR současnosti z pohledu nasazení, je vysokoteplotní reaktor HTR-PM, jenž je instalován v Čínské lidové republice a dne 9. prosince 2022 dosáhl plného výkonu.<sup>37</sup>

Následující nejpokročilejší SMR z pohledu vývoje, jsou v různých stádiích licenčních procesů. Valná většina méně pokročilých designů se nachází v různých stádiích vývoje od koncepčních návrhů, až po základní návrhy designu.

Koncepční návrh je první fází procesu navrhování, ve kterém se zkoumají nápady a koncepty. Zahrnuje vytváření a vyhodnocování řady potenciálních řešení konstrukčních problémů a výběr nejslibnějších nápadů.

Základní návrh je druhou fází procesu, která následuje po koncepčním návrhu. Zahrnuje vypracování podrobnějšího a propracovanějšího plánu návrhu včetně specifikací materiálů, rozměrů a dalších technických požadavků.

---

<sup>33</sup> NUCLEAR ENERGY AGENCY. Small Modular Reactors: Nuclear Energy Market Potential for Near-term Deployment [online].

<sup>34</sup> WALTON, Robert. \$60/MWh for advanced nuclear electricity is achievable, says GE Hitachi executive [online].

<sup>35</sup> WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. Economics of Nuclear Power [online].

<sup>36</sup> FARMER, Matt. Where will the first small modular nuclear reactors be? [online].

<sup>37</sup> WORLD NUCLEAR NEWS. China's demonstration HTR-PM reaches full power [online].

## 3. Konstrukce vodou chlazených malých modulárních reaktorů

Tato kapitola se zabývá konstrukcí a principiálním fungováním jednotlivých typů reaktorů, jež využívají vody jako svého chladiva a moderátoru. Tyto typy reaktorů jsou mnoho let v provozu u velkých reaktorů, a proto se jedná o velmi známé a odzkoušené technologie.

Malé modulární reaktory se v základním uspořádání a principu fungování výrazně neodlišují od velkých reaktorů. Jen díky nižším výkonům a menším rozměrům SMR umožňují jiné přístupy a využití oproti velkým reaktorům.

Obecným problémem reaktorů chlazených a moderovaných lehkou vodou jsou vyšší nároky na spotřebu štěpného materiálu, které jsou dány vysokou absorpcí neutronů vodíkem.

Obecně platí u vodou chlazených reaktorů, že vykazují nízkou účinnost termodynamického cyklu oproti pokročilým SMR vlivem nižších výstupních teplot.

Základní údaje pro tuto kapitolu byly čerpány z knih *Jaderné reaktory a Energie pro 21. století* od prof. Ing. Bedřich Heřmanský, CSc.<sup>38,39</sup>

### 3.1. Tlakovodní reaktory (PWR)

Tlakovodní reaktory (PWR) jsou v současné době nejrozšířenějším typem velkých energetických reaktorů. Tyto reaktory představují přibližně 70 % ze všech současně provozovaných velkých energetických reaktorů.<sup>40</sup> U současně vyvíjených SMR tento typ výrazně převažuje oproti ostatním typům, a proto zde bude přiblížena konstrukce a princip fungování tlakovodních reaktorů chlazených lehkou vodou.

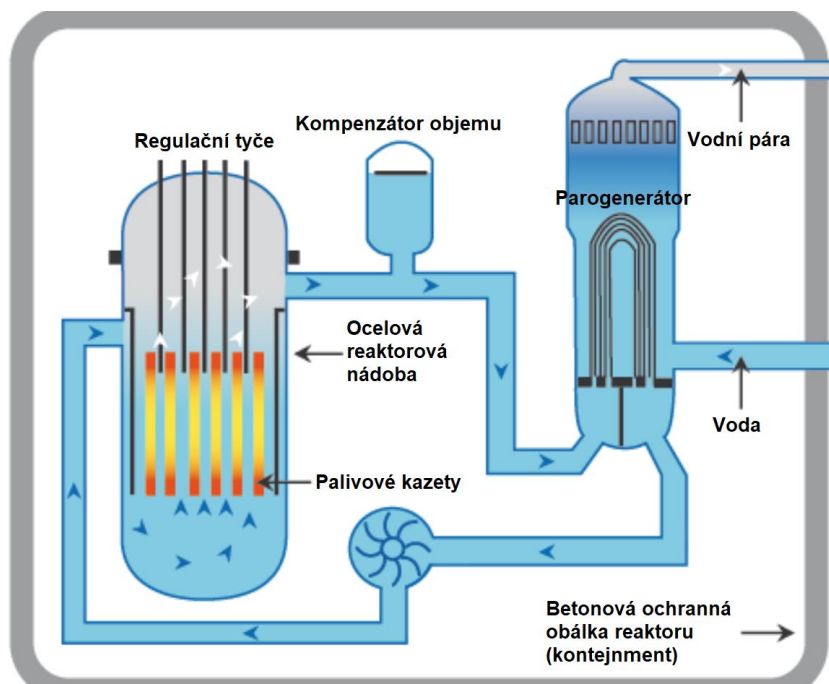
Tlakovodní reaktory jsou nejznámějším typem reaktoru a pro SMR tento typ představuje nejméně technických překážek. Většina legislativních rámců má zkušenosti, buď z již provozovaných jaderných reaktorů tohoto typu nebo mohou čerpat ze zkušeností ostatních států.

---

<sup>38</sup> HEŘMANSKÝ, Bedřich. *Jaderné reaktory*.

<sup>39</sup> HEŘMANSKÝ, Bedřich a Ivan ŠTOLL. *Energie pro 21. století*.

<sup>40</sup> INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *In Operation & Suspended Operation Reactors* [online].



Obrázek 3: Tlakovodní reaktor (PWR)<sup>41</sup>

Tlakovodní reaktory se sestávají z reaktorové nádoby, ve které je umístěna aktivní zóna. To je oblast, kde je uloženo jaderné palivo, ve kterém probíhají řetězové štěpné reakce, jež uvolňují energii ve formě tepla. Uvolněné teplo je z paliva odváděno pomocí chladicího média.

Chladicí médium u tohoto typu reaktoru je v primárním okruhu lehká voda, která je udržována pod vysokými tlaky (12 – 16 MPa), aby nedocházelo k varu chladicího média.<sup>42</sup> Po ohřevu chladicího média dochází k předání tepelné energie sekundárnímu okruhu pomocí parogenerátoru.

V sekundárním okruhu panují výrazně nižší tlaky, proto zde dochází k tvorbě páry, jež pohání turbínu turbogenerátoru.<sup>43</sup> Výhodou dvouokruhového uspořádání je, že sekundární okruh nepřichází do kontaktu s jaderným palivem a neuvolňuje se do něj nežádoucí radionuklidy.

### Reaktorová nádoba

Reaktorová nádoba je zhotovena z nízkolegované oceli a je opatřena z vnitřní strany návarem z nerezové oceli. Dále je opatřena otvory pro vstup a výstup chladicí vody. V dolní části se nachází aktivní zóna, kde jsou uloženy palivové články. Ve snímatelném víku jsou umístěny nátrubky pro připojení pohonu regulačních tyčí.<sup>44</sup>

### Reaktorové víko

Reaktorová nádoba je dále osazena odnímatelným reaktorovým víkem (není zobrazeno na ilustračním obrázku), které umožňuje výměnu palivových tyčí. Některé designy SMR počítají s výměnou celého reaktoru po uplynutí doby kampaně. Většinou by se jednalo o výrazně menší SMR s velmi dlouhým trváním kampaně.

<sup>41</sup> WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. Nuclear Power Reactors [online].

<sup>42</sup> SVĚT ENERGIE. REAKTOR [online].

<sup>43</sup> WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. Nuclear Power Reactors [online].

<sup>44</sup> HEŘMANSKÝ, Bedřich a Ivan ŠTOLL. Energie pro 21. století.

## Reaktorové palivo

U tlakovodních reaktorů se využívá jako reaktorového paliva oxid uraničitý ( $\text{UO}_2$ ). Obohacení používaných paliv se pohybuje do 5 % hmotnostního izotopu  $^{235}_{92}\text{U}$ . Je také možné využívat různých směsí oxidu uraničitého ( $\text{UO}_2$ ) a oxidu plutoničitého ( $\text{PuO}_2$ ), kde je užíváno izotopu  $^{239}_{94}\text{Pu}$ .<sup>45</sup>

Do reaktorové nádoby jsou umístěny palivové kazety, které se skládají z mnoha palivových tyčí. Hermeticky uzavřená palivová tyč je vyrobena z materiálu, který je neutronově transparentní (propustný). Takový materiál nepohlcuje neutrony a je schopen udržet štěpné produkty vně tyče. Jaderné palivo se nachází vně palivových tyčí ve formě peletek.<sup>46</sup>

## Regulační tyče a řízení štěpné reakce

Rychlost štěpné reakce u tlakovodních reaktorů řídíme pomocí regulačních tyčí, které dle potřeby zasouváme mezi palivové kazety. Tyče, které zasouváme, jsou vyrobeny z nerezové oceli obsahující bór (B), který velmi snadno pohlcuje neutrony. Právě díky této vlastnosti dochází k omezení množství neutronů, které mohou iniciovat další štěpení a tím dochází k omezení výkonu reaktoru.

V dlouhodobém měřítku je využívána kyselina boritá ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ), která je přidávána do chladicí vody. Štěpnou reakci řídíme pomocí koncentrace kyseliny borité v chladicí vodě. Tato kyselina velmi dobře pohlcuje neutrony a tím snižuje rychlost řetězové štěpné reakce. Tento postup je používán pro omezení štěpné reakce při začátku nové palivové kampaně nebo při odstavení reaktoru.

Tlakovodní reaktory vykazují záporný teplotní koeficient. Ten nám říká, že při zvýšení teploty reaktoru na nějakou mez, dojde k omezení štěpné reakce a následnému poklesu výkonu reaktoru. Tento proces omezení výkonu je založen jen na fyzikálních principech a je dán konstrukcí daného reaktoru.<sup>47</sup> Pokud dojde ke zvýšení teploty v aktivní zóně nad nějakou mez, okolní chladicí voda se začne zahřívat do té míry, že dojde k změně hustoty chladicí vody, která se nachází v okolí palivových článků. S poklesem hustoty chladicí vody dojde k omezení moderace rychlých neutronů a tím i k snížení rychlosti štěpné reakce, a tedy i k omezení výkonu. Záporný teplotní koeficient je chtěná vlastnost, která pomáhá reaktoru lépe se vyrovnat s nežádoucími stavy.

---

<sup>45</sup> HEŘMANSKÝ, Bedřich a Ivan ŠTOLL. Energie pro 21. století.

<sup>46</sup> Tamtéž

<sup>47</sup> Tamtéž



## **Reflektor**

Reflektor je vrstva materiálu, která je schopna vrátit část uniklých neutronů zpět do aktivní zóny. Reflektor se nachází na vnitřní straně aktivní zóny.

Většina dosud postavených velkých reaktorů obsahovala nebo obsahuje reflektor a u SMR se nejspíše tento trend nezmění. Důvody pro využívání reflektorů v reaktorech uvádí Bedřich Heřmanský ve své publikaci *Jaderné reaktory následující tři body*.<sup>48</sup>

Reflektor snižuje únik neutronů z aktivní zóny, což se příznivě projevuje na neutronové bilanci reaktoru.

Dochází k prostorovému vyrovnání hustoty toku tepelných neutronů a tím i k homogenizaci vznikajícího tepla v aktivní zóně.

Reflektor snižuje nároky na stínění reaktoru.

## **Oběh chladiva**

Oběh chladicí lehké vody v primárním okruhu je možné realizovat dvěma způsoby. Prvním způsobem je za pomoci čerpadel, která udržují tok chladicí vody. Druhým způsobem je za pomoci přirozené konvekce chladicí vody. Tento princip je založen na změnách hustot chladiva v závislosti na změnách teploty a prostorovém rozmístění jednotlivých částí primárního okruhu.

Po odstavení reaktoru je nutné palivové články dále dochlazovat, aby nedošlo k jejich poškození a nedošlo k úniku radionuklidů<sup>49</sup> do primárního okruhu a do okolí reaktoru.

Některé designy SMR počítají právě s dochlazováním aktivní zóny pomocí čerpadel, což předpokládá vyšší požadavky na nouzové zdroje elektrické energie pro elektrárnu. Ty lze zajistit buď z elektrické sítě, nebo pomocí diesel generátorů. Alternativou k tomuto přístupu je oběh chladicí vody pomocí přirozeného proudění.

## **Kompenzátor objemu**

Kompenzátor objemu slouží u tlakovodních reaktorů k regulaci tlaku v primárním okruhu.

---

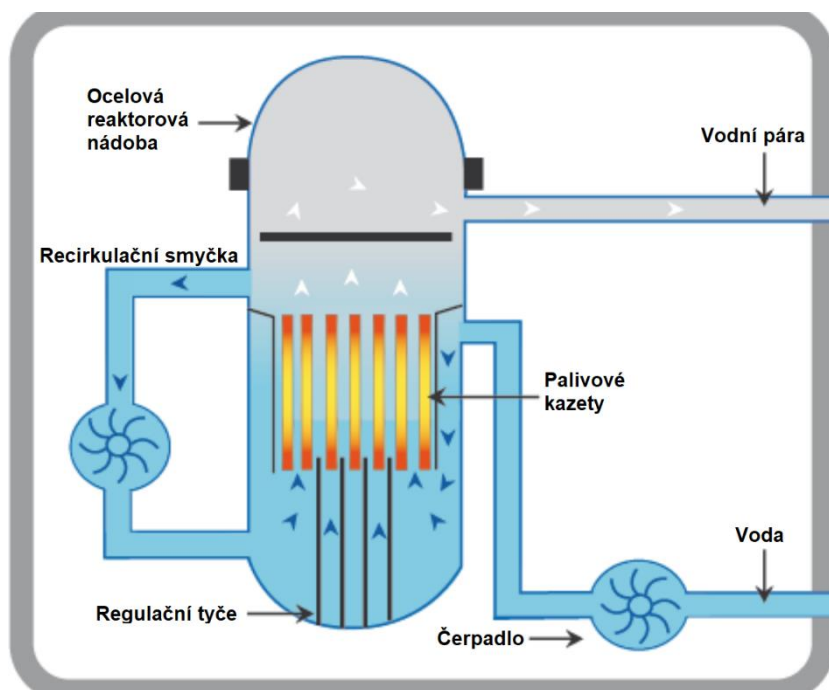
<sup>48</sup> HEŘMANSKÝ, Bedřich. *Jaderné reaktory*.

<sup>49</sup> Radionuklid je nuklid, který je nestabilní a při svém rozpadu uvolňuje radioaktivní záření a přeměňuje se na jiný radionuklid nebo na nuklid stabilní.

