



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

**MOŽNOSTI VYUŽITÍ MALÝCH MODULÁRNÍCH
REAKTORŮ V TEPLÁRENSTVÍ**

POSSIBILITIES OF USING SMALL MODULAR REACTORS IN THE HEATING INDUSTRY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Duchoň

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Pavel Milčák

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Jan Duchoň**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Pavel Milčák**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Možnosti využití malých modulárních reaktorů v teplárenství

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Malé modulární reaktory se postupně vyvíjí již několik desítek let. Jejich uplatnění se nachází zejména v námořní dopravě. Nyní se malé modulární reaktory dostávají do popředí i pro stacionární zdroje jako možná substituce uhelných tepláren.

Cíle bakalářské práce:

- stručný úvod do jaderné energetiky,
- popis malých modulárních reaktorů,
- analýza velikostí tepláren v ČR,
- možnosti aplikace malých modulárních reaktorů pro teplárenství v ČR.

Seznam doporučené literatury:

BEČVÁŘ, Josef. Jaderné elektrárny. 2. vyd. Praha: SNTL/ALFA, 1981, 634 s.

KLIK, František a Jaroslav DALIBA. Jaderná energetika. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002, 189 s. : il. ; 30 cm. ISBN 80-01-02550-0.

DUBŠEK, František. Jaderná energetika. Brno: PC DIR, 1994, 209 s. ISBN 80-214-0538-4.

MURRAY, Raymond LeRoy a Keith E HOLBERT. Nuclear energy: an introduction to the concepts, systems, and applications of nuclear processes. 7th ed. Amsterdam: Elsevier, 2015, xvii, 550 s. : il. ISBN 978-0-12-416654-7.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá jadernou energetikou, a to především malými modulárními reaktory a jejich možného využití v teplárenství. První kapitoly práce jsou věnovány historii jaderné energetiky, vysvětlení klíčových pojmů a popsání jaderných reaktorů obecně. Jedním z hlavních témat, které je popsáno v další části jsou malé modulární reaktory, jejich klíčoví zástupci, široké využitím a porovnání výhod a nevýhod tohoto druhu reaktorů. Dále se práce věnuje stručnému úvodu do teplárenství, situací v České republice a analýzou velikostí českých tepláren. V závěru jsou pak tyto informace využity k posouzení možného využití SMR v českém teplárenství jako náhradu za teplárny na fosilní paliva.

Klíčová slova

Jaderná energetika, jaderné reaktory, SMR, teplárenství, teplárny

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with nuclear energy, mainly focusing on small modular reactors and their possible use in heating industry. The first chapters are focused on history of nuclear energy, explaining key concepts and describing nuclear reactors and their principle in general. One of the crucial topics, covered in the following section are small modular reactors, key examples of SMRs, their wide range of uses and comparison of advantages and disadvantages of this type of reactors. Next chapter consists of introduction to heating industry, description of situation in Czech republic and analysis of Czech heating plants. The final chapter uses acquired information to assess potential use of SMRs in Czech heating industry as a replacement for fossil fuel heating plants.

Key words

Nuclear energy, nuclear reactors, SMR, heating industry, heating plants

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DUCHOŇ, Jan. *Možnosti využití malých modulárních reaktorů v teplárenství* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132728>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Pavel Milčák.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem *bakalářskou* práci na téma **Možnosti využití malých modulárních reaktorů v teplárenství** vypracoval(a) samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Jméno a příjmení

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Pavlu Milčákovi za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce.

OBSAH

ÚVOD	7
1 Úvod do jaderné energetiky	8
1.1 Historie	8
1.2 Radioaktivita	8
1.3 Jaderné reakce	8
1.3.1 Štěpná řetězová reakce	9
1.4 Jaderné Palivo	9
2 Jaderné reaktory	10
2.1 Popis jaderného reaktoru	10
2.2 Princip jaderného reaktoru	11
2.3 Druhy jaderných reaktorů	11
2.4 Generace jaderných reaktorů	11
2.4.1 Generace I	11
2.4.2 Generace II	11
2.4.3 Generace III	12
2.4.4 Generace III+	12
2.4.5 Generace IV	13
2.5 Zhodnocení jaderných reaktorů	14
3 Malé modulární reaktory	15
3.1 Úvod a rozdělení reaktorů	15
3.2 Důvody pro vývoj malých modulárních reaktorů	15
3.3 Současná situace a budoucnost SMR	15
3.4 Zástupci SMR	17
3.4.1 NuScale	17
3.4.2 mPower	18
3.4.3 SMART	19
3.4.4 PHWR-220	19
3.4.5 BREST-OD-300	20
3.4.6 SVBR-100	21
3.4.7 4S	22
3.4.8 KLT-40S	23
3.4.9 EM ²	23
3.4.10 HTR-PM	24
3.4.11 TEPLATOR	25
3.5 Využití SMR	26
3.5.1 Výroba elektrické energie v rozvojových a vyspělých zemích a odlehlých oblastech	26
3.5.2 Desalinace vody	26
3.5.3 Námořní doprava	26
3.5.4 Výroba vodíku	26
3.5.5 Teplárenství	27
3.5.6 Kogenerace	27

3.6	Zhodnocení SMR	27
4	Teplárenství v ČR	28
4.1	Úvod to teplárenství	28
4.1.1	Rankin-Clausiov cyklus	28
4.1.2	Zásobování teplem.....	29
4.2	Současný stav teplárenství v ČR.....	29
5	Teplárenské společnosti v ČR a jejich zařízení	30
5.1	Veolia Energie ČR, a.s.	30
5.1.1	Teplárna Olomouc	30
5.1.2	Teplárna Přerov	31
5.1.3	Elektrárna Třebovice.....	31
5.1.4	Teplárna Krnov.....	31
5.2	Pražská teplárenská, a.s.	31
5.2.1	Výtopna Krč	31
5.3	Elektrárna Mělník 1.....	32
5.4	Teplárny Brno, a.s.	32
5.5	Teplárna Liberec, a.s.	32
5.6	Plzeňská Teplárenská, a.s.	32
5.7	Teplárna České Budějovice, a.s.	33
5.8	Teplárna Kladno, s.r.o.	33
5.9	Teplárna Zlín, s.r.o.	33
5.10	Teplárna Trmice, a.s.....	33
5.11	Shrnutí	33
6	Aplikace SMR v teplárenství v ČR.....	35
6.1	Reaktory vhodné pro náhradu tepláren na fosilní paliva.....	35
6.1.1	TEPLATOR	35
6.1.2	NuScale	35
6.1.3	SVBR-100	36
6.1.4	Další vhodné reaktory	36
6.2	Teplárny nahraditelné malými reaktory	36
6.2.1	Teplárna Liberec.....	36
6.2.2	Centrální teplárna v Plzni a zařízení Energetika	37
6.2.3	Teplárna Trmice	37
6.2.4	Elektrárna Třebovice.....	37
6.2.5	Výtopna Krč	37
6.3	Využití zbylého uhlí	37
6.4	Výhody nahrazení tepláren SMR.....	37
6.5	Nevýhody nahrazení tepláren SMR	38
	ZÁVĚR.....	39
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	40
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	47

ÚVOD

Poptávka po energii v současnosti stále roste, a to jak po elektrické, tak tepelné. Zároveň roste důraz na ekologii a snížení emisí vytvářených energetickým průmyslem. Přitom je stále velká porce světové energie vyráběna právě v zařízeních na fosilní paliva, které i přes modernizaci stále vylučují velké množství škodlivých emisí.