## 3.2. Varné reaktory (BWR)

Varné reaktory jsou druhým nejrozšířenějším typem reaktoru. Představují přibližně 10 % ze všech provozovaných velkých energetických reaktorů.<sup>50</sup> Tento typ reaktoru je zastoupen mezi vyvíjenými designy SMR, a proto zde bude přiblížena jeho konstrukce a princip fungování.

Varné reaktory jsou chlazeny a moderovány demineralizovanou lehkou vodou. Oproti tlakovodním reaktorům panují v reaktorovém okruhu výrazně nižší tlaky, které se pohybují okolo 7 MPa. Díky nižším tlakům v aktivní zóně dochází k varu chladicí vody, která se přeměňuje v páru a následně se kumuluje a vysouší v horní části reaktorové nádoby. Vzniklá pára je dále tlačena ven z reaktorové nádoby do parní turbíny, která pohání turbogenerátor. Jedná se o jednookruhové uspořádání, proto u tohoto typu reaktoru nenalezneme parogenerátor spojující primární a sekundární okruh. Právě to to uspořádání zajišťuje jednodušší konstrukci varných reaktorů. Naopak nevýhodou jednookruhového uspořádání je zasažení prostoru turbíny a přilehlého okolí radionuklidy.<sup>51</sup> Proto je nutné turbínu a její okolí stínit proti radioaktivnímu záření.



Obrázek 4: Varný reaktor (BWR)<sup>52</sup>

Hlavní součásti varných reaktorů jsou velmi podobné těm, které jsou využívány v reaktorech tlakovodních. Reaktorová nádoba a víko reaktorové nádoby se liší jen v dimenzování na nižší tlaky, které panují u varných reaktorů. Využívaná paliva nebo regulační a havarijní tyče se svojí konstrukcí výrazně neliší. Podrobnější popis zmíněných součástí je uveden v předchozí podkapitole.

<sup>50</sup> INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. In Operation & Suspended Operation Reactors [online].

<sup>51</sup> Radionuklidy, které přicházejí do kontaktu s parní turbínou mají jen velmi krátké poločasy rozpadu. Díky tomu po odstavní turbíny a nějakém čase dojde k rozpadu radionuklidů a výraznému snížení radiace v turbíně a jejím okolí.

<sup>52</sup> WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. Nuclear Power Reactors [online].

### **Separátor vlhkosti**

U varných reaktorů vzniká pára přímo v aktivní zóně. Jelikož takto vzniklá nasycená pára obsahuje kapičky vody, může docházet ke kondenzaci syté páry přímo v potrubí a v turbíně, což má za následek snížení účinnosti pracovního cyklu a snižuje životnost turbíny.<sup>53</sup> Z tohoto důvodu jsou v horní části reaktorové nádoby umístěny separátory vlhkosti ve formě desek, které zbavují vzniklou páru nežádoucí vlhkosti.

### **Oběh chladícího média a recirkulace**

Varné reaktory využívají lehké vody jako chladícího média. Oběh lehké vody může být realizován například nucenou přímou cirkulací pomocí čerpadel, která udržují tok chladícího média. Další varianta je s přirozenou cirkulací chladiva, která je založena na rozdílných hustotách chladiva a prostorovém uspořádání jednotlivých částí systému.

Varné reaktory obsahují recirkulační smyčku, která pomáhá urychlovat tok chladící lehké vody přes aktivní zónu. Díky zvýšenému toku jsou z aktivní zóny rychleji odstraňovány bubliny páry, které omezují moderaci rychlých neutronů v dané oblasti. Proto s rostoucím tokem přes aktivní zónu roste i výkon reaktoru. Naopak při nižších tocích dochází k snížení výkonu.

Recirkulační smyčka je patrná na obrázku 3. Jedná se o smyčku, jenž je na levé straně od reaktorové nádoby.

### **Regulační tyče a regulace**

Varný reaktor je schopen jednodušeji sledovat zátěž než je tomu u reaktoru tlakovodního. Rychlost štěpné reakce může být řízena dvěma způsoby. Jedním ze způsobů řízení je zasouvání a vysouvání bórových regulačních tyčí z aktivní zóny.

Jelikož se v horní části reaktorové nádoby nacházejí sušící desky, jsou regulační tyče umístěny na spodní straně reaktorové nádoby. Princip omezování štěpné reakce spočívá v zasouvání regulačních tyčí mezi palivové kazety. Jediným rozdílem oproti tlakovodním reaktorům je umístění regulačních tyčí.

Dalším způsobem řízení je zvyšování toku chladící vody přes aktivní zónu pomocí recirkulační smyčky nebo omezováním toku regulačním ventilem. Změnou toku chladící vody přes aktivní zónu lze měnit výkon reaktoru od 70 % do 100 % maximálního jmenovitého výkonu.<sup>54</sup>

Varné reaktory neumožňují řízení štěpné reakce pomocí přidávání kyseliny borité do chladícího média.

---

<sup>53</sup> SVĚT ENERGIE. PARNÍ TURBÍNA [online].

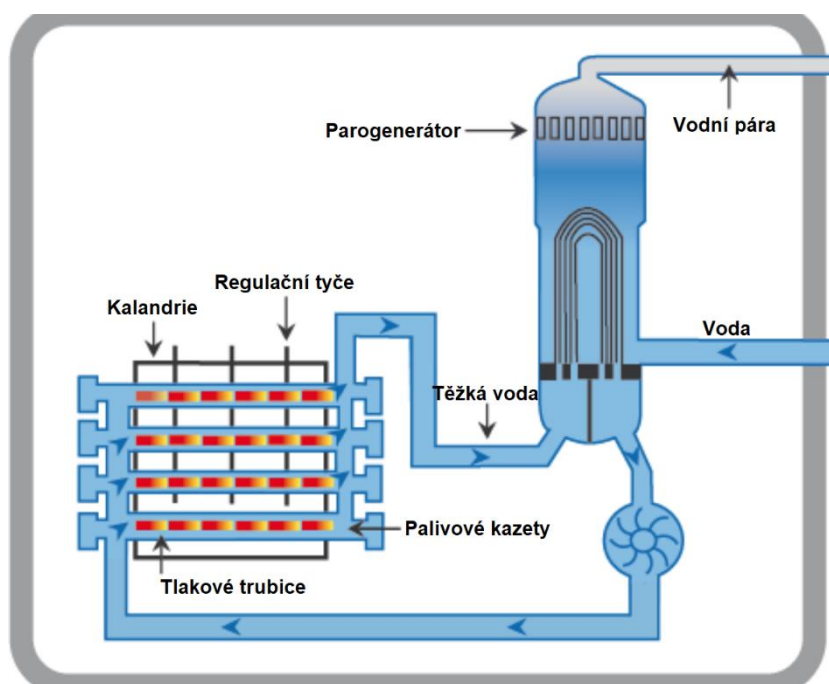
<sup>54</sup> POWER. Upgrade your BWR recirc pumps with adjustable-speed drives [online].

### 3.3. Těžkovodní reaktory (PHWR)

Těžkovodní reaktory jsou třetím nejpočetnějším typem reaktoru. Tyto představují přibližně 10 % ze všech současně provozovaných velkých energetických reaktorů.<sup>55</sup> Mezi připravovanými SMR jsou reaktory založené právě na tlakovodních reaktorech chlazených a moderovaných těžkou vodou. Proto zde bude přiblížena konstrukce a princip fungování tohoto konkrétního typu těžkovodního reaktoru.

Těžkovodní reaktory byly navrhovány, aby byly schopny využívat jako paliva přírodního uranu ve formě oxidu uraničitého ( $\text{UO}_2$ ), jelikož přírodní uran dosahuje obohacení 0,7 hmotnostních procent izotopu uranu  $^{235}\text{U}$  a zbytek hmotnosti připadá na izotop uranu  $^{238}\text{U}$ . Protože se v přírodním uranu vyskytuje výrazně méně potřebného uranu  $^{235}\text{U}$  pro udržení štěpné reakce, bylo zapotřebí vylepšit neutronovou ekonomiku reaktoru. Té bylo dosaženo využitím těžké vody jako moderátoru. Těžká voda výrazně méně pohlcuje neutrony oproti lehké vodě a tím zlepšuje neutronovou bilanci.<sup>56</sup>

Chladicí médium je v primárním okruhu drženo pod vysokým tlakem, aby bylo udrženo v kapalném skupenství. Energie primárního okruhu je předávána okruhu sekundárnímu pomocí parogenerátoru. Jedná se tedy o dvouokruhové uspořádání.



Obrázek 5: Těžkovodní reaktor (PHWR)<sup>57</sup>

#### Kalandrie

Kalandrie je zásobník moderátoru ve tvaru ležícího válce, jenž je protínán stovkami tepelně izolovaných tlakových trubic, ve kterých je uloženo jaderné palivo.<sup>58</sup> Chladicí těžká voda protéká tlakovými trubicemi a ochlazuje jaderné palivo. Tlak v primárním okruhu se pohybuje okolo 10 MPa.

<sup>55</sup> INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. In Operation & Suspended Operation Reactors [online].

<sup>56</sup> WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. Nuclear Power Reactors [online].

<sup>57</sup> Tamtéž

<sup>58</sup> Tamtéž

Moderátorem u tohoto typu reaktoru je těžká voda, která se nachází mezi pláštěm kalandrie a tlakovými trubicemi, ve kterých probíhá štěpná reakce. Moderátor je nutné chladit, jelikož s rostoucí teplotou klesají moderační schopnosti těžké vody. Moderátor je v kalandrii uchováván za běžného atmosférického tlaku.<sup>59</sup>

Výše uvedené uspořádání kalandrie a aktivní zóny zajišťuje možnost výměny paliva během chodu reaktoru. Konstrukce tohoto uspořádání je méně náročná než konstrukce reaktorové nádoby určené pro tento typ reaktoru.<sup>60</sup>

### **Regulační tyče a regulace**

Regulace výkonu je u těžkovodních reaktorů realizována pomocí zasouvání regulačních a havarijních tyčí do aktivní zóny. Tyto tyče snižují rychlost štěpné reakce tím, že pohlcují nově vzniklé neutrony. Jsou zhotovovány z nerezové bórové oceli. Umístění regulačních tyčí je znázorněno na obrázku 4.

V případě havárie je do moderátoru vsřikováno gadolinium (Gd), které je schopno zachytit část volných neutronů a tím zpomalit nebo zastavit štěpnou reakci.

### **Reaktorové palivo pro PHWR**

Jedním z možných paliv je přírodní oxid uraničitý ( $UO_2$ ). Díky nižší potřebě obohacení je možné využívat i jiná paliva než která jsou využívána u lehkovodních reaktorů. Jedním z nich je například přepracované vyhořelé palivo z lehkovodních reaktorů. Dále je možné využít také thoria nebo směsi oxidu uraničitého ( $UO_2$ ) a oxidu plutoničitého ( $PuO_2$ ).<sup>61</sup>

Palivo je ve formě peletek, které jsou izolovány od okolí pomocí povlaku, který nezachytává neutrony a izoluje od chladicího média. Dále jsou peletky umístěny do tenkých trubek, jež jsou spojeny do palivových kazet, které jsou poté vsouvány do tlakových trubic těžkovodního reaktoru.

---

<sup>59</sup> CANDU reactor. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online].

<sup>60</sup> Tamtéž

<sup>61</sup> WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. Thorium [online].

## 4. Konstrukce pokročilých malých modulárních reaktorů

Tato kapitola pojednává o konstrukci a principu fungování pokročilých reaktorů. Reaktory popisované v této kapitole se vyznačují zásadními odlišnostmi oproti reaktorům chlazených a moderovaných vodou. Některé typy využívají odlišných chladiv, moderátorů nebo se odlišují užívaným typem neutronů (například využívají rychlých neutronů) ve štěpných reakcích. Dále uvedené typy reaktorů v této kapitole je možné využít ve variantách jak pro velké reaktory, tak i pro SMR.

Základní údaje pro tuto kapitolu byly čerpány z knih *Jaderné reaktory a Energie pro 21. století* od prof. Ing. Bedřicha Heřmanského, CSc.<sup>62, 63</sup>

### 4.1. Vysokoteplotní reaktory chlazené plynem a grafitem moderované (HTGR)

Počátky vývoje reaktorů chlazených plynem a moderovaných grafitem sahají do padesátých let minulého století. Během vývoje tohoto typu bylo postaveno několik demonstračních jednotek, které ověřovaly princip fungování, provozní vlastnosti a užití materiály, jež měly odolávat vysokým teplotám (až 950 °C). Bohužel bylo postaveno jen několik experimentálních reaktorů, proto je vzorek odzkoušených postupů a konstrukcí velmi omezen. Hlavně proti běžně užívaným typům reaktorů je HTGR velmi málo ozkoušeným typem reaktoru.

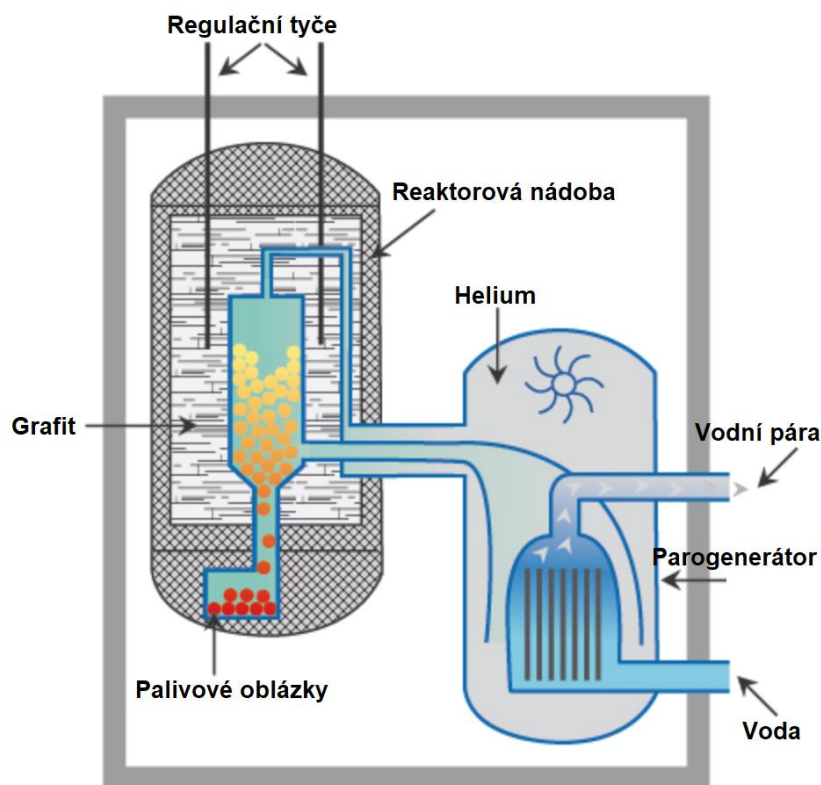
HTGR je reaktor chlazený heliem a moderovaný grafitem. Tento typ reaktoru byl koncipován s důrazem na dosažení maximální teploty výstupního chladicího média. Teplota výstupního média může dosahovat až 950 °C. Díky vysokým rozdílům teplot mezi vstupní a výstupní teplotou chladiva umožňuje dosahovat HTGR vyšších účinností, které se mohou blížit až 39 %.