Jedním z řešení by mohla být jaderná energetika, která sice není obnovitelný zdroj, ale je díky ní možné vytvářet velké množství energie bez vytváření velkého množství emisí. I přes útlum jaderné energetiky v posledních letech, které zavinila vysoká pořizovací cena a havárie, nastal velký pokrok ve vývoji nových reaktorů, které jsou nyní mnohem bezpečnější, a kromě výroby elektrické energie by mohla být využita i v teplárenství jako ekologičtější alternativa. Tento potenciál by se dal využít i v České republice, kde je stále ve velké množství tepláren na černé nebo hnědé uhlí.

V práci je popsána technologie malých modulárních reaktorů, které se v posledních letech dostávají do popředí jako stacionární zdroje energie, dále se pak věnuje analýze teplárenství v ČR a možnosti využití technologie SMR jako náhradu tepláren na fosilní paliva.

První kapitola se věnuje úvodu do jaderné energetiky. Obsahuje stručnou historii vývoje a vysvětluje některé základní pojmy a princip štěpné reakce.

Druhá kapitola se věnuje jaderným reaktorům, jejich součástem a také vývoji reaktorů v generacích s uvedenými příklady reaktorů.

Třetí kapitola se věnuje malým modulárním reaktorům, jejich výhodám oproti běžným reaktorům, poté se věnuje jednotlivým významným typům, které jsou již ve vývoji. Na závěr kapitoly jsou uvedena možná využití a shrnutí SMR.

Další dvě kapitoly se věnují rozboru teplárenství v ČR, včetně stručného úvodu do teplárenství. Dále je provedena analýza velikostí a výkonů různých tepláren.

Poslední kapitola se věnuje možnému využití SMR v teplárenství jako náhrada za teplárny na fosilní paliva, jsou v ní navrženy některé teplárny, které by bylo možné nahradit a na závěr jsou uvedeny pro a proti využití této technologie.

1 Úvod do jaderné energetiky

1.1 Historie

Základy pro jadernou energetiku byly položeny již na konci 19. století zásluhou vědců jako byl například Henri Becquerel, který objevil přirozenou radioaktivitu, kterou pak dále zkoumali Marie a Pierre Curieovi. V roce 1919 se pak podařilo Ernestu Rutherfordovi uměle přeměnit prvek. Na tyto objevy navázali další vědci a v roce 1938 se poprvé podařilo rozštěpit jádro uranu. První řízená štěpná reakce byla provedena o několik let později. Další jaderný výzkum se pak nesl ve znamení vývoje atomové bomby, která byla využita při náletu na japonská města Hirošima a Nagasaki. V 50. letech minulého století byla do sítě připojena první jaderná elektrárna, a to ve městě Obninsk v tehdejší Sovětské svazu. Jaderné reaktory se začaly také používat jako pohon ponorek. Touto dobou se vývoj jaderných reaktorů pro komerční užití zrychlil, avšak například v USA začal zpomalovat kolem 70. let. Mezi hlavní důvody tohoto zpomalení vývoje patří obavy o bezpečnost jaderných reaktorů a otázka likvidace radioaktivního odpadu. Popularitu jaderné energetiky pak prudce srazila Černobylská havárie v roce 1986. Na území České republiky momentálně fungují 2 jaderné elektrárny, a to v Dukovanech a v Temelíně. Od černobylské havárie zažívá odvětví jaderné energetiky spíše stagnaci, ačkoliv má zřetelný podíl na světové produkci energie. Tuto stagnaci může ukončit například vývoj nových reaktorů pro širší využití, jako například právě malé modulární reaktory, o kterých pojednává tato práce [1], [2].

1.2 Radioaktivita

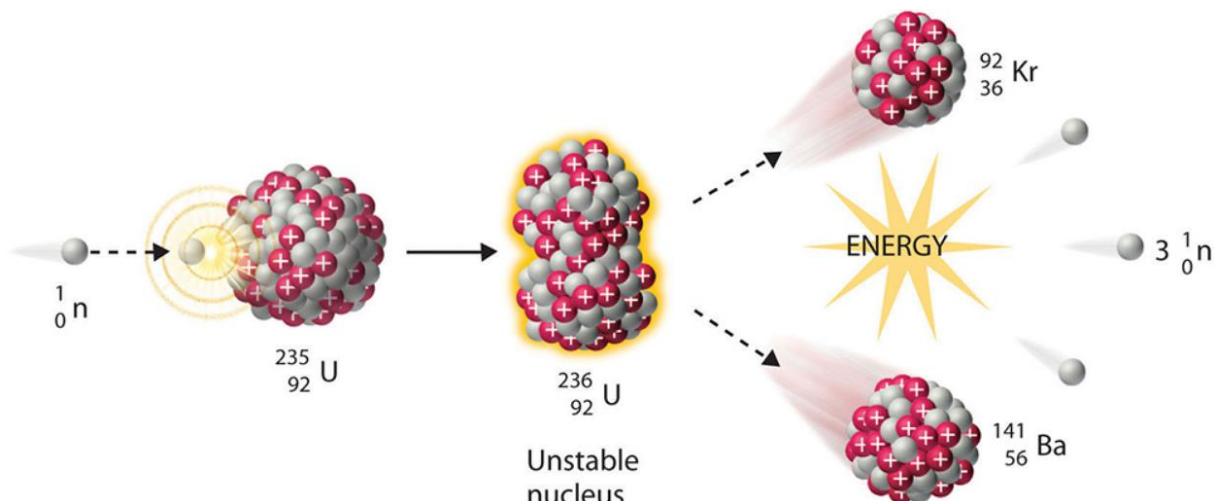
Radioaktivita je schopnost atomových jader se samovolně přeměňovat za vzniku ionizujícího záření. Přirozenou radioaktivitu pak projevují radioaktivní nuklidy. Tento proces probíhá zpravidla za účelem zvýšení stability nuklidu. Existuje několik způsobů přeměn těchto radioaktivních nuklidů a sice:

- a) Přeměna alfa
- b) Negativní přeměna beta
- c) Pozitivní přeměna beta
- d) Přejchod gama
- e) Neutronová emise

Způsob přeměny je pak určen poměrem počtu neutronů a protonů v jádře daného nuklidu, například jádra s přebytkem neutronů jsou obvykle zářiči beta. Z těchto druhů přeměn má význam pro práci jaderných reaktorů právě přeměna beta [3].

1.3 Jaderné reakce

Jsou jaderné přeměny, ke kterým dojde při vzájemné interakci jader nebo při interakci jader s různými částicemi. Při interakci jádra s částicí dojde k vniknutí částice do jádra a jeho následné přestavbě. Při tomto vniknutí musí nabitá částice překonat potenciálovou bariéru, ovšem nenabitá částice, kupříkladu neutron, nemusí. Tyto reakce je pak možné rozdělit na několik typů. Při transmutaci vznikne z terčového jádra produkt s málo rozdílným protonovým a nukleonovým číslem. Během štěpení z terčového jádra vzniknou dvě jádra se značně rozdílným protonovým a nukleonovým číslem. Po rozštěpení každého jádra dojde k uvolnění velkého množství energie. Tříštění spočívá v tom, že po ostřelování terčového jádra se uvolní velký počet produktů reakce. Jaderná syntéza je pak značně odlišná, dochází totiž ke slučování jader, přičemž produkt je jedno jádro s větším protonovým číslem. Řízená jaderná syntéza je v současnosti pouze předmětem výzkumu. Při těchto reakcích musí být zachovány zákony zachování energie, hybnosti, elektrického náboje, počtu nukleonů a hmotnosti [3], [4], [5].



Obrázek 1 - Štěpení uranu neutronem [6]

1.3.1 Štěpná řetězová reakce

K zahájení reakce je potřeba kritické množství štěpného materiálu. Množství závisí na více faktorech, mezi které patří uspořádání aktivní zóny, druh moderátoru a u uranu také stupeň obohacení. Štěpný materiál mohou být pouze některá těžká jádra, například plutonium nebo uran. Dále je potřeba takové uspořádání, aby alespoň jeden neutron neuniknul z pozorované reakce a způsobil další štěpení. Pro řízenou řetězovou reakci je pak potřeba zvolit takové uspořádání, aby se jednalo o právě jeden neutron způsobující další štěpení, jinak dojde k extrémnímu uvolňování energie a k jadernému výbuchu [4], [5].

1.4 Jaderné Palivo

Za nejčastější jaderné palivo se dá považovat jednoznačně uran, dále se pak používá thorium, ovšem v menší míře, kvůli jeho ceně a komplikované úpravě na samotné palivo. Běžné jaderné palivo je založeno na uranu ^{235}U . Ten se vyskytuje v podobě různých uranových rud o různých koncentracích samotného uranu. Tyto rudy se vyskytují přibližně stejně často, jako zinek nebo cín. Uran samotný je pak rozdělen podle stupně obohacení izotopem ^{235}U na:

- a) Přírodní: 0,71%
- b) Slabě obohacený: 1-5%
- c) Středně obohacený: 5-20%
- d) Silně obohacený: 20 a více%

Nejrozšířenější podobu jaderného paliva je keramická peleta oxidu uraničitého. Tyto pelety jsou poté uloženy do hermeticky uzavřené trubice, tzv. palivového proutku. Svazek těchto proutků pak tvoří palivovou kazetu. Palivové kazety se pak vkládají do reaktoru [7], [8], [9].



Obrázek 2 - Palivová kazeta tlakovodního reaktoru [10]

2 Jaderné reaktory

2.1 Popis jaderného reaktoru

Jaderný reaktor je generátor tepelné energie, která se uvolňuje pomocí samovolně se udržující štěpné řetězové reakce. Vytváří tedy prostředí složené ze štěpitelných a dalších materiálů, ve kterém se odvodem tepla zajišťuje, aby reaktor nebyl poškozen. Tepelná energie, která vznikne přeměnou z energie jaderné, se pak používá k výrobě elektrické energie [4], [5].

Většina běžných jaderných reaktorů obsahuje několik základních komponentů, které jsou klíčové pro chod reakce. Štěpná řetězová reakce probíhá v aktivní zóně. V palivových kazetách je uloženo jaderné palivo. Zde je chráněno před vnějšími vlivy a je zabráněno úniku radioaktivních štěpných produktů, zároveň však stále předává teplo chladivu.

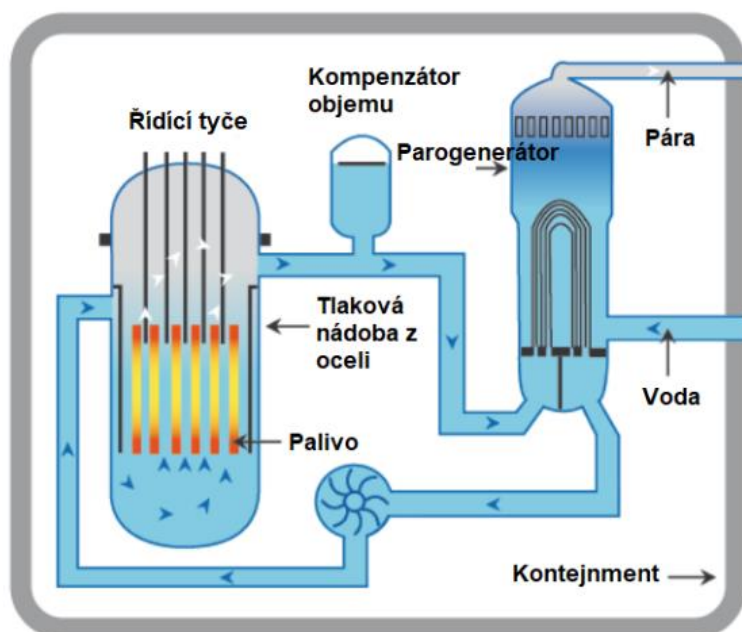
Dalším komponentem je moderátor, který slouží ke zpomalení rychlých neutronů vzniklých při štěpení, aby došlo k další štěpné reakci. Jako příklady moderátoru je možné zmínit vodu, těžkou vodu nebo grafit.

Řídící tyče jsou vyrobeny z materiálu, který pohlcuje neutrony, například kadmium, hafnium nebo bor. Tyto tyče se zasunují nebo vysunují za účelem řízení výkonu reaktoru, popřípadě zastavení štěpné reakce.

Chladivo je složka, která odvádí z aktivní zóny teplo generované palivem. Pro tento účel se používá například voda, těžká voda nebo oxid uhličitý.

V tlakovodních reaktorech se v parogenerátoru tvoří pára pomocí chladiva, které je pod velkým tlakem a je reakcí ohřáto na vysokou teplotu. Pára pak putuje do sekundárního okruhu jaderné elektrárny, k turbíně.

Reaktor je umístěn v tlakové nádobě, která je vyráběna především z oceli s různými příměsemi. Tato tlaková nádoba je někdy nahrazena tím, že je jaderný reaktor uspořádán v řadě tlakových kanálů. Celá tato konstrukce je pak ukryta v kontejnmentu, což je ochranná stavba z betonu a oceli, která chrání reaktor před vnějšími vlivy a zároveň chrání okolí před následky radiace v případě nehody uvnitř reaktoru. Právě na bezpečnost reaktoru jsou kladeny obrovské nároky a tomu odpovídá i konstrukce a zvolené materiály těchto součástí [2], [11]



Obrázek 3 - Schéma tlakovodního jaderného reaktoru [11]

2.2 Princip jaderného reaktoru

V jaderném reaktoru probíhá řízená štěpná řetězová reakce v palivu. Jádra paliva (nejčastěji izotop ${}_{92}\text{U}^{235}$) jsou zasahována zpomalenými neutrony a rozpadají se na jádra lehčích prvků, tzv. *fragmenty*. Při každém štěpení se také uvolní 2-3 rychlé neutrony. Fragmenty se od sebe rozletí velkou rychlostí a zabrzdí se srážkami s ostatními atomy paliva, čímž vzniká teplo. Toto teplo se poté dá použít při výrobě elektrické energie. Uvolněné neutrony pak mohou způsobit štěpení dalších jader uranu. [5].

2.3 Druhy jaderných reaktorů

Jaderné reaktory můžeme dělit podle několika hledisek. Podle způsobu využití se dají rozdělit na školní, výzkumné, na výrobu energie, na chemickou výrobu a pro speciální účely. Podle produkce paliva pak na tzv. *breedery*, což jsou reaktory, které produkují více jader nových štěpných materiálů chemicky stejného druhu, než spalují. Dále na *pseudobreedery*, u kterých je nový štěpný materiál chemicky jiného druhu, než samy spalují. *Konvertory* vyrábí méně nových jader štěpných materiálů, než spalují. *Burnery* se na produkci paliva nepodílí. Rozdělit se také dají podle rozložení moderátoru na homogenní, kde se využívá směs nebo roztok paliva a moderátoru a heterogenní, které využívají palivo v člancích a řídicí tyče. Právě heterogenní reaktory jsou v dnešní době víceméně samozřejmostí [1], [4].

2.4 Generace jaderných reaktorů

Od prvních reaktorů pro využití v energetice, které vznikly v 50. letech minulého století byly učiněny výrazné pokroky v oblastech efektivity a bezpečnosti, přičemž by se jaderné reaktory daly pomocí těchto pokroků rozdělit do několika generací. Jednotlivé generace se poučovaly z nedokonalostí a chyb generací předchozích, obrovskou pozornost ohledně bezpečnosti reaktorů pak strhly havárie elektráren Three Miles Island a Černobyl.