Reaktor samotný se skládá z reaktorové nádoby, do které je umístěna aktivní zóna, v níž probíhají štěpné reakce inicializované tepelnými neutrony. Rychlé neutrony jsou moderovány na tepelné neutrony pomocí grafitového moderátoru obsaženého v samotném palivu a další moderace probíhá v tepelně stíněném grafitovém reflektoru, který obklopuje aktivní zónu. Reaktor může mít integrální uspořádání, jež je vhodnější pro energetické využití reaktoru. Možné je i smyčkové uspořádání okruhů chladicího média, které je lepší pro technologické užití tepla vznikajícího v reaktoru.

---

<sup>62</sup> HEŘMANSKÝ, Bedřich. *Jaderné reaktory*.

<sup>63</sup> HEŘMANSKÝ, Bedřich a Ivan ŠTOLL. *Energie pro 21. století*.



Obrázek 6: Vysokoteplotní plynem chlazený reaktor (HTGR)<sup>64</sup>

### Reaktorová nádoba

Reaktorová nádoba je válcovitého tvaru a může být zhotovena z předpjatého betonu, jež je z vnitřní strany hermeticky izolován ocelovým obložením. Tato varianta je možnou variantou oproti ocelové reaktorové nádobě.<sup>65</sup>

### Aktivní zóna

Aktivní zóna u HTGR se liší dle užitého tvaru paliva. Aktivní zóna pro kulové palivové články je válcového tvaru, kde ve spodní části přechází do trychtýře (uvedeno na obrázku). Tvar paliva a uspořádání zóny umožňuje výměnu paliva, jež je využíváno pro rovnoměrné zatížení palivových článků a aktivní zóny. Díky tomuto uspořádání je možné výměnu paliva provádět bez nutnosti odstavení reaktoru

### Chladicí médium

Chladicím médiem u HTGR je užíváno hélium (o tlaku okolo 4 MPa)<sup>66</sup> hlavně pro svoji netečnost k vysokým teplotám a minimálnímu ovlivnění radioaktivním zářením. Jednou z nevýhod hélia je jeho nízká tepelná kapacita. Hélium je vedeno mimo reaktorovou nádobu dvojitém koncentrickým potrubím, aby bylo minimalizováno riziko úniku.<sup>67</sup>

<sup>64</sup> WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. Small Nuclear Power Reactors [online].

<sup>65</sup> HEŘMANSKÝ, Bedřich a Ivan ŠTOLL. Energie pro 21. století.

<sup>66</sup> Tamtéž

<sup>67</sup> Tamtéž

Jednou z možností využití energie uvolněné do chladicího media je využití Rankin–Clausiova cyklu spolu se spojovacím parogenerátorem a sekundárním okruhem s chladicí vodou, jako médiem. Tento postup využívá tepelné přeměny vody pro pohon turbíny. Druhou možností je využití Braytonova cyklu, jenž využívá přímo chladicího helia při konstantním tlaku k pohonu turbíny. Turbíny poháněné heliem vykazují nedostatky, například v nich dochází k velkým únikům helia.

### **Palivo pro HTGR**

Palivo užívané v HTGR je ve formě malých kuliček (oblázků) oxidu uraničitého ( $\text{UO}_2$ ). Jsou obaleny několika vrstvami pyrolytického uhlíku a karbidu křemíku, jenž mají za cíl omezit únik štěpných produktů z paliva. Zejména se jedná o plynné produkty štěpných reakcí. Kuličky štěpného materiálu jsou zasazeny do grafitové matrice, jenž může nabývat tvarů koulí nebo šestiúhelníkových hranolů. Alternativním palivem jsou i běžně používaná paliva v kombinaci s thoriem.

Obohacení paliva se pohybuje do 20 % uranu  $^{235}_{92}\text{U}$ . U HTGR dochází k vyššímu stupni vyhoření, díky kterému palivo po ukončení kampaně v reaktoru generuje méně rozpadového tepla, než je tomu například u LWR (lehkovodních reaktorů).<sup>68</sup>

### **Regulace štěpné reakce**

Regulace probíhá pomocí regulačních tyčí, jenž jsou zasouvány do reflektoru, jenž obklopuje aktivní zónu. Regulační tyče jsou zhotoveny z borové oceli stejně jako u lehkovodních reaktorů.

### **Pasivní bezpečnost**

HTGR vykazují záporný teplotní koeficient, který zajišťuje zpomalení rychlosti štěpné reakce při nárůstu teploty. Další vhodnou vlastností HTGR je, že palivové články a aktivní zóna jsou vyrobeny ze žáruvzdorných materiálů, proto při vysokých teplotách nedochází k jejich tavení a jsou stabilní do 1600 °C.<sup>69</sup>

## **4.2. Rychlé reaktory (FNR)**

Rychlé reaktory využívají rychlých neutronů ve svých štěpných reakcích, a tedy nepotřebují moderátor. Rychlé neutrony mají výrazně nižší pravděpodobnost na inicializaci štěpných reakcí, a proto je využíváno palivo, jenž je výrazně více obohaceno (toto se týká hlavně uranu).  $^{239}_{94}\text{Pu}$  je lépe štěpitelné rychlými neutrony než uran a navíc při štěpení  $^{239}_{94}\text{Pu}$  se uvolňuje přibližně o 25 % neutronů více.<sup>70</sup> Zmínění vyšší generace elektronu je zásadní vlastností pro fungování rychlých reaktorů.

Ztráty neutronů jsou malé. Je tedy možné přebytečné neutrony využít k přeměně  $^{238}_{92}\text{U}$  na  $^{239}_{94}\text{Pu}$  a k přeměně  $^{232}_{90}\text{Th}$  na  $^{235}_{92}\text{U}$ .<sup>71</sup> Tento proces se odehrává i u reaktorů využívajících tepelné neutrony, kde se jedná o výrazně menšinový proces. Rychlé reaktory jsou na tyto přeměny uzpůsobeny a rychlé neutrony jsou k těmto přeměnám výrazně vhodnější. Pokud rychlý reaktor je uzpůsoben pro generování více štěpného materiálu, než ho sám spotřebuje, mluvíme o tzv. rychlém množivém reaktoru (FBR).

---

<sup>68</sup> HEŘMANSKÝ, Bedřich a Ivan ŠTOLL. Energie pro 21. století.

<sup>69</sup> WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. Small Nuclear Power Reactors [online].

<sup>70</sup> WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. Fast Neutron Reactors [online].

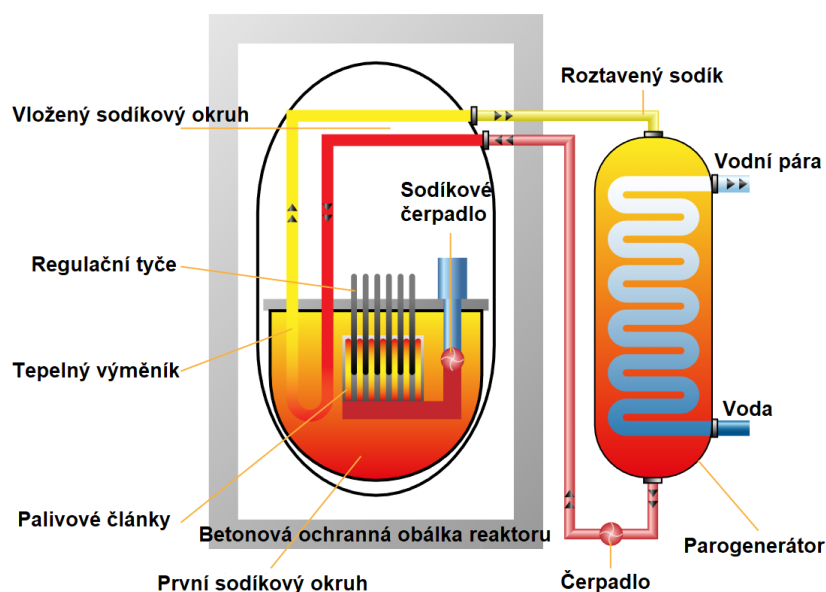
<sup>71</sup> Tamtéž



Rychlé neutrony jsou schopny využít skoro všechny uran a thorium ve svých procesech. Buď jako svoje další palivo, což může velmi prodloužit dobu kampaně paliva, nebo nově vzniklý materiál lze odebrat pro další reaktor. LWR jsou schopny využít okolo 0,6 % uranu a těžkovodní reaktory jsou schopny využít asi 6 % uranu.<sup>72</sup>

Při štěpných reakcích dochází k uvolňování vysoké hustoty tepelného výkonu, jenž je nutno chladit. Toto chlazení je možné docílit díky vysoké tepelné kapacitě tekutých kovů nebo pomocí roztavených solí.

Přes existenci několika výzkumných a experimentálních zařízení se jedná o velmi komplikované inženýrské dílo. Hlavně z pohledu používaných materiálů, které musí obstát při vysokých teplotách a vystavení agresivním chladivům.



Obrázek 7: Rychlý množivý reaktor (FBR)<sup>73</sup>

### Reaktorová nádoba

Reaktorová nádoba obsahuje aktivní zónu, ve které je uloženo jaderné palivo a kde probíhá štěpná reakce. Jelikož při používání rychlých neutronů klesá pravděpodobnost na spuštění štěpení, roste i kritická hmotnost. To zapříčiňuje potřebu vyššího množství paliva v aktivní zóně a potřebu blízkého uložení jednotlivých palivových tyčí v palivových kazetách.

<sup>72</sup> HEŘMANSKÝ, Bedřich a Ivan ŠTOLL. Energie pro 21. století.

<sup>73</sup> SVĚT ENERGIE. REAKTOR [online].

## Palivo

Rychlé reaktory využívají jako paliva oxidů uranu nebo plutonia. Jde použít i jiné sloučeniny s uranem nebo plutoniem. Ze štěpných sloučenin jsou dále spečeny peletky, které jsou umístěny do hermeticky uzavřených tenkostěnných tyčí z nerezové oceli. Tyto jsou dále uspořádány do palivových kazet, které se dávají do aktivní zóny.

Co se týká množivých schopností FNR, je možné množivé materiály zakomponovat přímo do paliva nebo v podobě článků do aktivní zóny, kde se po přeměně množivého materiálu na štěpný, budou účastnit dalších štěpných reakcí. V takovémto případě mluvíme o regeneračních reaktorech. Alternativně lze množivé články rozmístit v okolí aktivní zóny a uspořádat tak množivou zónu, kde po přeměnách lze vzniklé štěpné palivo dále využít i v jiných aplikacích.<sup>74</sup>

## Chladicí médium

U FNR jsou využívána chladicí média v podobě tekutých kovů. Jedná se zejména o sodík a případně o olovo a olovo-bismut. Tato chladicí média jsou schopna odvést potřebný výkon z aktivní zóny. Tlaky chladicího média se nacházejí okolo atmosférického tlaku.

Velmi komplikované je užití sodíku, jenž se velmi snadno slučuje s kyslíkem za vzniku tepla. To se také týká kyslíku obsaženého ve vodě, která je používána v sekundárním okruhu. Tyto skutečnosti kladou velké nároky právě na parogenerátory, které musí zajistit oddělení sodíku v primárním okruhu od vody kolující v sekundárním okruhu.

## Regulace

Regulace je provozována pomocí nerezových tyčí obohacených o bór.

## 4.3. Reaktory založené na roztavených solích (MSR)

Reaktory založené na roztavených solích jsou skupinou reaktorů, které spojuje využívání roztavených solí jako chladicího média. Jednotlivé podtypy MSR se mohou od sebe výrazně lišit. Některé využívají pevných paliv, ty jsou nejvíce podobné klasickým jaderným blokům. Jiné typy využívají jaderných paliv rozpuštěných přímo v chladivu. A asi nejsložitějším podtypem jsou rychlé MSR, které využívají rychlých neutronů. Několik reaktorů MSR bylo postaveno v 60. letech minulého století a z těchto experimentálních zařízení vychází valná část dnes připravovaných designů MSR. Všechny dnes připravované designy MSR ve variantách MSR se nacházejí ve stavu koncepčních nebo základních návrhů.<sup>75</sup>

## Chladicí médium

Velkou výhodou roztavených solí je, že vykazují velmi vysokou tepelnou kapacitu. Díky této vlastnosti jsou roztavené soli schopny uchládit i takové objemy, jež by ostatní chladicí média neuchladila. Soli v primárním okruhu jsou udržovány při nízkých tlacích.

Velkou neznámou je dlouhodobé působení roztavených solí na ostatní materiály. Jednou z nevýhod tohoto typu chladiva je, že soli začínají tuhnout již při celkem vysokých teplotách. Kvůli tomu jsou potrubí vedoucí roztavené soli vyhřívána, aby nedošlo k zatuhnutí.

---

<sup>74</sup> HEŘMANSKÝ, Bedřich a Ivan ŠTOLL. Energie pro 21. století.

<sup>75</sup> WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. Molten Salt Reactors [online].

Fluoridové soli neovlivňují moderátor ve formě grafitu. Dále je možné v nich také rozpouštět jaderná paliva ve formě fluoridu uraničitého ( $\text{UF}_4$ ) nebo fluoridu thoričitého ( $\text{ThF}_4$ ) a velmi málo pohlcují neutrony.<sup>76</sup> Chloridové soli a dusičnany jsou použitelné jen jako chladicí médium.<sup>77</sup>

### **Jaderné palivo**

Pro reaktory MSR využívající pevné palivo je používané palivo ve formě TRISO částic oxidu uraničitého ( $\text{UO}_2$ ), jenž jsou obsaženy v grafitové matrici. Jedná se o stejné palivo, které je užíváno u HTGR (viz. kapitola 5.1).

Reaktory s rozpuštěným palivem v chladicím médiu využívají palivo ve formě sloučenin fluoridu uraničitého ( $\text{UF}_4$ ).

### **Moderátor**

U MSR je využíván moderátor ve formě grafitu. Rychlé varianty MSR moderátor nevyžívají.

MSR, jenž využívají jaderného paliva rozpuštěného v chladicím médiu, používají moderátor ve formě grafitových desek. Tyto desky jsou umístěny v aktivní zóně tak, že mezi těmito deskami protéká chladicí médium s palivem.

### **Regulace**

Regulace je provozována pomocí nerezových tyčí obohacených o bór.

---

<sup>76</sup> OBJECTIVE SOURCE E – LEARNING. Reaktory IV generace [online].