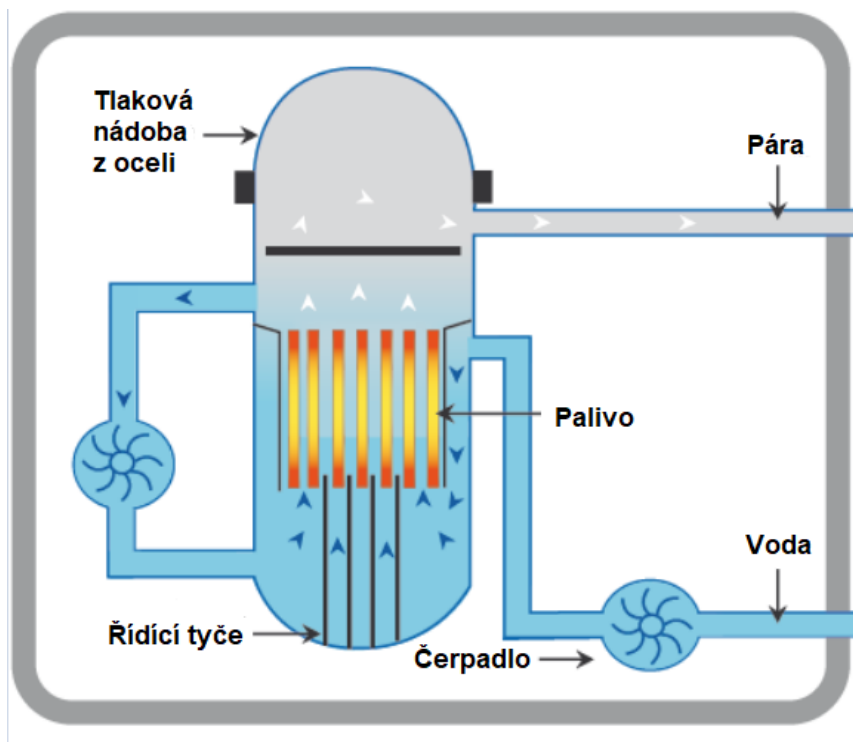
2.4.1 Generace I

První generace jaderných reaktorů byly hlavně prototypy, z nichž se pro využití v energetice spousta neuplatnila. Jelikož se jednalo o nové odvětví, tyto reaktory měly pouze základní bezpečnostní prvky. Dá se říct, že z dlouhodobého hlediska jejich největším užitkem bylo připravení půdy pro další, efektivnější a bezpečnější generace jaderných reaktorů [12].

Jako příklady reaktorů generace I je možné uvést reaktor první jaderné elektrárny připojené do veřejné sítě – Obninsk AM-1. Dále pak Jaslovské Bohunice A-1, což je první československá jaderná elektrárna nebo reaktor v britské jaderné elektrárně Wylfa, který sloužil až do roku 2015 [12].

2.4.2 Generace II

Druhá generace zavedla nové bezpečnostní prvky na zvýšení bezpečnosti reaktorů a snížení rizika nehod. Nevýhodou těchto nově zavedených bezpečnostních prvků je, že jsou tzv. aktivní, tedy musí být aktivovány člověkem a nefungují bez přívodu elektřiny. I přes tyto nevýhody představuje druhá generace obrovský pokrok. Reaktory druhé generace jsou momentálně nejrozšířenější využívané reaktory na světě. Nejvyužívanějšími se staly hlavně lehkovodní tlakové a lehkovodní varné reaktory. Reaktory druhé generace jsou využívány i v České republice, a to v Dukovanech, kde jsou 4 tlakovodní reaktory ruského typu VVER-440 o celkovém výkonu 2040 MWe a v Temelíně, kde jsou dva reaktory VVER-1000 o celkovém výkonu 2168 MWe. Právě tlakovodní reaktory PWR (Rusky VVER) tvoří více než polovinu reaktorů druhé generace. PWR i varné BWR využívají jako palivo obohacený uran ve formě oxidu uraničitého a moderátorem i chladičem je lehká voda. Rozdíl je v tom, že v PWR se vytváří pára pomocí parogenerátoru z reakcí zahřáté vody, zatímco v BWR reaktorech se pára tvoří přímo v reaktoru [12], [13], [14].



Obrázek 4 - Schéma jaderného reaktoru BWR [11]

Další reaktory druhé generace jsou například tlakovodní reaktor CANDU, který je moderovaný i chlazený těžkou vodou nebo varný reaktor RBMK chlazený lehkou vodou a moderovaný grafitem [12].

2.4.3 Generace III

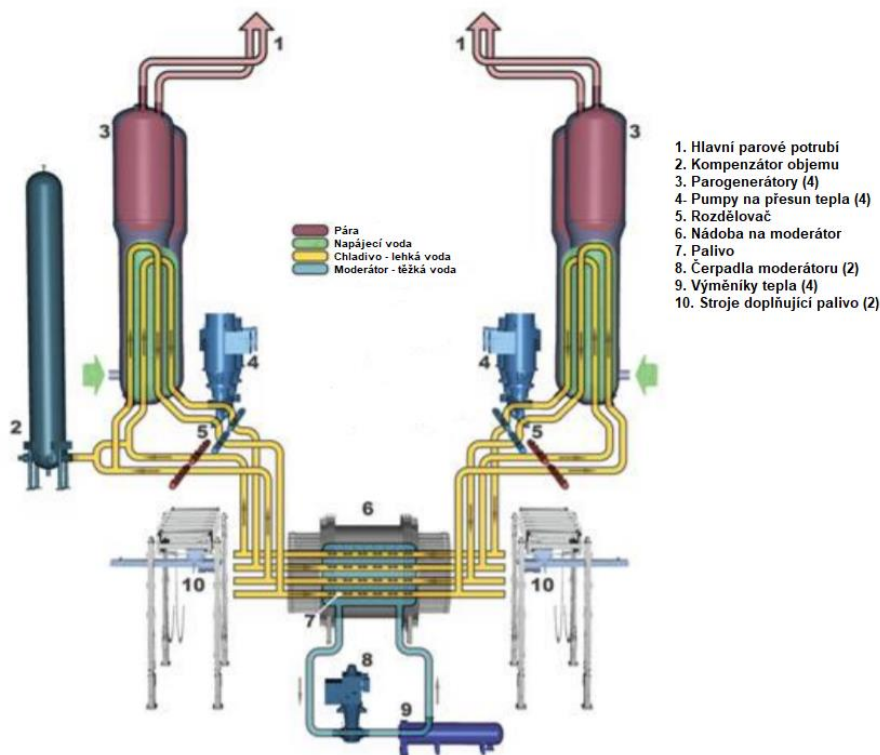
Třetí generace má oproti svým předchůdcům více standardizovaný design kvůli licencování, snížení nákladů a času výstavby. Dále jsou navrženy jednodušeji pro lehčí řízení a snížení šance na selhání obsluhy, je snížena pravděpodobnost přehřátí reaktoru a roztavení paliva. Byly také vylepšeny bezpečnostní prvky, a to jak vůči vícenásobným poruchám, tak proti vnějším vlivům. Byla zvýšena efektivita využití jaderného paliva, čímž se snížila spotřeba uranu a objem radioaktivního odpadu. Dalším vylepšením je prodloužení doby mezi odstávkami a také celková provozní doba reaktorů – zhruba 60 let [12], [15].

Zhruba v době vývoje třetí generace reaktorů (70. a 80. léta) došlo k haváriím v elektrárnách Three Mile Island a Černobyl, které výrazně zhoršily pohled veřejnosti na jaderné elektrárny a jejich bezpečnost. Byl to jeden z důvodů, proč začalo odvětví stagnovat a za dlouhou dobu se nových reaktorů uvedlo do provozu jen velmi málo. Mezi významné zástupce této generace patří vylepšený CANDU-6, vylepšená verze svého předchůdce a vylepšený varný reaktor ABWR [12].