<sup>77</sup> WAGNER, Vladimír. Jaderné reaktory IV. generace využívající roztavené soli [online].

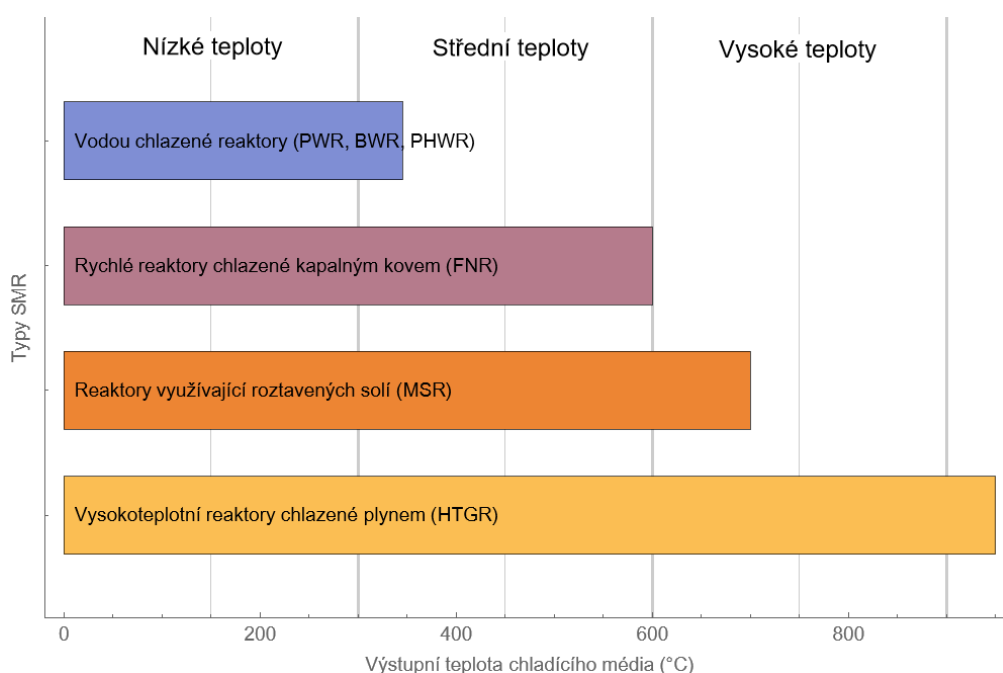
## 5. Parametry malých modulárních reaktorů

Kapitola převážně vychází z uveřejněných informací a parametrů pro jednotlivé designy SMR, jež uveřejnila Mezinárodní agentura pro atomovou energii v publikaci *Advances in Small Modular Reactor: Technology Developments* z roku 2020.<sup>78</sup> V této kapitole budou přiblíženy parametry, jež ovlivňují využitelnost reaktorů a parametry, jež popisují bezpečnost těchto zařízení.

### 5.1. Výstupní teploty chladicího média pro jednotlivé typy SMR

Výstupní teplota chladicího média je zásadním parametrem pro další možné aplikace jaderné energie. Vyšších teplot lze využít například v papírenském průmyslu, petrochemickém průmyslu a v případě velmi vysokých teplot i k výrobě vodíku. Konkrétní možnosti využití konkrétních teplot jsou uvedeny v následující kapitole. Teploty výstupního média závisí hlavně na typu reaktoru a na uspořádání daného designu. Výstupní teplota má také vliv na účinnost výroby elektrické energie při užití Rankinova–Clausiova cyklu pro parní turbínu.

Graf 2: Maximální dosažitelné výstupní teploty pro různé typy SMR<sup>79</sup>



#### Lehkovodní reaktory (LWR) a těžkovodní reaktory (HWR)

Výstupní teploty chladicího média u LWR a HWR se u připravovaných designů SMR zásadně neliší. Připravované LWR a HWR ve variantách SMR, jež jsou určeny pro výrobu elektrické energie, dosahují výstupních teplot na intervalu 285 – 345 °C. Maximálních parametrů dosahuje připravovaný reaktor IMR od společnosti Mitsubishi Heavy Industries z Japonska.

Připravované SMR určené pro výrobu tepla vykazovaly výstupní teploty na intervalu 98– 120 °C.

<sup>78</sup> INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments* [online].

<sup>79</sup> WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. *Nuclear Process Heat for Industry* [online].

### **Vysokoteplotní reaktory chlazené plynem (HTGR)**

Připravované vysokoteplotní SMR uváděly nejvyšší dosahované výstupní teploty ze všech typů. Pro jednotlivé designy se pohybují na intervalu 700–950 °C. Tyto teploty dosahují takových parametrů, že je možné je využít v mnoha aplikacích, zejména se jedná o výrobu vodíku. Výstupní teploty okolo 950 °C uvedlo několik připravovaných vysokoteplotních SMR. Jedná se o GTHTR300 z Japonska, MHR-T Reactor a MHR-100, které pocházejí z Ruska.

### **Rychlé reaktory chlazené kapalným kovem (FNR)**

Uváděné výstupní teploty pro jednotlivé designy rychlých SMR se pohybují na intervalu 300–600 °C. Maximálních parametrů dosahuje připravovaný reaktor Westinghouse Lead Fast Reactor od společnosti Westinghouse Electric Company pocházející z USA.

### **Reaktory využívající roztavených solí (MSR)**

Uváděné výstupní teploty pro jednotlivé designy SMR využívající roztavených solí se pohybují na intervalu 590–700 °C. Maximálních parametrů dosahuje připravovaný reaktor Molten Chloride Salt Fast Reactor MCSFR od společnosti Elysium Industries pocházející z USA.

## **5.2. Délka palivové kampaně**

Valná většina připravovaných designů uvádí doby kampaní, jenž se většinou pohybují v rozmezí od 12 do 48 měsíců. Jedná se převážně o LWR, HWR a MSR, které využívají pevných jaderných paliv. Délky kampaní, jenž uvádějí připravované rychlé SMR, se pohybují ve vyšších jednotkách let. Maximální délky kampaně se pohybují do 27 let. U některých SMR se předpokládá výměna celé reaktorové nádoby spolu s palivem. Většina HTGR a část MSR umožňují výměnu paliva průběžně během kampaně. Díky tomu není nutné kvůli výměně paliva provádět odstávky.

## **5.3. Integrovaní / smyčkové uspořádání**

Pokud jsou umístěny hlavní části primárního okruhu do jednoho zařízení (nádoby), jedná se o integrované uspořádání. Takováto nádoba obsahuje aktivní zónu, čerpadla chladicího média a parogenerátor. Integrované uspořádání je možné jen pro reaktory malých výkonů. A přináší řadu odlišných vlastností oproti klasickému smyčkovému. Jedná se o jednodušší údržbu, možnosti sériové výroby reaktoru a celého primárního okruhu, velké zásoby chladicího média v primárním okruhu, jenž zajišťují velkou setrvačnost při přechodných dějích. S integrovaným uspořádáním je spojen také značný nárůst rozměrů celé reaktorové nádoby oproti smyčkovému uspořádání.

Klasické smyčkové uspořádání primárního okruhu vyvádí chladicí médium mimo reaktorovou nádobu pomocí smyček, kterých může být více než jedna. Všechny další potřebné součásti jsou umístěny mimo reaktorovou nádobu. Jedná se o čerpadla a parogenerátory. Primární okruh vyžaduje dále stínění proti gama záření.<sup>80</sup>

---

<sup>80</sup> MATZIE, R.A., J. LONGO, R.B. BRADBURY, K.R. TEARE a M.R. HAYNS. Design of the Safe Integral Reactor [online].

Připravované SMR využívají obou typů uspořádání primárních okruhů. Integrální uspořádání je voleno ve vyšší míře u připravovaných lehkovodních PWR a FNR chlazených kapalnými kovy. Jedním z důvodů užití integrálního uspořádání u FNR je minimalizace úniků chladicího média.

81

## 5.4. Ochrana do hloubky (Defense in Depth)

Ochrana do hloubky je parametr celého jaderného zařízení, který popisuje mnohonásobné bariéry, jenž mají ochránit zdraví a bezpečnost veřejnosti a zaměstnanců elektrárny. Ochrana do hloubky zahrnuje celou řadu odlišných ochrany a bariér. Jedná se o robustní fyzické ochrany, různorodé bezpečnostní systémy, zabezpečení proti fyzickému vniknutí a krizové systémy.<sup>82</sup>

Příklad mnohonásobné ochrany:<sup>83</sup>

- 1) Krystalická mřížka paliva brání úniku většině štěpných produktů (dokud nedojde k jejímu roztavení).
- 2) Povlak palivových kazet zabraňuje úniku plyných produktů do chladicího média.
- 3) Reaktorová nádoba, potrubí a další zařízení brání uniknutí radiace.

## 5.5. Pasivní bezpečnostní systémy

Pasivní bezpečnost je přístup k návrhům bezpečnostních systémů, jenž mají zamezit nebo zmírnit havarijní stavy bez nutnosti zásahu obsluhy a bez nutnosti využití aktivních systémů, jenž vyžadují zdroje energie pro svoje fungování. Pasivní bezpečnostní systémy vycházejí z fyzikálních principů. Využívanými fyzikálními principy jsou například přirozená cirkulace plynů a kapalin, gravitace a vypařování. Pasivní bezpečnostní systémy jsou nezávislé na obsluze, zdroji energie a vyžadují nižší náklady na údržbu a instalaci oproti aktivním systémům.

Mezinárodní agentura pro atomovou energii definuje pasivní systém následovně: „Systém je pasivní, pokud je sestaven pouze z pasivních součástí a struktur nebo se jedná o systém, jenž využívá aktivních součástí jen pro spuštění dalších již pasivních procesů“. Agentura pro atomovou energii dále definuje 4 stupně, které popisují stupeň pasivity systému. Stupnice je od A až do D, kde stupněm A je označován takový systém, jenž splňuje všechny požadavky. Při nedodržení některých bodů kladených na pasivní systém je stupeň pasivity systému snížen.<sup>84</sup>

Požadavky na pasivní systém stupně pasivity A:<sup>85</sup>

- 1) Systém nevyžaduje žádné vstupní signály pro spuštění své funkce.
- 2) Systém nevyužívá žádných externích zdrojů energie.
- 3) Systém nevyužívá žádné pohyblivé části.
- 4) Systém nevyužívá žádných pracovních kapalin.

---

<sup>81</sup> WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. Nuclear Process Heat for Industry [online].

<sup>82</sup> ARGONNE NATIONAL LABORATORY. Defense in Depth [online].

<sup>83</sup> HEŘMANSKÝ, Bedřich a Ivan ŠTOLL. Energie pro 21. století.

<sup>84</sup> INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Passive Safety Systems and Natural Circulation in Water Cooled Nuclear Power Plants [online].

<sup>85</sup> Tamtéž

Pasivní chladicí systémy jsou zakomponovány do jaderných elektráren a zařízení pro případ nutnosti dochlazování aktivní zóny od rozpadového tepla, aby nedošlo k roztavení palivových článků. Dále je nutné dochlazovat ochrannou schránku reaktoru (tzn. kontejnment) a tím i potlačovat přetlak v okolí reaktoru.

#### **Pasivní bezpečnostní systém pro dochlazování aktivní zóny**

Pasivní bezpečnostní systémy pro dochlazování aktivní zóny využívají různých přetlakových nádob nebo nádrží, jež obsahují dodatečný objem chladícího média. Dodatečné chladící médium obsahuje kyselinu boritou pro zastavení štěpných reakcí. Za běžného chodu jsou tyto nádrže odděleny pomocí ventilů.<sup>86</sup>

Jiné užívané systémy spoléhají na připojení nouzových chladících okruhů přímo k reaktorové nádobě nebo k užívanému parogenerátoru. Tyto systémy odvádějí rozpadové teplo pomocí výměníků do připravených chladících nádrží nebo pomocí výměníků instalovaných v chladících věžích. Zde bylo uvedeno jen pár možných využitelných principů pro pasivní bezpečnostní systémy.<sup>87</sup>

Většina uvažovaných systémů byla připravována pro vodou chlazené SMR, ale podobné principy po úpravách lze uplatnit i u reaktorů IV. generace.

#### **Pasivní bezpečnostní systém pro dochlazování kontejnmentu a omezení přetlaku**

Pro dochlazování kontejnmentu a omezení přetlaku mezi reaktorovou nádobou a ochrannou obálkou je užito odlišných principů oproti dochlazování aktivní zóny. Při dochlazování kontejnmentu můžeme využít různých výměníků tepla vyvedených do okolí nebo do připravených nádrží. Lze využít také principu kondenzace vody na stěnách kontejnmentu, kde na vnější straně dochází k tepelné výměně mezi kontejnmentem a okolím.<sup>88</sup>

Většina uvažovaných systémů byla připravována pro vodou chlazené SMR, ale podobné principy po úpravách lze uplatnit i u reaktorů IV. generace.

---

<sup>86</sup> INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Passive Safety Systems and Natural Circulation in Water Cooled Nuclear Power Plants [online].

<sup>87</sup> Tamtéž

<sup>88</sup> Tamtéž

## 6. Možnosti uplatnění malých modulárních reaktorů v České republice

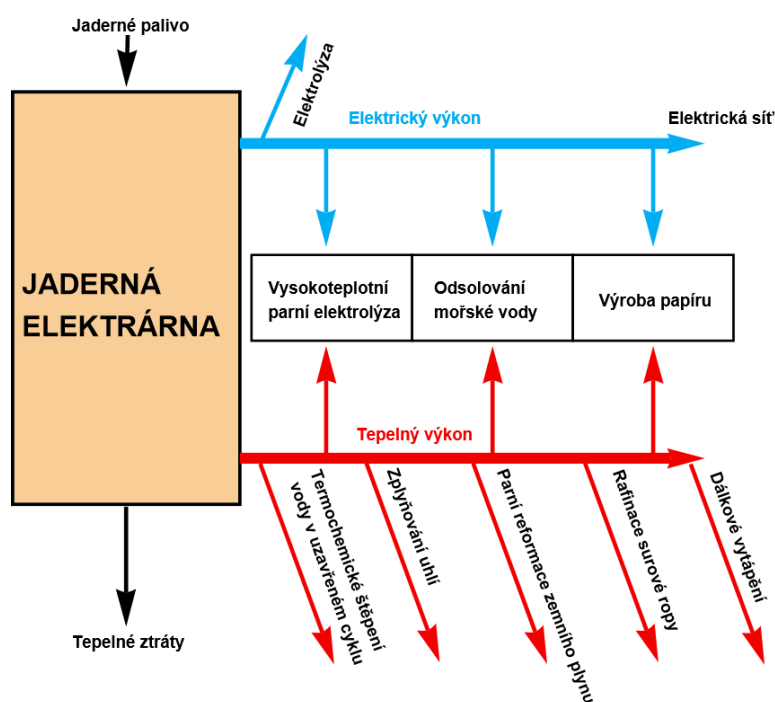
Jaderná energie je využívána v České republice pro výrobu elektrické energie a také k dálkovému vytápění městských aglomerací. V těchto aplikacích je možné uvažovat o všech typech SMR. Při vyšších výstupních teplotách chladicího média u SMR IV. generace, lze dále uvažovat i o dalších technologických aplikacích a tím i o možnosti rozšíření využití jaderné energie.

Využívání jaderné energie v co nejširším měřítku získává na významu při omezování CO<sub>2</sub> v rámci tzv. uhlíkové neutrality, které má být dosaženo do roku 2050. Jelikož jaderná energetika je bezemisním zdrojem energie, tak dosažení cílů uhlíkové neutrality v podmínkách ČR není bez přispění jaderné energie dosažitelná.

### 6.1. Elektrické energie

SMR jsou ve valné většině uvažovány primárně pro výrobu elektrické energie pomocí termodynamických uzavřených cyklů (Rankinův–Clausiův cyklus, Braytonův cyklus), jenž jsou využívány pro pohon turbíny, která generuje elektrický výkon. Pro zlepšení využívání energie vznikající v jaderném reaktoru je možné uvažovat o kombinované výrobě elektrické energie a využití méně ušlechtilé tepelné energie v dalších aplikacích. Tento přístup umožňuje lépe využít energii reaktoru. U některých dále zmíněných aplikací v jednotlivých podkapitolách je uvažována právě kombinovaná výroba elektrické energie a výroba tepla pro další aplikace.

SMR mohou lépe využít dalších aplikací oproti velkým reaktorům, jelikož je jednodušší je umístit blíže k místu spotřeby. Bližší umístění SMR k městským aglomeracím je v současnosti omezeno hlavně legislativními pravidly.



Obrázek 8: Možnosti uplatnění jaderné energie



## 6.2. Podpůrné služby

Podpůrné služby elektrizační soustavy zajišťují stabilitu a parametry elektrické sítě. Podpůrné služby zajišťují výkonovou rovnováhu mezi vyráběným a spotřebovávaným výkonem. S rostoucím výkonem, pocházejícím z obnovitelných zdrojů energie je nutné, aby podpůrné služby disponovaly dostatečným rezervním výkonem, aby nebyla ohrožena stabilita sítě při výpadku těchto zdrojů.

Při budoucím nárůstu obnovitelných zdrojů energie lze uvažovat o využití flexibility velkých jaderných zdrojů a SMR právě pro podpůrné služby. Alternativní variantou je provoz elektrárny v základním zatížení s tím, že při nadbytku výkonu by se tento přebytek používal pro jinou aplikaci, ať ve formě využití tepelného nebo elektrického výkonu, například pro výrobu vodíku.

V současnosti jaderné elektrárny pracují v základním zatížení. Je tak činěno hlavně pro maximalizaci využití jaderné elektrárny, jelikož jaderné elektrárny disponují nejnižšími palivovými náklady z říditelných zdrojů energie.<sup>89</sup> Tedy i současné jaderné elektrárny jsou schopny regulace výkonu.

## 6.3. Vodík

SMR mohou být využity pro výrobu vodíku, který má mnoho využití a je vhodným sekundárním zdrojem energie. Může sloužit jako vhodné doplnění k elektrické energii, protože je možné ho ukládat do plynových zásobníků obdobně jako zemní plyn. Vodík je v současnosti využíván ve výrobě dusíkatých hnojiv, chemickém a petrochemickém průmyslu a v mnoha dalších oborech. V budoucnu může vodík najít uplatnění v bezemisním vytápění, ukládání energie a k pohonu automobilů. Vodíkové technologie potřebují ještě pokročit, jelikož vodík díky svým rozměrům velmi snadno uniká a i přes poréznější materiály je schopen pronikat, což dává velmi vysoké požadavky na soustavu, která by vodík transportovala.

Většina dnes vyrobeného vodíku je vyrobena z fosilních paliv převážně parní reformací zemního plynu, kde dochází k uvolňování vodíku ( $H_2$ ) a oxidu uhličitého ( $CO_2$ ). SMR lze využít při dnes využívaných procesech pro výrobu vodíku, kde mohou omezit vznikající množství oxidu uhličitého ( $CO_2$ ). Elektrická energie a výstupní teplo reaktorů IV. generace může být využito pro bezemisní výrobu vodíku (viz. dále). Vodík se v budoucnu může stát náhradou za dnes využívaná fosilní paliva a tím usnadnit dosahování cílů tzn. uhlíkové neutrality do roku 2050.

### Vysokoteplotní parní elektrolýza

Vysokoteplotní parní elektrolýza založená na elektrolytických člancích s pevným oxidem<sup>90</sup> může využívat elektrickou a tepelnou energii právě z jaderného reaktoru. Princip vysokoteplotní parní elektrolýzy spočívá v průchodu stejnosměrného proudu, kde na jedné elektrodě dochází k uvolňování vodíku ( $H_2$ ) a na druhé elektrodě se uvolňuje kyslík ( $O_2$ ). Díky tomu, že část energie byla dodána ve formě energie tepelné, jenž je energií méně ušlechtilou, dochází k poklesu potřebné energie elektrické. Proto dochází i k nárůstu účinnosti oproti nízkoteplotní elektrolýze.

Vysokoteplotní parní elektrolýza vyžaduje teploty nad  $600\text{ }^\circ\text{C}$ ,<sup>91</sup> což umožňuje využití pouze HTGR a MSR.

---

<sup>89</sup> NUCLEAREUROPE. FORATOM outlines flexible nuclear solution to intermittent renewable challenge [online].

<sup>90</sup> WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. Hydrogen Production and Uses [online].

<sup>91</sup> Tamtéž

### **Parní reformace zemního plynu**

Parní reformace zemního plynu je dnes nejvyžívanějším způsobem výroby vodíku, kdy methan ( $\text{CH}_4$ ) reaguje s vodní párou ( $\text{H}_2\text{O}$ ) za vysokých teplot a tlaků. Vysokých teplot je dosahováno pomocí spalování methanu. Některé typy SMR mohou právě nahradit spalování methanu a tím zvýšit množství vyrobeného vodíku při stejném vstupním množství methanu a stejném množství uvolněného oxidu uhličitého ( $\text{CO}_2$ ).

Parní reformace probíhá ve dvou fázích. Nejdříve reaguje vodní pára s methanem za vzniku vodíku ( $\text{H}_2$ ) a oxidu uhelnatého ( $\text{CO}$ ). Tato reakce je endotermní a vyžaduje dodání tepla o vysokých parametrech, aby reakce vůbec proběhla. V dalším kroku reaguje vzniklý oxid uhelnatý s vodní párou za vzniku oxidu uhličitého a dalšího vodíku.

Parní reformace zemního plynu je možná od  $700\text{ }^\circ\text{C}$  do  $1000\text{ }^\circ\text{C}$ ,<sup>92</sup> což umožňuje využití HTGR.

### **Zplyňování uhlí**

Zplyňování uhlí je obdobný proces jako reformace zemního plynu, kdy reaguje uhlík, kyslík a vodní pára za vysokých teplot a tlaků za vzniku oxidu uhličitého a vodíku (reakce je dvoufázová, jako u reformace vodíku). Teploty potřebné pro uskutečnění reakce se pohybují od  $700\text{ }^\circ\text{C}$  do  $1000\text{ }^\circ\text{C}$ ,<sup>93</sup> což umožňuje využití pouze HTGR.

### **Štěpení vody v termochemickém uzavřeném cyklu**

Štěpení vody v termochemickém uzavřeném cyklu může využívat tepla z jaderného reaktoru pro uskutečnění endotermních reakcí. Uzavřený termochemický cyklus spočívá v posloupnosti reakcí. Nejprve voda reaguje s prvkem (nebo sloučeninou), která se velmi snadno slučuje s kyslíkem. Při takovéto reakci dochází ke vzniku sloučeniny použitého prvku a kyslíku a vzniká požadovaný vodík. V dalších krocích dochází k takovým reakcím, aby došlo k plné recyklaci všech sloučenin.<sup>94</sup> Některé recyklační reakce jsou endotermní a je zde využíváno teplo jaderného reaktoru. Sloučenin, které umožňují uvolnit vodík a následně být recyklovány je mnoho.

Teploty potřebné pro některé reakce se pohybují od  $800\text{ }^\circ\text{C}$  do  $1000\text{ }^\circ\text{C}$ ,<sup>95</sup> což umožňuje využití pouze HTGR.

### **Vodíková strategie České republiky**

Vodíková strategie pro Českou republiku počítá s tím, že jaderná energie je jednou z hlavních alternativ pro výrobu nízkouhlíkového vodíku přímo v České republice. Strategie dále předpokládá, že bude pokračovat nárůst obnovitelných zdrojů v elektrizační síti ČR, kdy bude zapotřebí udržovat v pohotovosti dostatek výkonu pro udržení parametrů sítě. Jednou z variant uvažovaných ve vodíkové strategii ČR je provoz jaderných elektráren v základním zatížení, kdy při přebytku výkonu v síti by se přebytečný výkon využil právě v elektrolyzérech.<sup>96</sup>

---

<sup>92</sup> WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. Hydrogen Production and Uses [online].

<sup>93</sup> Tamtéž

<sup>94</sup> HEŘMANSKÝ, Bedřich a Ivan ŠTOLL. Energie pro 21.

<sup>95</sup> WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. Hydrogen Production and Uses [online].

<sup>96</sup> MINISTERSTVO PRŮMYSLU A OBCHODU. VODÍKOVÁ STRATEGIE ČESKÉ REPUBLIKY [online].

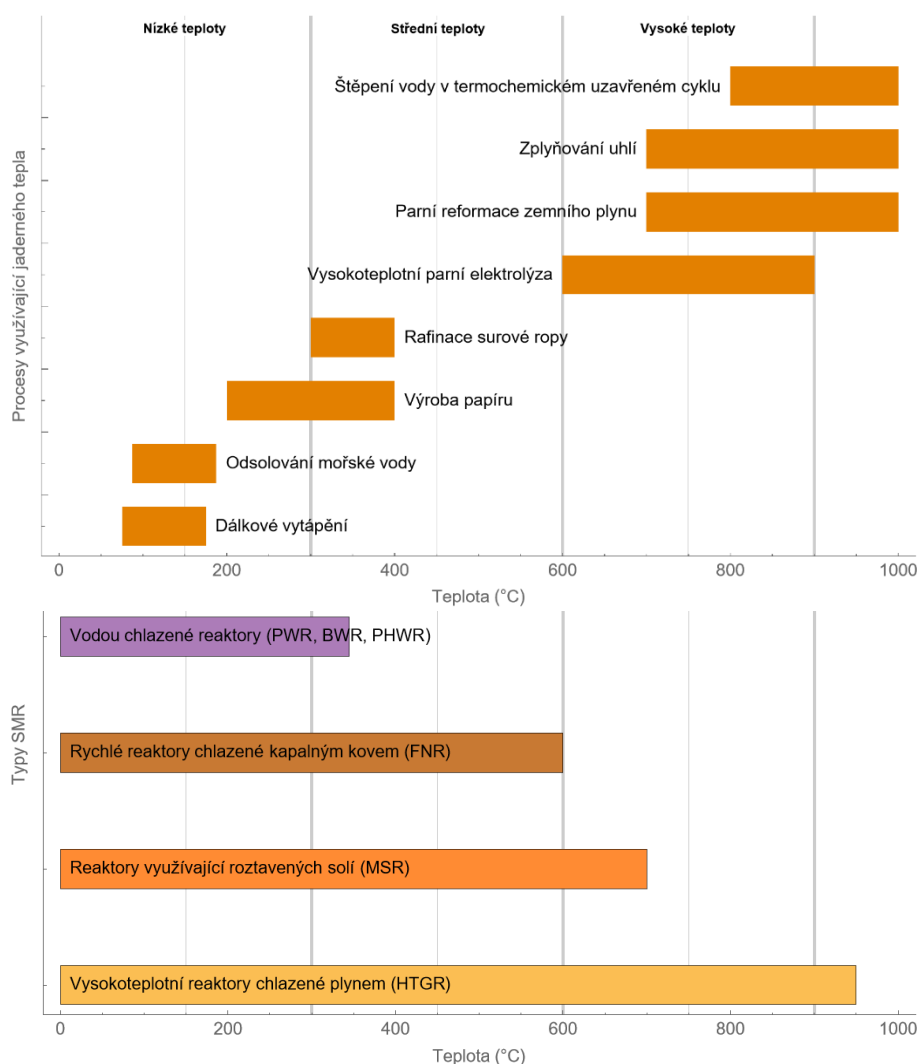
Vodíková strategie v druhé etapě mezi roky 2026 a 2030 zmiňuje: “V návaznosti na technologický vývoj bude také možné pokračovat v diskusi o výstavbě nových jaderných zdrojů, potenciálně i včetně malých modulárních reaktorů, které by větší část své produkce využily pro výrobu nízkouhlíkového vodíku.”<sup>97</sup>

## 6.4. Další možné aplikace malých modulárních reaktorů

SMR lze uplatnit i v mnoha jiných aplikacích než v těch, jež byli zmíněny v předchozích podkapitolách. Jedná se o využívání jaderného tepla pro odsolování mořské vody, výrobě papíru, zásobování elektrickou energií a teplem odlehlých oblastí, rafinaci surové ropy a výroby páry pro získávání ropy z ropných písků.

## 6.5. Shrnutí využitelnosti malých modulárních reaktorů

Graf 3: Možnosti využití výstupního tepla ze SMR pro tech. aplikace<sup>98</sup>



<sup>97</sup> MINISTERSTVO PRŮMYSLU A OBCHODU. VODÍKOVÁ STRATEGIE ČESKÉ REPUBLIKY [online].

<sup>98</sup> INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Advances in Small Modular Reactor Technology Developments [online].

Uvedené intervaly výstupních teplot pro jednotlivé typy SMR vycházejí z deklarovaných hodnot z připravovaných designů pro daný typ. Horní hranice uvedených intervalů vycházejí z nejvyšších deklarovaných výstupních teplot, které mohou být vyvinuty některým z připravovaných designů pro daný typ. Jelikož zmíněné typy reaktorů byly nebo jsou v provozu ve variantách velkých reaktorů energetických nebo experimentálních, lze předpokládat, že by s reálným nasazením SMR nemělo dojít k zásadním odlišnostem výstupních teplot oproti intervalům uvedených v předchozím grafu.

Vodou chlazené SMR (PWR, BWR, PHWR) představují typy, které díky své pokročilosti a známosti mohou být nasazeny jako první ve větším měřítku. Vlivem nižších výstupních teplot je využitelnost těchto reaktorů v neelektrických aplikacích nižší v porovnání s ostatními typy SMR. Možnosti využití vodou chlazených SMR je spatřována v dálkovém vytápění městských aglomerací a možnosti náhrady za současné teplárny. Dalšími možnými aplikacemi je odsolování mořské vody, výroba papíru a možnost využití jaderného tepla při rafinaci surové ropy.