2.4.4 Generace III+

Tato generace, velmi podobná generaci III se zaměřuje hlavně na vylepšení bezpečnostních prvků reaktoru. Jsou zde nově uvedeny pasivní prvky, které jsou nezávislé na lidské zásahu a řídí se přírodními zákonitostmi jako jsou gravitace – kdy regulační tyče jsou nad aktivní zónou umístěny pomocí elektromagnetů a v případě nutnosti do ní spadnou vlastní vahou. Další pasivní prvky jsou založeny na proudění, odolnosti proti tlaku nebo teplotám. Tyto systémy mají zajistit bezpečný provoz i v nouzovém stavu po dobu 72 hodin bez lidského zásahu. Byl také vylepšen kontejnment a celková bezpečnost proti vnějším vlivům.

V současnosti jde o nejmodernější reaktory, které jsou ve světě dostupné a které splňují aktuální přísné podmínky licencování a provozu. Mezi tuto generaci se řadí například americký AP1000, ruský VVER-1200 (oba tlakovodní) nebo kanadský těžkovodní ACR-1000.

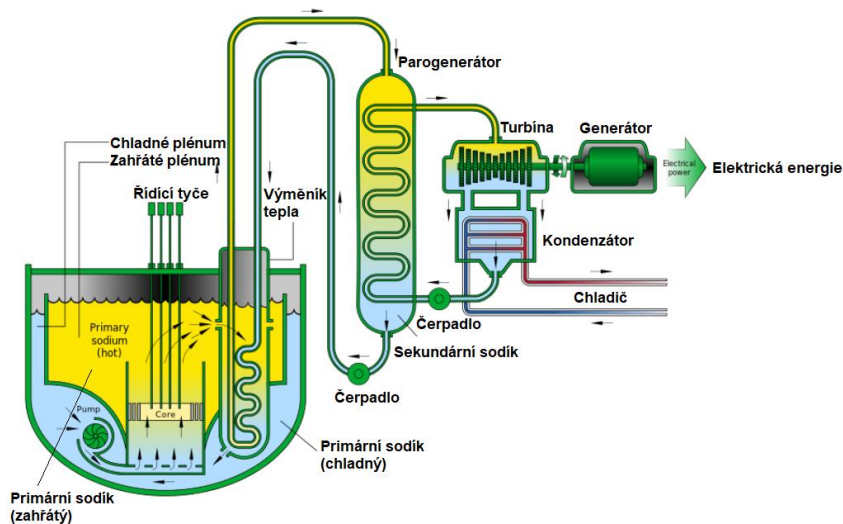


Obrázek 5 - Schéma těžkovodního reaktoru ACR-1000 [16]

2.4.5 Generace IV

Tato generace je stále ještě ve vývoji, již nyní je však jasné, že se od reaktorů generace III a III+ bude výrazně lišit. Co se přirozených vylepšení týče, tyto reaktory by měly mít vylepšené využití paliva, nižší tvorbu radioaktivního odpadu, být bezpečnější a ekonomicky konkurenceschopné. Hlavní vylepšení bezpečnosti spočívá v tzv. inherentních bezpečnostních prvcích, což znamená, že vážné havárie by měl zabránit samotný princip fungování reaktoru. Většina z těchto reaktorů má pracovat s uzavřeným palivovým cyklem. Momentálně se jimi zabývá Mezinárodní fórum pro IV. generaci. Právě tato mezinárodní spolupráce vybrala 6 návrhů, kterými se nyní zabývá podrobně. U žádného z reaktorů se však neočekává provoz dříve, než v roce 2030. Mezi těchto 6 návrhů patří GFR (plynem chlazený rychlý reaktor), LFR (olovem chlazený rychlý reaktor), MSR (reaktor založený na roztavených solích), SCWR (superkritický vodou chlazený reaktor), SFR (sodíkem chlazený rychlý reaktor) a VHTR (reaktor s velmi vysokými teplotami) – tento reaktor je možné využít i k výrobě vodíku [12], [17].

SFR reaktor se vyznačuje tím, že jako chladivo využívá tekutý sodík, který umožňuje chladiwu operovat i za vyšších teplot a nižšího tlaku, čímž je zvýšena efektivita a bezpečnost reaktoru. Navíc stejně jako u ostatních rychlých reaktorů zde není potřeba neutrony zpomalovat, což by mohlo umožnit tomuto reaktoru využívat i palivo již použité současnými reaktory [19].



Obrázek 6 - Schéma reaktoru SFR [18]

2.5 Zhodnocení jaderných reaktorů

Jaderné reaktory prošly za posledních 70 let řadou změn a vylepšení. Kromě efektivity byla hlavní pozornost věnována bezpečnosti, která je čím dál tím méně závislá na člověku. Kvůli jaderným haváriím, jako se stala například v Černobylu, Fukušimě či jaderné elektrárně Three Mile Island došlo ke zpomalení odvětví, a ačkoliv již existují modernější a lepší varianty, největší podíl reaktorů v provozu stále tvoří právě reaktory II. generace vyvinuté v 60. a 70. letech, a to hlavně tlakovodní a varné reaktory. To je dáno velkými omezeními zakázek z důvodu licencování, bezpečnosti a otázky ukládání radioaktivního odpadu. I přesto hrají klíčovou roli v produkci energie, a to jak ve světovém měřítku, tak i z pohledu České republiky.

K obnovení popularity může pomoci právě vývoj nových, efektivnějších a bezpečnějších reaktorů, jejich rozsáhlé využití, ať už jako pohon lodí či ponorek, výroba elektrické energie, tepla nebo odsolování mořské vody (například jaderný reaktor BN-350 v Kazachstánu). Dalším důvodem k širšímu využití jaderných reaktorů je silící volání po snížení uhlíkové stopy například v podobě Pařížské dohody.

Pro výrobu tepla jako náhradu za uhelné teplárny by mohly sloužit malé modulární reaktory, o kterých bude pojednáno v následující kapitole.

3 Malé modulární reaktory

3.1 Úvod a rozdělení reaktorů

Malé modulární reaktory (SMR – Small modular reactor) fungují na stejném principu štěpení jako běžné jaderné reaktory, za malé se však považují tehdy, když jejich elektrický výkon není vyšší než 300 MWe. Reaktory, které mají elektrický výkon 300 až 700 MWe jsou považovány za střední a reaktory nad 700 MWe jsou pak velké. Další kategorie by pak mohla být ještě pro mini reaktory, které mají výkon do 50 MWe. Tohle rozdělení je podle mezinárodní agentury pro atomovou energii [20].

Americké ministerstvo energetiky používá pro rozdělení tepelný výkon, kdy mini reaktory mají do 250 MWt, malé do 1000 MWt, střední od 1000 do 2000 MWt a velké mají tepelný výkon nad 2000 MWt [20].

3.2 Důvody pro vývoj malých modulárních reaktorů

Mezi hlavní důvody pro vývoj SMR patří ekonomické hledisko. SMR jsou navrhovány tak, aby se daly vyrábět sériově, čímž se snižuje riziko prodlevy ve výstavbě. Další výhodou je, že velká investice, která často investory odrazuje, se dá rozdělit tak, že je možné postavit menší počet jednotek a podle poptávky je pak možné výkon zvyšovat stavbou nových modulů, namísto jedné velké investice do velkého reaktoru. SMR mají také výhodu v méně časté výměně paliva, která je potřeba pouze jednou za 3 – 4 roky [20], [22].

Díky své menší velikosti a bezpečnostním prvkům, které jsou minimálně srovnatelné s reaktory III. a III+ generace, kdy zahrnují i řadu pasivních prvků, jsou vhodné pro využití v zemích, které nemají rozvodnou síť na takové úrovni, aby k ní bylo možné připojit velký reaktor. Také je to bezpečnější možnost pro země, které nemají s jadernými reaktory velké zkušenosti [20], [21], [22].

Dalším důležitým důvodem, který zejména v poslední době nahrává vývoji SMR je snaha snížit uhlíkovou stopu. Vzhledem k tomu, že SMR mají nulové emise CO₂, jsou vhodným kandidátem pro nahrazení některých elektráren využívajících fosilní paliva [22].

3.3 Současná situace a budoucnost SMR

Ačkoliv je většina SMR teprve ve vývoji, existují již některé SMR v provozu, a další jsou již ve výstavbě. Tyto reaktory jsou uvedeny v tabulkách 1 a 2.

Tabulka 1 - SMR v provozu [21]

Název	Kapacita	Typ	Dodavatel
CNP-300	300 MWe	PWR	SNERDI/CNNC, Pákistán a Čína
PHWR-220	220 MWe	PHWR	NPCIL, Indie
EGP-6	11 MWe	LWGR	Bilibino, Sibiř, Rusko
KLT-40S	35 MWe	PWR	OKBM, Rusko
RITM-200	50 MWe	PWR	OKBM, Rusko

Tabulka 2 - SMR ve výstavbě [21]

Název	Kapacita	Typ	Dodavatel
CAREM25	27 MWe	PWR	CNEA a INVAP, Argentina
HTR-PM	210 MWe	HTR	INET, CNEC a Huaneng, Čína
ACP100/Linglong One	125 MWe	PWR	CNNC, Čína

V roce 2020 vydala Mezinárodní agentura pro atomovou energii (IAEA) novou verzi své knihy, která popisuje postup a novinky v technologii SMR. Je zde popsáno přes 70 různých designů v různých fázích vývoje od různých dodavatelů. Největšími přispěvateli byly hlavně firmy z USA, Ruska, Číny a Kanady, jsou zde však designy od firem z Velké Británie, Jihoafrické republiky a například i z České republiky [21]. V následující tabulce jsou pak uvedeny některé SMR, které jsou v současnosti ve stádiu vývoje. Většina reaktorů jsou lehkovodní, ve vývoji jsou ale i těžkovodní, chlazené tekutými kovy nebo plynem [22].

Tabulka 3 - SMR ve vývoji [22]

Země	Název	Výrobce	Výkon (MWe/MWt)
Lehkovodní reaktory			
Argentina	CAREM	CNEA	25/100
Brazílie	FBNR	FURGS	72/218
Francie	Flexblue	DCNS	160/600
Korea	SMART	KAERI	100/330
	ABV-6M	OKBM Afrikantov	8,3/38
	SHELF	NIKIET	6/28
Rusko	VK-300	RDIPE	250/750
	WWER-300	OKBM Hidropress	300/850
	UNITHERM	RDIPE	2,5/20
	mPower	Babcock & Wilcox	195/575
USA	NuScale	NuScale Power	77/250
	Westinghouse SMR	Westinghouse	225/800
Reaktory chlazené tekutými kovy			
Čína	CEFR	CNEIC	20/65
Japonsko	4S	Toshiba	10/30
	BREST-OD-300	RDIPE	300/700
Rusko	SVBR-100	AKME	101/280
USA	G4M	Gen4 Energy	25/70
Plynem chlazené reaktory			
Čína	HTR-PM	Tsinghua Univ.	200/500
JAR	PBMR1	PBMR	164/400
	GT-MHR	General Atomics	150/350
USA	EM ²	General Atomics	240/500

3.4 Zástupci SMR

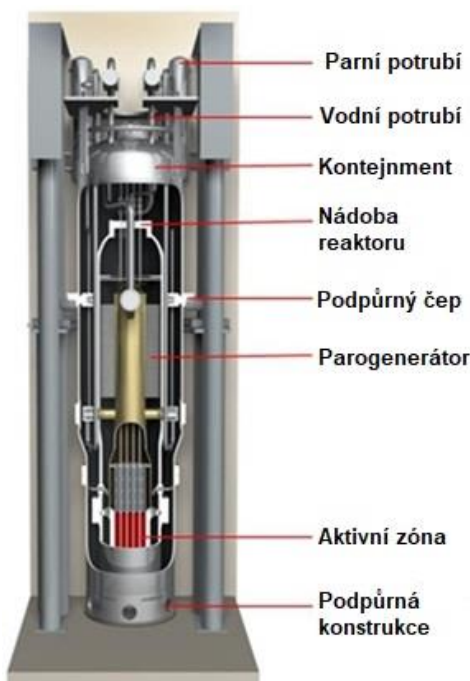
3.4.1 NuScale

Reaktor od firmy NuScale Power se jako první dočkal schválení od americké Nuclear Regulatory Commission. Jedná se o lehkovodní reaktor, kde jsou všechny prvky pro výrobu páry a výměnu tepla integrované v jednom modulu. Jeden modul má elektrický výkon 77 MWe a tepelný výkon 250 MWt. V návrhu se počítá s využitím více modulů pro jednu elektrárnu, a to konkrétně 4, 6 nebo 12 modulů, přičemž každý modul pracuje samostatně. Elektrické výkony těchto verzí elektráren jsou znázorněny v tabulce 4 [23], [24].

Tabulka 4 - Elektrický výkon elektrárny s SMR od NuScale Power [24]

Počet modulů	Výkon (hrubý) MWe	Výkon (čistý) MWe
Jeden modul	77	-
4 moduly	308	293
6 modulů	462	441
12 modulů	924	884

Reaktor je uložen v tlakové nádobě, která je vysoká necelých 20 metrů a v průměru má zhruba 3 metry. V nádobě se kromě aktivní zóny a řídicích tyčí s regulačními klastry nacházejí také dva parogenerátory a kompenzátor objemu, přičemž každý reaktor má vlastní turbínu a parogenerátor. Nádoba je uložena v kontejneru, který je o několik jednotek metrů vyšší a širší. Celá tato sestava je uložena v bazénu s vodou, který se nachází pod zemí. Samotný reaktor pak pracuje s využitím principu přirozeného oběhu hnaného vztlakem. Ohřátá voda procházející aktivní zónou předá svou energii vodě v sekundárním okruhu, tím se ochladí a pomocí gravitace opět klesne pod aktivní zónu. Tím je zajištěna přirozená cirkulace vody a nejsou potřeba žádná čerpadla [22], [23], [25].



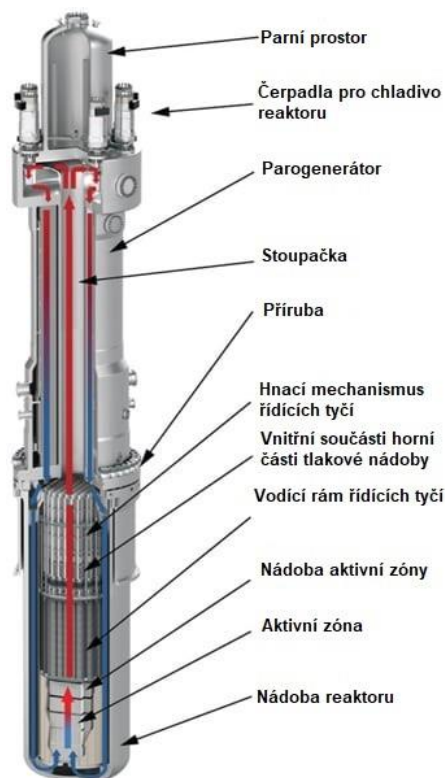
Obrázek 7 - Řez reaktorem NuScale [26]

Palivo je uloženo v 37 palivových souborech standardních tlakovodních reaktorů západního typu s mříží 17×17, se zkrácenou délkou – na 2 metry. Jako palivo se používá UO_2 , které má standardně obohacení do 5 %. Palivový cyklus je dvouletý, s více obohaceným palivem jde však zvýšit až na 4 až 5 let [22], [23].