Varné reaktory (BWR) umožňují výrazně větší možnosti regulace výkonu oproti ostatním SMR vodou chlazených. Tento typ SMR je velmi vhodný pro zvyšování flexibility v elektrické síti. Výhodou těžkovodních reaktorů je možnost využívání přírodního uranu.

Rychlé reaktory disponují vyššími výstupními teplotami. Přesto neumožňují zásadnější využití v neelektrických aplikacích v porovnání s vodou chlazených SMR. Hlavní opodstatnění rychlých reaktorů je spatřováno v možnosti výrazně vyššího využití jaderného paliva (vyšší vyhořívání) a možnost výroby nového jadeného paliva pomocí neutronového zachytu v izotopech  $^{232}_{90}\text{Th}$  a  $^{238}_{92}\text{U}$ . Rychlé reaktory v kombinaci s přepracovacími závody mohou dosáhnout uzavření palivového cyklu. Hlavní přínos rychlých reaktorů je spatřován v dlouhodobé udržitelnosti jaderné energetiky z pohledu palivových zdrojů.

Reaktory využívající roztavených solí disponují vyššími výstupními teplotami oproti výše zmiňovaným typům SMR. Vlivem vyšších teplot mohou tyto reaktory oproti předchozím typům být využity pro výrobu vodíku pomocí vysokoteplotní parní elektrolýzy. Přínosem těchto SMR je možnost využití velké škály forem jaderných paliv. Zejména se jedná o jaderná paliva rozpuštěná v chladicím médiu.

Vysokoteplotní reaktory chlazené plynem a grafitem moderované dosahují nejvyšších výstupních teplot chladicího média. Důsledkem výrazně vyšších teplot je, že tento typ SMR je velmi vhodný pro velký počet neelektrických aplikací. Zejména představuje zásadní alternativu k dnes využívaným způsobům výroby vodíku, kde právě výroba je jednou z nejzásadnějších překážek pro širší využívání vodíku v dalších odvětvích. Výčet možných uplatnění pro HTGR jsou uvedena v předcházejícím grafu.

## 7. Závěrečné doporučení

### 7.1. Kvantitativní SWOT analýza pro malé modulární reaktory

SWOT analýza se využívá pro hodnocení silných a slabých stránek projektu vzhledem k okolním vlivům, jež jsou popsány pomocí příležitostí a rizik. Tato analýza pomáhá určit, které vnitřní vlastnosti jsou nejpodstatnější a které vnější vlivy zasluhují nejvíce pozornosti. Jednou z výhod je možnost kvantifikovat komplexní vlivy působící na projekt a vytvářet tak vhodnější dlouhodobé strategie.

Pro obecné hodnocení SMR byla vybrána kvantitativní SWOT analýza, která má pomoci zhodnotit vlastnosti SMR vzhledem k okolním vlivům, jež mohou bránit vhodnému nasazení SMR.

### 7.2. Vymezení pojmů pro SWOT analýzu

#### 7.2.1. Silné stránky malých modulárních reaktorů

##### **Bezemisní zdroj** (Bezemisní z.)

Jaderné elektrárny jsou bezemisními zdroji energie. Tedy během svého provozu neuvolňují CO<sub>2</sub> do atmosféry.

##### **Konstrukční řešení**

Malé modulární reaktory mohou disponovat odlišnými konstrukčními řešeními oproti velkým jaderným blokům. Jedná se zejména o integrální konstrukce či možnost využití pasivních bezpečnostních systémů. Vlivem odlišných konstrukčních řešení může být dosaženo zvýšené bezpečnosti a omezení zóny havarijního plánování.

##### **Neelektrické aplikace**

SMR mohou být využity pro kombinovanou výrobu elektrické energie a tepla pro neelektrické aplikace, což zajišťuje vyšší využití jaderného zdroje. Možné technologické aplikace jsou uvedeny v 6. kapitole. Tato vhodná vlastnost platí zejména pro pokročilé SMR.

##### **Stabilní a regulovatelný zdroj** (Stabilní a regulovatelný z.)

Elektrický výkon SMR je možné regulovat v určitých mezích. Na rozdíl od obnovitelných zdrojů se jedná o zdroj stálý, tedy dodávaný výkon není závislý na počasí nebo jiných nepředvídatelných proměnných.

##### **Tovární a modulární výroba**

Malé modulární reaktory je možné vyrábět ve výrobních závodech. Vlivem tovární výroby je možné dosahovat vyšší kvality prováděných úkonů a je možné dosahovat zlepšování výrobních postupů vlivem učení a lepších kontrolních mechanismů. Díky modulární konstrukci je možné snáze plánovat výstavbu jaderné elektrárny se SMR a omezit možná zdržení při výstavbě.

##### **Využitelnost SMR v elektrické síti** (Využitelnost SMR v elektrické s.)

Malé modulární reaktory lze uplatnit v základním zatížení sítě a také v podpůrných službách sítě.

## 7.2.2. Slabé stránky malých modulárních reaktorů

### **Jaderné palivo**

Jaderné elektrárny při svém provozu vytvářejí vysoce radioaktivní odpady, které je nutné někde uložit v areálu elektrárny nebo do hlubinného úložiště.

### **Malé provozní zkušenosti**

V současné době je v provozu jen pár SMR, proto některé nové typy a systémy disponují jen velmi malými provozními zkušenostmi. S výstavbou FOAK SMR lze dosáhnout vyšších provozních zkušeností a jejich výstavba je zásadní pro další směřování SMR.

### **Nízký výkon**

SMR oproti velkým jaderným zdrojům disponují řádově nižšími výkony.

### **Vysoké LCOE**

LCOE popisuje celkové náklady vztažené na jednu jednotku elektrické energie a slouží pro porovnání mezi různými zdroji energií, u SMR jsou vysoké.

### **Výstavba FOAK**

Pro ověření funkčnosti designu je nutná výstavba demonstračních zařízení (FOAK).

## 7.2.3. Příležitosti pro malé modulární reaktory

### **Nižší počáteční investiční náklady**

Hlavní ekonomickou překážkou pro velké jaderné zdroje jsou velmi vysoké počáteční náklady, což přináší poptávku na omezení těchto nákladů.

### **Poptávka po bezemisních zdrojích**

Vlivem globálního oteplování je kladen důraz na omezování CO<sub>2</sub>, což zvyšuje poptávku po bezemisních zdrojích energie.

### **Poptávka po diverzifikaci zdrojů**

Jednou z možností, jak omezit závislost státu na dodavatelích energetických surovin a jiných vzácných materiálů (např. materiály pro výrobu fotovoltaických panelů), je diverzifikace používaných energetických zdrojů.

### **Poptávka po vyšší flexibilitě v síti**

S rostoucím zastoupením OZE na energetickém mixu roste i poptávka po zvyšování flexibilních zdrojů v elektrické síti.

### **Zapojení českého průmyslu**

Zásadní příležitostí pro ČR je zapojení českého průmyslu do dodavatelského řetězce pro malé modulární reaktory. Vhodné zapojení českých firem představuje možnost obnovení znalostí a schopností spojených s jadernou energetikou a naskýtá příležitost, aby se české společnosti zapojily do celosvětového dodavatelského řetězce a mohly profitovat z širokého nasazení této technologie.

#### 7.2.4. Rizika pro malé modulární reaktory

##### **Nevhodná harmonizace legislativních rámců**

Nevhodná harmonizace schvalovacích procesů a požadavků na SMR má zásadní vliv na vznik dostatečně velkého trhu pro SMR. Malý trh neumožňuje širokou tovární výrobu SMR, která je zásadní pro snížení nákladů a konkurenceschopnosti s ostatními zdroji.

##### **Pokles ceny elektrické energie**

Při dlouhodobě nízkých cenách za elektrickou energii klesají tlaky na výstavbu nových zdrojů.

##### **Pokles zájmu o SMR vlivem finanční krize**

S příchodem finanční krize dochází k poklesu ekonomické aktivity, a tedy klesá i poptávka po elektrické energii, což opět snižuje tlaky na výstavbu nových zdrojů elektrické energie.

##### **Příprava jaderné lokality**

Při přípravě nové jaderné lokality může vstoupit do schvalovacího procesu mnoho zainteresovaných stran. To zvyšuje složitost celého procesu, jelikož je nutné dosáhnout pozitivního souhlasu od státu, dotčeného kraje a okolních vesnic, kde může dojít k odporu vůči nové jaderné lokalitě.

##### **Reakce veřejnosti na SMR**

Postoj většinové společnosti vůči jaderné energii je velmi zásadní, jelikož má přímý vliv na postoje státu a politických elit vůči jaderným technologiím.

##### **Riziko havárie**

S provozem jaderné elektrárny je vždy spojeno riziko havárie, která může zásadně ovlivnit přilehlé okolí.

##### **Velký počet designů**

Pro široké nasazení SMR ve větším měřítku je zásadní velikost trhu pro jednotlivé designy. Pokud dojde k dokončení přílišného počtu designů SMR, tak jednotlivé designy si mohou začít navzájem konkurovat a může dojít ke zmenšení trhu pro jednotlivé designy.

## 7.3. Výsledná SWOT analýza

Tabulka 1: Kvantitativní SWOT analýza<sup>99</sup>

Způsob hodnocení <-2; 2> 2 - Silně pozitivní 1 - Pozitivní 0 - Neutrální -1 - Negativní -2 - Silně negativní													
		Bezemisní z.	Konstrukční řešení	Neelektrické aplikace	Stabilní a regulovatelný z.	Továrna modulární výroba	Využitelnost SMR v elektrické s.	Jaderné palivo	Malé provozní zkušenosti	Nízký výkon	Vysoké LCOE	Výstavba FOAK	Součet
		Silné stránky SMR						Slabé stránky SMR					
Nižší počáteční investiční náklady	Příležitosti	0	0	0	0	2	0	0	0	2	-2	0	2
Poptávka po bezemisních zdrojích		2	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	5
Poptávka po diverzifikaci zdrojů		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Poptávka po vyšší flexibilitě v síti		0	0	2	2	0	2	0	0	1	0	0	7
Zapojení českého průmyslu		0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	2
Nevhodná harmonizace legislativních rámců	Rizika	0	-1	-1	0	-1	0	0	-2	0	0	0	-5
Pokles ceny elektrické energie		0	0	1	0	1	1	0	-1	-1	-2	-1	-2
Pokles zájmu o SMR vlivem finanční krize		0	1	0	1	1	1	0	-1	-2	-2	0	-1
Příprava jaderné lokality		0	0	0	0	0	0	-2	-1	0	0	0	-3
Reakce veřejnosti na SMR		1	1	1	1	1	1	-2	-2	-1	-2	2	1
Riziko havárie		0	2	0	0	0	0	0	-2	0	0	1	1
Přílišný počet dokončených designů		0	1	1	0	-2	0	0	-2	0	-2	0	-4
<b>Součet</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>6</b>	<b>-4</b>	<b>-11</b>	<b>-1</b>	<b>-10</b>	<b>2</b>		

<sup>99</sup> Tato SWOT analýza byla vypracována autorem této bakalářské práce. Uvedené hodnoty pro jednotlivé body vycházejí z autorových znalostí, které nabyt při tvorbě této práce. Jelikož autor pracoval samostatně na této analýze, tak lze předpokládat mírnou zaujatost. Z uvedených důvodů je vhodné k této analýze přistupovat s mírnou rezervou a vzít v potaz možný nový vývoj ve zkoumané problematice (2022).



Z analýzy vyplývá, že uvedené silné stránky dosahují žádaného efektu, tedy zlepšují využívání příležitostí a omezují možná rizika. Dále z analýzy vychází, že žádná silná stránka není absolutně dominantní v porovnání s ostatními silnými stránkami, kterými disponují malé modulární reaktory.

Z analýzy ovšem nevyplývá, že pro úspěšné nasazení SMR je zásadní dosažení tovární výroby, která je podstatná pro snížení nákladů, a tedy zajištění konkurenceschopnosti s ostatními zdroji. Bez tovární výroby a bez snížení nákladů na výrobu lze velmi těžko očekávat nasazení SMR ve větším měřítku. S touto skutečností velmi zásadně souvisí velikost trhu od kterého se odvíjí, zda má ekonomický význam zajišťovat tovární výrobu pro daný design.

U slabých stránek je již možné pozorovat dominantní slabé stránky. Jedná se o malé provozní zkušenosti pro jednotlivé typy SMR a jejich nové systémy. Další dominantní slabou stránkou je vysoký parametr LCOE, který poukazuje na malou konkurenceschopnost s ostatními zdroji. Lze předpokládat, že první SMR se neobejdou bez finančních dotací ze stran států nebo jiných organizací. Po dosažení sériové výroby lze odhadovat snížení nákladů (pokles LCOE) na výstavbu a výrobu jaderných elektráren se SMR a možnost tržního fungování.

Z vyhodnocení příležitostí, kterým jsou vystaveny SMR vyplynulo, že nejvýraznějšími příležitostmi jsou omezování produkce CO<sub>2</sub> a zvyšování flexibility v elektrické síti, která také nepřímo souvisí s omezováním CO<sub>2</sub>, jelikož vyšší flexibilita pomáhá kompenzovat nerovnoměrně dodávaný výkon z OZE.

Uvedená SWOT analýza spatřuje největší riziko bránící úspěšnému nasazení SMR v nevhodné harmonizaci legislativ a špatně nastaveným schvalovacím procesům pro SMR v jednotlivých státech. Dalším významným rizikem je přílišný počet dokončených designů, jež by si navzájem konkurovaly do té míry, že pro jednotlivé designy by se cílové trhy staly příliš malými. Jak bylo zmíněno výše, velikost trhu je zásadní pro úspěšné nasazení SMR a obě nejzásadnější rizika částečně působí na omezování velikosti trhu pro SMR.

Z hodnocení rizik také nepřímo vyplynulo, že reakce veřejnosti na SMR (veřejné mínění o jaderných zdrojích) je ovlivňována řadou vlastností SMR jak pozitivně, tak negativně. V součtu se toto riziko nejeví jako dominantní pro úspěšné nasazení SMR. Ovšem další vývoj událostí spojených se SMR má zásadní vliv na vnímání jaderných technologií veřejností. Při neúspěšných FOAK SMR a špatné komunikaci je možné, že z nepodstatného rizika se stane riziko dominantní. Při úspěšné výstavbě FOAK SMR a vhodné komunikaci s veřejností, může zmiňované riziko naopak působit jako dominantní příležitost.

Pokud je cílem úspěšné nasazení SMR ve větší míře, tak z uvedené analýzy vyplývá, že je vhodné volit strategii zaměřenou na omezení slabých stránek SMR a předcházení dominantním rizikům. Doporučení vyplývající k této strategii jsou uvedena v podkapitolách 7.5. a 7.6.

## 7.4. Malé modulární reaktory v etapách

Vlivem rozdílných stupňů vývoje jednotlivých typů SMR lze předpokládat, že bude docházet k postupnému nasazování SMR. Od nejvíce pokročilých typů po ty nejméně pokročilé.

### 7.4.1. Etapa I.

Etapa I. se vyznačuje nasazováním vodou chlazených SMR (PWR, BWR, PHWR). V období této etapy dochází k dokončování prvních demonstračních SMR vodou chlazených a pokračuje přes postupné nasazování dalších SMR, již dotovaných až čistě komerčně financovaných. První etapa je zásadní i pro ostatní etapy, jelikož při nedostatečném prosazení SMR v první etapě dojde k pochybnostem, zda jsou SMR konkurenceschopnými a jestli by nebylo vhodnější budovat jen velké jaderné reaktory.

Agentura pro atomovou energii při OECD (NEA) v roce 2016 zkoumala tržní potenciál SMR a došla ke dvěma scénářům. Optimistický scénář hovoří, že do roku 2035 bude na světě instalovaný výkon ze SMR a bude 21 GWe. Konzervativní scénář hovoří o instalovaném výkonu menším než je 1 GWe, což odpovídá výkonům jen z dokončených FOAK SMR.<sup>100</sup>

Hlavní využití SMR vodou chlazených lze předpokládat v dodávkách elektrické energie a městského vytápění. S nárůstem OZE v elektrické síti bude nutné kompenzovat výkyvy v dodávkách z těchto zdrojů a lze tak učinit pomocí SMR, jenž budou uplatněny v podpůrných službách sítě. Je to jedna z variant, jak se vyrovnat s vysokým zastoupením OZE v energetickém mixu.

### 7.4.2. Etapa II.

Etapa II. je charakteristická nasazováním pokročilých SMR. V období druhé etapy dochází k dokončování demonstračních pokročilých SMR a pokračuje výstavbou dalších reaktorů.

Primární využití pokročilých SMR je ve výrobě elektrické energie a neelektrických aplikacích, kde mohou nahradit nebo omezit dnes využívaná fosilní paliva. Velmi perspektivní se stává vodíkové hospodářství právě v kombinaci s pokročilými reaktory, jelikož představují efektivnější výrobu vodíku, která je v současnosti hlavní překážkou v širokém nasazení vodíkových technologií.

### 7.4.3. Etapa III.

Ve třetí etapě bude získávat na významu omezenost zdrojů pro jaderná zařízení a bude kladen důraz na řešení tohoto stavu. Vlivem tohoto stavu bude kladen důraz na rychlé reaktory, které mohou omezenost zdrojů štěpných materiálů kompenzovat. Rychlé reaktory jsou schopny transmutovat některé izotopy prvků nevhodných ke štěpným reakcím na izotopy vhodné pro štěpné reakce. Podobných procesů lze využít pro uzavření palivového cyklu z dnes vyhořelého jaderného paliva.

---

<sup>100</sup> NUCLEAR ENERGY AGENCY. Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities [online].

## 7.5. Celkové doporučení pro malé modulární reaktory

Malé modulární reaktory představují příležitost pro vhodné doplnění energetického mixu. Spolu s OZE a velkými jadernými zdroji mohou představovat jednu z alternativ, jak dosáhnout požadavků spojených s uhlíkovou neutralitou. Dále mohou představovat vhodné neemisiční zdroje pro mnoho neelektrických aplikací (viz. kapitola 6).

Hlavní překážka pro úspěšné nasazení SMR je velikost trhu, na kterém se jednotlivé designy mají uplatnit. Pokud by trh pro jednotlivé SMR byl příliš malý, tak nemůže dojít k úsporám plynoucích ze sériové tovární výroby a vhodných skutečností s touto výrobou spojených. Bez dostatečně velkého trhu je vysoce nepravděpodobné, že dojde k úspěšnému nasazení SMR, které budou schopny konkurovat ostatním zdrojům energie a hlavně velkým jaderným zdrojům, které mohou stále dosahovat úspor z rozsahu výroby elektrické energie.

První doporučení se zaměřují na maximalizaci potenciálního trhu pro SMR.

Harmonizace legislativ a licenčních procesů pro SMR a spolupráce mezi jednotlivými státy na těchto procesech může zásadně ovlivnit velikost trhu.<sup>101</sup>

Vhodným postupem může být i spolupráce mezi firmou vyvíjející SMR a regulačním úřadem, který by částečně mohl lépe reagovat na rychlý vývoj v této problematice a mohl případně poukázat na možné nedokonalosti z pohledu licenčních procesů.

Některé státy podporují několik designů SMR. Tento postup může minimalizovat riziko s neúspěšným designem, ale zároveň ve finálním stavu může negativně ovlivnit velikost trhu, vlivem vyšší konkurence. Proto se zdá být vhodné vyvíjet zároveň několik typů SMR jen do určitého stádia vývoje. Od určitého stupně pokročilosti designů je naopak vhodné se zaměřit se státní podporou pouze na nejperspektivnější designy a tím omezit budoucí konkurenci.

Státy a společnosti zabývající se vývojem SMR by měly definovat harmonogram a sdílet co nejširší množství informací potřebných pro kvalifikované rozhodování budoucích zákazníků. Sdílení plánů a informací je zásadní pro tvorbu státních jaderných koncepcí, aby státy měly příležitost tyto nové zdroje do svých úvah zahrnout.

Země zvažující využívání jaderné energie prostřednictvím SMR by měly deklarovat, že o tyto technologie mají zájem ve svém energetickém mixu. Deklarování zájmu o SMR je zásadní pro společnosti vyvíjející SMR, jelikož jim poskytuje informace o možné velikosti trhu pro malé modulární reaktory.

Malé modulární reaktory jsou do jisté míry velmi málo provozně prověřenou technologií. To se také týká nových systémů u provozně prověřených typů. Zejména se jedná o pokročilé reaktory, integrální konstrukce či pasivní bezpečnostní systémy. S nízkými provozními zkušenostmi se pojí neznalost provozní spolehlivosti, bezpečnosti provozu a také může nevhodně působit na veřejné mínění.

Řešením nízkých provozních zkušeností pro různé typy SMR a jejich systémy je výstavba demonstračních reaktorů, která má za cíl ověřit funkčnost a získat nové provozní zkušenosti, které mohou přispět k dalšímu zlepšení designu. Velmi zásadní je výstavba těchto zařízení u velmi málo provozně známých typů SMR. Úspěšná výstavba FOAK může pozitivně působit na veřejné mínění o jaderných zdrojích se SMR.

---

<sup>101</sup> NUCLEAR ENERGY AGENCY. Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities [online].

Veřejné mínění o jaderných technologiích v konkrétních státech má zásadní vliv na zákonodárce, regulační úřady a podporu ze strany státu. Pozitivní veřejné mínění může také nepřímo ovlivňovat zájem budoucích pracovníků, jak na výstavbě, tak v následujícím provozu.

Pro dosažení pozitivního veřejného mínění o SMR je zásadní vést veřejnou diskusi, kde veřejnost bude seznámena s reálnými výhodami a riziky spojených se SMR a bude kladen důraz na vysvětlování principů, důvodů a podobně. Pozitivně může působit na veřejné mínění, také úspěšné dokončování demonstračních reaktorů. V daném státě je vhodné zahájit první výstavbu v oblasti, která má s jaderným zařízením již zkušenosti.

Výše uvedená doporučení platí zejména pro první etapu. Další etapy mohou z případného úspěchu vycházet z těchto doporučení i pro vlastní vhodné nasazení. Zavádění pokročilých SMR ve druhé a třetí etapě budou částečně čelit odlišným výzvám, které budou muset překonat pro úspěšné nasazení. Zejména se jedná o technické výzvy spolu s potřebnou změnou legislativy pro jednodušší využívání jaderného tepla pro neelektrické aplikace. Například zmenšením zón nouzového plánování, kde bude zásadní vykázat vyšší bezpečnostní parametry.

## 7.6. Doporučení pro Českou republiku

Malé modulární reaktory mohou být využity v energetice České republiky jako vhodné doplnění k současným velkým jaderným blokům a být jednou z alternativ, jak doplnit chybějící elektrický výkon v budoucnu odstavovaných uhelných elektrárn. Jelikož SMR jsou neemisioní zdroji, jedná se o více než vhodnou variantu. Zásadní překážkou se může stát cena přepočtená na výkon u těchto zařízení. Výsledné náklady SMR silně závisí na prosazení této technologie ve světě.

Při dosahování cílů pro dosažení uhlíkové neutrality lze předpokládat nárůst podílu OZE na energetickém mixu České republiky. SMR mohou přinést potřebnou flexibilitu do sítě, ve které bude zastoupený velký podíl z OZE. Jednou z alternativ pro bezemisní energetiku České republiky je kombinace OZE a velkých jaderných zdrojů v kombinaci se SMR, jenž by mohly poskytovat potřebnou flexibilitu sítě.

Česká legislativa v současnosti nijak nereflektuje SMR a případné procesy schvalování by probíhaly obdobně, jako u velkých jaderných elektrárn. Vhodnou harmonizací některých procesů s ostatními státy by bylo možné částečně usnadnit licenční procesy pro SMR a hlavně zvětšit možný trh pro některé designy. Také je velmi zásadní poupravit stávající jadernou legislativu s ohledem na malé modulární reaktory,<sup>102</sup> protože za současných podmínek je velmi nepravděpodobné vyšší nasazení SMR v České republice. Vhodným řešením je provádění licenčních procesů pro konkrétní design a nikoli pro konkrétní zařízení. Obdobných licenčních procesů je využíváno v USA a je možné se těmito systémy inspirovat.

Velmi zásadní je komunikace mezi budoucím provozovatelem a společností vyvíjející SMR. Hlavní důvody pro včasnou komunikaci je přísun dostateku informací zákazníkovi, zda daný design je schopen dostát požadavků zákazníka. Tento přístup je velmi vhodný, pokud je zájem se zapojit do zavádění SMR v prvních fázích první etapy. V současnosti probíhají memoranda o porozumění mezi uvažovanými společnostmi zabývajícími se vývojem SMR a společností ČEZ, a.s., zabývající se provozem jaderných energetických zařízení v České republice.

---

<sup>102</sup> Současná jaderná legislativa nijak neodlišuje velké jaderné zdroje od SMR.

Při vhodném nastavení výstavby SMR v ČR a vhodném výběru designu, jenž se může prosadit i celosvětově, se naskýtá několik příležitostí. Zejména zachování jaderného know-how v českém průmyslu. Včasná výstavba dále naskýtá příležitosti pro české společnosti se zapojit do globálního dodavatelského řetězce. Jedním z potenciálních trhů pro SMR, jenž je relativně blízko, je Polsko. To deklaruje zájem o jadernou energetiku, a tedy se jedná o perspektivní potenciální trh právě pro SMR, jenž není příliš vzdálen od ČR.

Vhodnou diskusí na téma jaderné energetiky a SMR lze vhodně stimulovat českou společnost vůči této problematice a stimulovat zájem o obory zabývající se touto tematikou. Velmi zásadní na zahájení veřejné diskuse je její včasnost, jelikož nějaký čas trvá, než se projeví pozitivní efekty vhodně vedené diskuse.

Velkou praktickou výzvou pro ČR je schvalování nových jaderných lokalit, jelikož je nutné zajistit možnost napojení na elektrickou síť a dostatečný přísun chladicí vody. Vlivem nižších požadavků na chladicí vodu jsou SMR vhodné do více lokalit v porovnání s velkými jadernými zdroji. Velmi zásadní je také zalidněnost zvažované lokality. S rostoucím zalidněním rostou i možné komplikace spojené se schvalovacími procesy, do kterých může zasáhnout více stran.

## 7.7. První malý modulární reaktor v České republice

Společnost ČEZ, a.s., deklarovala zájem o výstavbu malého modulárního reaktoru v areálu jaderné elektrárny Temelín.<sup>103</sup> Společnost ČEZ, a.s. je v současné době jediným provozovatelem jaderných zdrojů na území ČR. Lze předpokládat, že i v dohledné době se bude jednat o jedinou společnost, která má predispozice pro provoz SMR. V dlouhodobém pohledu lze uvažovat, že by jaderná zařízení v ČR provozovaly i jiné společnosti.

Hlavní požadavky, které klade společnost ČEZ, a.s., na SMR je dostatečný výkon, jelikož jsou zamýšleny pro energetické užití. Společnost ČEZ, a.s. uvažuje o reaktorech, které disponují výkonem nad 100 MWe. Typy reaktorů, které přicházejí v úvahu jsou takové reaktory, se kterými má společnost ČEZ, a.s. již nějaké zkušenosti. Zejména jsou brány v úvahu reaktory lehkovodní. Dalším požadavkem je, aby výstavba SMR v ČR měla významnou přidanou hodnotu pro místní průmysl, což silně závisí na výsledném dodavatelském modelu.<sup>104</sup>

Tabulka 2: Zvažované typy SMR pro jadernou elektrárnu Temelín<sup>105</sup>

SMART	NuScale	UK SMR	SMR160	BWRX-300	NUWARD™
Korea	USA	UK	USA	USA, Japonsko	Francie

### 7.7.1. Technologické kritérium

Jedním z hlavních kritérií, jenž slouží pro výběr vhodného designu, je technologické kritérium. To hodnotí jednotlivé designy z pohledu konstrukčních řešení, porovnává jednotlivé designy mezi sebou a řeší požadavky zákazníka.

<sup>103</sup> ČERNÝ, Viktor. Malé modulární reaktory – budoucnost jaderné energetiky? [online].