Bezpečnost reaktoru je mimo jiné zajištěna pomocí vysokotlakého kontejnmentu, havarijního akumulátoru, dvou pasivních systémů odvodu zbytkového tepla a chlazení kontejnmentu. Cílem těchto prvků je hlavně zajistit stabilní chlazení aktivní zóny i na delší časové úseky, čímž se snižuje riziko a případný rozsah havárií. U NuScale reaktoru se počítá se životností 60 let [22], [27].

3.4.2 mPower

Reaktor mPower vyvíjený společností Babcock & Wilcox je stejně jako NuScale lehkovodní reaktor integrálního provedení, tedy v tlakové nádobě jsou umístěny i například výměníky. Rozdíl je však ve výkonu i v samotné konstrukci. Tento SMR má elektrický výkon 195 MWe a tepelný výkon 575 MWt. Ve své konstrukci využívá čerpadla. Je také navržen pro možné rozšiřování, tedy pro využití více modulů [22], [27].



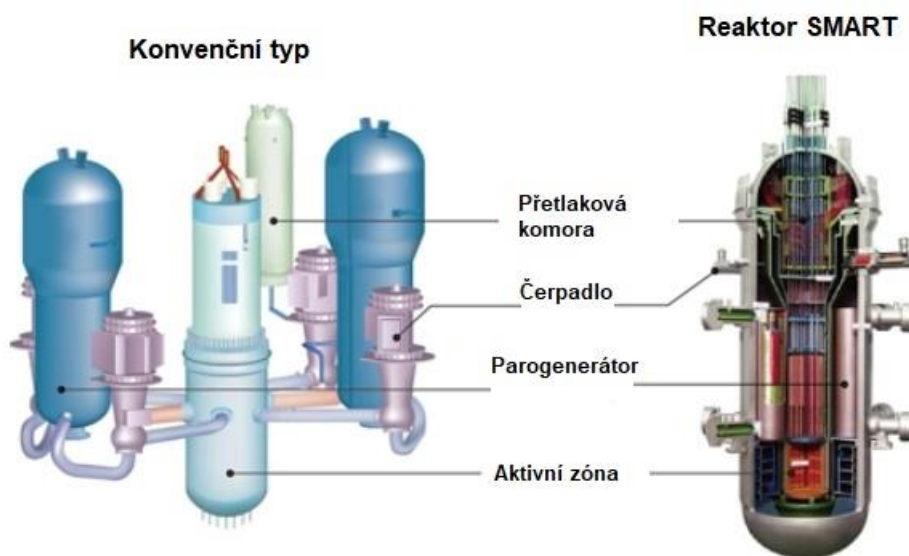
Obrázek 8 - Reaktor mPower [28]

Palivové soubory jsou zde stejné, jako u reaktoru NuScale, tedy standardního tlakovodního reaktoru západního typu s mříží 17×17, zkrácené na délku 2 metry, s tím rozdílem, že zde se souborů používá 69. Palivo je opět obohacováno do 5 %. Palivový cyklus se předpokládá čtyřletý, tato doba však jde podle potřeb zákazníka zkrátit či prodloužit [22].

Reaktor je umístěn pod zemí a využívá pasivní bezpečnostní prvky. Také je navržen tak, že konstrukce znemožňuje havárii způsobenou ztrátou chladiva. Parogenerátory jsou zde nahrazeny výměníky, které jsou tvořeny trubkovými spirálami a stejně jako čerpadla jsou integrované v nádobě reaktoru. U reaktoru se předpokládá životnost 60 let [22], [27].

3.4.3 SMART

Jedná se o lehkovodní reaktor, který je navržený k výrobě elektrické energie a odsolování mořské vody. Je vyvíjen Korejským institutem pro výzkum atomové energie (KAERI) a od roku 2015 na něm spolupracuje také Saúdská Arábie. Jedná se o jeden z prvních reaktorů integrálního typu. Tepelný výkon reaktoru je 365 MWt. Současně může vyrábět 110 MWe nebo 100 MWe elektřiny a 40 000 tun odsolené vody. V roce 2021 oznámila firma Korea Hydro & Nuclear Power, že spolupracuje s KAERI na vylepšení designu reaktoru SMART, a to hlavně z ekonomického hlediska, přičemž se pro vylepšený reaktor pokusí získat licenci do roku 2028 [21], [29].



Obrázek 9 - Porovnání konvenčního reaktoru s reaktorem SMART [30]

Reaktor využívá 57 palivových souborů, které jsou zkrácené, jinak ale podobné souborům pro standardní PWR. Jako palivo se používá UO_2 a je obohacováno na 4,8 %. Palivový cyklus reaktoru je tříletý. [31].

V tlakové nádobě se kromě aktivní zóny s palivem a kompenzátorem objemu nachází také 8 parogenerátorů a čtyři čerpadla chladicí kapaliny. Toto uspořádání umožňuje použití potrubí s menším průměrem, čímž se snižuje riziko havárie spojené s velkou ztrátou chladiva [29].

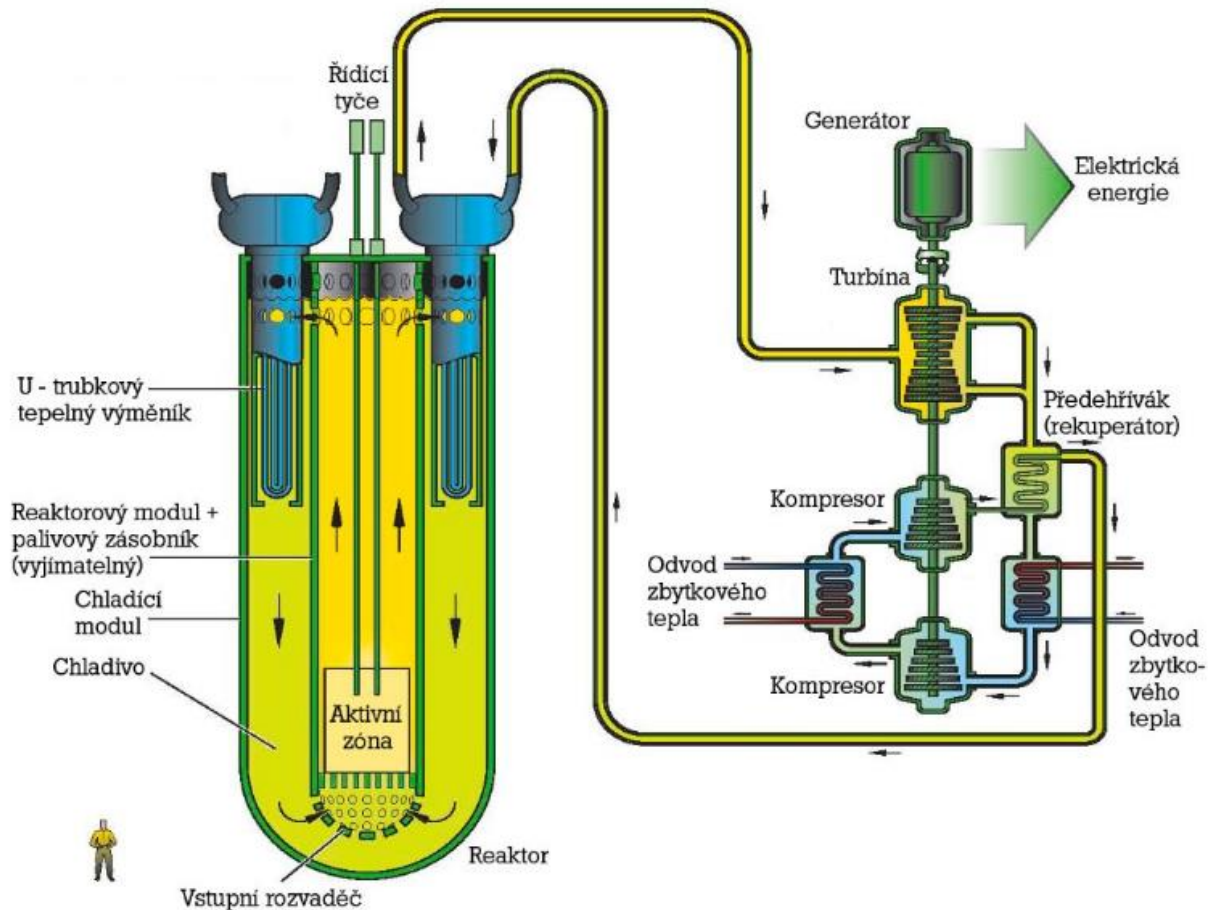
Během vývoje byly již všechny aktivní bezpečnostní prvky nahrazeny za pasivní, čímž došlo k dalšímu zvýšení bezpečnosti reaktoru. V případě nehody mohou být využity také parogenerátory jako výměníky tepla pro odvod zbytkového tepla. Životnost reaktoru je podle návrhu 60 let. [27], [29].