<sup>104</sup> Tamtéž

<sup>105</sup> Tamtéž

Tabulka 3: Parametry zvažovaných SMR a zjednodušené hodnocení designů<sup>106, 107</sup>

2 - Velmi vhodný 1 - Vhodný 0 - Méně vhodný	SMART	NuScale	UK SMR	SMR160	BWRX-300	NUWARD™
Země původu	Korea	USA	UK	USA	USA, Japonsko	Francie
Typ	Integrální PWR	Integrální PWR	PWR	PWR	BWR	Integrální PWR
Hodnocení	2	2	2	2	1	2
Elektrický výkon [MWe]	107	60/modul	470	160	270	170
Hodnocení	1	1	2	1	2	1
Typ oběhu chladicího média	Nucený	Přirozený	Nucený	Přirozený	Přirozený	Nucený
Hodnocení	-	-	-	-	-	-
Typ paliva	UO <sub>2</sub>	UO <sub>2</sub>	UO <sub>2</sub>	UO <sub>2</sub>	UO <sub>2</sub>	UO <sub>2</sub>
Hodnocení	1	1	1	1	1	1
Obohacení paliva	Pod 5 %	Pod 5 %	Pod 5 %	Pod 5 %	Pod 5 %	Pod 5 %
Hodnocení	1	1	1	1	1	1
Délka kampaně [měsíců]	30	24	18-24	24	12-24	24
Hodnocení	2	1	1	1	1	1
Životnost	60 let	60 let	60 let	80 let	60 let	60 let
Hodnocení	1	1	1	2	1	1
Začátek provozu FOAK	2027	2029	poč. 2030	2029	2028	2034
Hodnocení	1	1	1	1	1	0
Bepečnostní systémy	Pasivní	Pasivní	Aktivní a pasivní	Plně pasivní	pasivní	pasivní
Hodnocení	-	-	-	-	-	-
Součet	9	8	9	9	8	7

Z uvedeného hodnocení technologických parametrů mezi uvažovanými SMR se jednotlivé typy výrazně neliší. Nejméně vhodným se jeví francouzský SMR NUWARD™. Z uvedeného hodnocení dále vyplývá, že velmi pozitivně působí, pokud uvažovaný design se v mnoha parametrech podobá reaktorům, se kterými má společnost ČEZ, a.s., již nějaké zkušenosti.

Uvedené parametry a hodnocení jednotlivých parametrů vycházejí z veřejně dostupných informací a požadavků kladených na SMR společností ČEZ, a.s.

### 7.7.2. Kritérium zapojení českého průmyslu

Vhodným nastavením dodavatelského modelu a zapojením českých společností do výstavby nového zdroje se SMR lze dosáhnout obnovení zkušeností a schopností spojených s výstavbou jaderných zdrojů v ČR. Dalším vhodným faktorem je, že část investovaných finančních prostředků zůstane v ČR a využití českých společností může vést k novým pracovním místům.

Úspěšné zapojení českých firem do výstavby nového zdroje se SMR může vést k zapojení do regionálního nebo světového dodavatelského řetězce pro daný design a umožnit českým společnostem profitovat z dalšího rozšiřování daného designu. Proto je velmi zásadní vybrat pro ČR takový design, který má šanci se prosadit celosvětově.

Český průmysl má historickou zkušenost s výstavbou jaderných zdrojů a značně může přispět i současný vývoj vlastních SMR v ČR.

Kritérium zapojení českého průmyslu do výstavby nového jaderného zdroje se SMR nabývá na významu, pokud zájem o SMR není omezen jen na získání nového zdroje, ale také na zlepšování konkurenceschopnosti a obnovení schopností a zkušeností.

<sup>106</sup> ČERNÝ, Viktor. Malé modulární reaktory – budoucnost jaderné energetiky? [online].

<sup>107</sup> INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Advances in Small Modular Reactor Technology Developments [online].

### **7.7.3. Kritérium ceny investice**

Cena investice je zásadní ve většině projektů a bývá zásadním kritériem výběru. V případě výstavby prvního jaderného zdroje se SMR v ČR je možné uvažovat, že ostatní kritéria mohou být zásadnější pro ČR jako celek. Zaměřením na jiná kritéria je možné dosáhnout více pozitivních vlivů.

### **7.7.4. Závěrečné doporučení pro výběr prvního malého modulárního reaktoru**

V této podkapitole byla nastíněna nejpodstatnější kritéria, která mohou být užita při výběru prvního designu SMR pro ČR. Z toho by mělo vyplynout, že kladením důrazu na jiná kritéria, než jen na cenu investice by mohlo vést k výrazně pozitivnějším vlivům působícím na ČR, jako celek.

## Závěr

Tato bakalářská práce se zabývá malými modulárními reaktory, které mohou poskytnout vhodné doplnění energetického mixu, jak z hlediska náhrady za emisní zdroje, tak kvůli zvýšení flexibility v síti vynucené nárustem podílu obtížně predikovatelných obnovitelných zdrojů. Vedle toho mohou najít využití v mnoha dalších neelektrických aplikacích.

Práce začíná definicí malých modulárních reaktorů a seznámením čtenáře s důvody, proč je vhodné se zabývat touto technologií, a uvádí základní fyzikální principy, na kterých jsou malé modulární reaktory postaveny. Dále práce shrnuje všechny typy konstrukcí a principů fungování pro typy reaktorů proveditelných ve variantách malých modulárních reaktorů (SMR). Na konstrukci SMR navazuje shrnutí možných parametrů, jak z pohledu výstupních teplot, tak i z pohledu bezpečnostních parametrů.

Hlavní část této bakalářské práce se zabývá využitím SMR v energetice a jejich možnému využití při omezování CO<sub>2</sub>, jak z pohledu nedostatku výkonu způsobeným omezováním emisních zdrojů, tak jako doplnění flexibility v elektrické síti. Poslední kapitola pojmenovává nejzásadnější slabé stránky a rizika SMR technologie a pokouší se navrhnout doporučení pro úspěšné nasazení malých modulárních reaktorů jak ve světě, tak i v rámci České republiky.

Bakalářská práce spatřuje v SMR velký potenciál, co se týká možností využití. Zejména se jedná o využití v elektrické síti v základním zatížení a podpůrných službách sítě, kde mohou SMR vhodně doplnit energetický mix skládající se z velkých jaderných zdrojů a OZE. Velkým přínosem se mohou stát pokročilé SMR, které umožňují řadu využití v neelektrických aplikacích. Nejpodstatnější neelektrickou aplikací se jeví výroba vodíku. Práce se dále zabývá posuzováním vlastností SMR a okolností jejich případného nasazení pomocí SWOT analýzy, která identifikuje nejpodstatnější vlivy a vlastnosti. Z analýzy je patrné, že pro úspěšné nasazení je nutné zvolit strategii omezení slabých stránek a předcházení rizikům. Pro tuto strategii z analýzy vyplývá řada doporučení, která jsou popsána v kapitolách 7.5 a 7.6. Tato práce spatřuje největší rizika, která mohou stát za neúspěšným nasazením SMR, ve velikosti trhu pro jednotlivé designy a v reakci veřejnosti vůči jaderným zdrojům v dané zemi.

Hlavními publikačními zdroji pro tuto bakalářskou práci, zejména pro identifikaci hlavních vlivů na rozšíření SMR, byly dokumenty uveřejněné Mezinárodní agenturou pro atomovou energii a Agenturou pro atomovou energii při OECD. Zásadním zdrojem pro pochopení SMR v rámci České republiky byly schůzky s panem Ing. Viktorem Černým, členem představenstva společnosti Elektrárna Temelín II, a. s., zorganizované vedoucím práce.

Navázat na tuto bakalářskou práci je jistě možné. Zejména se může jednat o důkladnější zhodnocení SMR s ohledem na dynamicky se vyvíjející energetickou situaci ČR z důvodu geopolitických a plánovaného masivního nasazení OZE v nejbližších letech.



## Zdroje:

- [1] ARGONNE NATIONAL LABORATORY. Defense in Depth [online]. [cit. 2022-11-11]. Dostupné z: [https://www.ne.anl.gov/pdfs/nuclear/defense\\_in\\_depth\\_fanning.pdf](https://www.ne.anl.gov/pdfs/nuclear/defense_in_depth_fanning.pdf)
- [2] CANDU reactor. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. [cit. 2022-11-3]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/CANDU\\_reactor](https://en.wikipedia.org/wiki/CANDU_reactor)
- [3] ČERNÝ, Viktor. Malé modulární reaktory - budoucnost jaderné energetiky? [online]. [cit. 2022-11-11]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=0sgKH3fkFmE>
- [4] ČEZ. GRAFIT - MODERÁTOR [online]. [cit. 2022-12-5]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/vykladovy-slovník-energetiky/hesla/grafit.html>
- [5] ČEZ. RADIOAKTIVITA SLOUŽÍ [online]. [cit. 2022-10-27]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/nuklearni/k23.htm>
- [6] Encyklopedie fyziky [online]. 2006 [cit. 2022-10-11]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/>
- [7] ENCYKLOPEDIIE FYZIKY. Jaderné štěpení [online]. [cit. 2022-10-15]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/818-jademe-stepeni>
- [8] ENCYKLOPEDIIE FYZIKY. Vazebná energie jádra [online]. [cit. 2022-10-15]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/799-vazebna-energie-jadra>
- [9] FARMER, Matt. Where will the first small modular nuclear reactors be? [online]. [cit. 2022-11-27]. Dostupné z: <https://www.power-technology.com/features/where-will-the-first-small-modular-nuclear-reactors-be/>
- [10] HEŘMANSKÝ, Bedřich a Ivan ŠTOLL. Energie pro 21. století. Praha: České vysoké učení technické, 1992.
- [11] HEŘMANSKÝ, Bedřich. Jaderné reaktory. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1981.
- [12] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Advances in Small Modular Reactor Technology Developments [online]. [cit. 2022-11-10]. Dostupné z: [https://aris.iaea.org/Publications/SMR\\_Book\\_2020.pdf](https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2020.pdf)
- [13] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Benefits and Challenges of Small Modular Fast Reactors [online]. [cit. 2022-11-24]. Dostupné z: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1972web.pdf>
- [14] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. In Operation & Suspended Operation Reactors [online]. [cit. 2022-10-30]. Dostupné z: <https://pris.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/OperationalReactorsByType.aspx>
- [15] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Industrial applications and nuclear cogeneration [online]. [cit. 2022-11-25]. Dostupné z: <https://www.iaea.org/topics/non-electric-applications/industrial-applications-and-nuclear-cogeneration>
- [16] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Passive Safety Systems and Natural Circulation in Water Cooled Nuclear Power Plants [online]. [cit. 2022-11-16]. Dostupné z: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te\\_1624\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1624_web.pdf)
- [17] KOREL, Jan. Projektování a měření přídavného uzemnění vedení VVN a ZVN [online]. Praha, 2020 [cit. 2022-10-08]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/han-dle/10467/86031/F3-DP-2020-Korel-Jan-DIPLOMOVA%20PRACE%20-%20JAN%20KOREL.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Diplomová práce.

- [18] MATZIE, R.A., J. LONGO, R.B. BRADBURY, K.R. TEARE a M.R. HAYNS. Design of the Safe Integral Reactor [online]. [cit. 2022-11-12]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002954939290114B>
- [19] MINISTERSTVO PRŮMYSLU A OBCHODU. VODÍKOVÁ STRATEGIE ČESKÉ REPUBLIKY [online]. [cit. 2022-11-18]. Dostupné z: [https://www.mpo.cz/assets/cz/rozcestnik/pro-media/tiskove-zpravy/2021/7/3VL-03-Vodikova-strategie\\_v030b.pdf#page=42&zoom=100,90,561](https://www.mpo.cz/assets/cz/rozcestnik/pro-media/tiskove-zpravy/2021/7/3VL-03-Vodikova-strategie_v030b.pdf#page=42&zoom=100,90,561)
- [20] NUCLEAR ENERGY AGENCY. Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities [online]. [cit. 2022-11-27]. Dostupné z: [https://www.oecd-neo.org/jcms/pl\\_57979/small-modular-reactors-challenges-and-opportunities](https://www.oecd-neo.org/jcms/pl_57979/small-modular-reactors-challenges-and-opportunities)
- [21] NUCLEAR ENERGY AGENCY. Small Modular Reactors: Nuclear Energy Market Potential for Near-term Deployment [online]. [cit. 2022-12-16]. Dostupné z: <https://www.oecd-neo.org/upload/docs/application/pdf/2019-12/7213-smrs.pdf>
- [22] NUCLEAREUROPE. FORATOM outlines flexible nuclear solution to intermittent renewable challenge [online]. [cit. 2022-11-24]. Dostupné z: <https://www.nucleareurope.eu/press-release/foratom-outlines-flexible-nuclear-solution-to-intermittent-renewable-challenge/>
- [23] OBJECTIVE SOURCE E - LEARNING. Reaktory IV generace [online]. [cit. 2022-11-9]. Dostupné z: <https://www.osel.cz/index.php?obsah=19&id=6>
- [24] POWER. Upgrade your BWR recirc pumps with adjustable-speed drives [online]. [cit. 2022-10-31]. Dostupné z: <https://www.powermag.com/upgrade-your-bwr-recirc-pumps-with-adjustable-speed-drives/>
- [25] SVĚT ENERGIE. PARNÍ TURBÍNA [online]. [cit. 2022-11-2]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/jaderne-elektrarny/jaderna-elektrarna-podrobne/parni-turbina/vyklad>
- [26] SVĚT ENERGIE. REAKTOR [online]. [cit. 2022-11-2]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/jaderne-elektrarny/jaderna-elektrarna-podrobne/reaktor/vyklad>
- [27] ULLMANN, Vojtěch. Jaderné reakce a jaderná energie [online]. [cit. 2022-10-25]. Dostupné z: <https://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika3.htm>
- [28] WAGNER, Vladimír. Jaderné reaktory IV. generace využívající roztavené soli [online]. [cit. 2022-11-9]. Dostupné z: [http://hp.ujf.cas.cz/~wagner/popclan/transmutace/solne\\_reaktory.htm](http://hp.ujf.cas.cz/~wagner/popclan/transmutace/solne_reaktory.htm)
- [29] WALTON, Robert. \$60/MWh for advanced nuclear electricity is achievable, says GE Hitachi executive [online]. [cit. 2022-12-16]. Dostupné z: <https://www.utilitydive.com/news/advanced-nuclear-ge-hitachi-mwh-nuscale-smr-small-modular-reactor/630154/>
- [30] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. Economics of Nuclear Power [online]. [cit. 2022-12-16]. Dostupné z: <https://world-nuclear.org/information-library/economic-aspects/economics-of-nuclear-power.aspx>
- [31] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. Fast Neutron Reactors [online]. [cit. 2022-11-10]. Dostupné z: <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/fast-neutron-reactors.aspx>
- [32] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. Hydrogen Production and Uses [online]. [cit. 2022-11-17]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear.org/information-library/energy-and-the-environment/hydrogen-production-and-uses.aspx>

- [33] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. Molten Salt Reactors [online]. [cit. 2022-11-7]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/molten-salt-reactors.aspx>
- [34] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. Nuclear Power Reactors [online]. [cit. 2022-10-30]. Dostupné z: <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/nuclear-power-reactors.aspx>
- [35] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. Nuclear Process Heat for Industry [online]. [cit. 2022-11-10]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear.org/information-library/non-power-nuclear-applications/industry/nuclear-process-heat-for-industry.aspx>
- [36] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. Small Nuclear Power Reactors [online]. [cit. 2022-10-09]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx>
- [37] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. Thorium [online]. [cit. 2022-11-2]. Dostupné z: <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/thorium.aspx>
- [38] WORLD NUCLEAR NEWS. China's demonstration HTR-PM reaches full power [online]. [cit. 2022-12-09]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/China-s-demonstration-HTR-PM-reaches-full-power>