3.4.4 PHWR-220

Reaktor indického návrhu je tlakovodní, přičemž využívá těžkou vodu jako chladivo i moderátor. Je založen na kanadském výzkumu, od kterého pak vznikaly novější, bezpečnější verze. Tepelný výkon reaktoru je 755 MWt a elektrický výkon je 236 MWe. Palivo je na bázi uranu a palivový cyklus je dva roky. Tento reaktor se využívá v oblastech s potřebou malého nebo středního reaktoru a nepřináší moc zásadních novinek v konstrukci, je však v provozu už delší dobu [20], [21].

3.4.5 BREST-OD-300

Ruský rychlý neutronový reaktor – neobsahuje tedy moderátor zpomalující neutrony. Je chlazený olovem a v konstrukci obsahuje nadkritické parogenerátory. Při návrhu tohoto reaktoru bylo vycházeno z dlouholetých zkušeností s reaktory chlazenými olovem a bizmutem, které Rusko používá v jaderných ponorkách. Reaktor má tepelný výkon 700 MWt a elektrický výkon 300 MWe. Provoz tohoto reaktoru by měl být zahájen v roce 2026 [31].



Obrázek 10 – Schéma olovem chlazeného rychlého reaktoru [34]

Jako palivo se používá směs U-Pu v nitridové formě a palivový cyklus reaktoru je deset měsíců. Palivo je možné recyklovat na místě bez omezení, pomocí místních zařízení [31].

Důležitý princip u reaktoru chlazeného tekutým olovem je samotné chlazení těžkým kovem. Stejně jako u tlakovodních reaktorů se využívá šíření tepla prouděním. Rozdíl je v tom, že olovo má vyšší teplotu varu, není tedy potřeba dosahovat vysokých tlaků. Navíc v primárním okruhu nevzniká radioaktivní pára. Další výhodou je, že přirozená cirkulace chladiva postačuje jako pasivní ochlazování reaktoru po odpojení ze sítě [35].

Hlavní komponenty reaktoru jsou ponořeny v bazénu naplněném olovem při atmosférickém tlaku. Komponenty primárního okruhu musí být způsobilé k provozu po celou životnost bloku za provozních podmínek. Musí mít tedy velkou odolnost vůči korozi, radiaci a teplotě [31], [32].

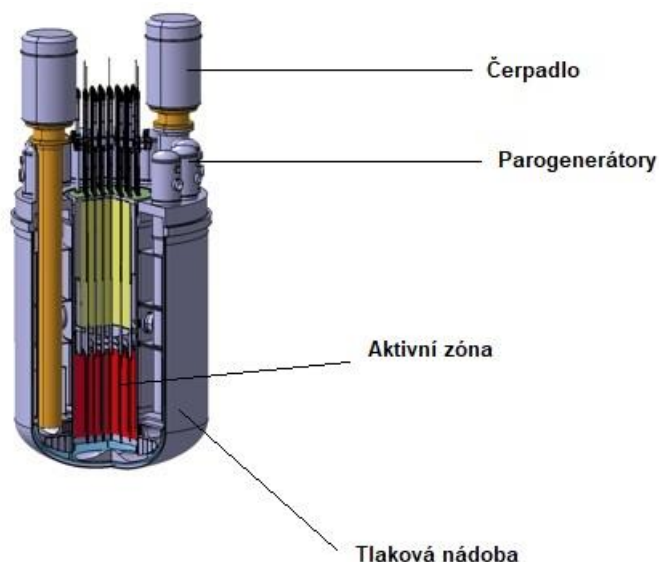
Cílem tohoto reaktoru je ověřit uzavřený palivový cyklus se zařízeními na opětovnou výrobu paliva. Dalším cílem je pak v praxi ověřit inherentní bezpečnostní prvky. Po testování a ověření těchto cílů bude reaktor uveden do provozu pro zásobování sítě [27], [33].



Obrázek 11 - Reaktor BREST-OD-300 [27]

3.4.6 SVBR-100

Jedná se o malý modulární rychlý reaktor integrálního typu chlazený tekutými kovy, konkrétně slitinou olovo-bismut. Podobně jako u reaktoru BREST-OD-300 zde bylo vycházeno ze zkušeností z provozu reaktorů s tímto chladičem v jaderných ponorkách. Tepelný výkon reaktoru je 280 MWt a maximální elektrický výkon je 101 MWe, během provozu se elektrický výkon pohybuje v závislosti na vlastnostech páry mezi 75 a 101 MWe [22], [27].



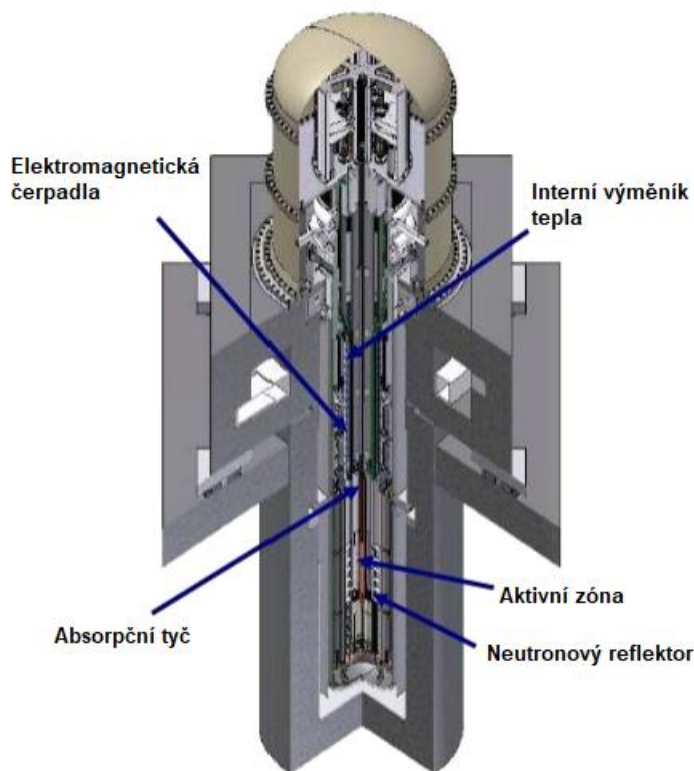
Obrázek 12 - Jednoduché schéma reaktoru SVBR-100 [35]

V aktivní zóně se nachází 55 hexagonálních palivových souborů, přičemž každý soubor obsahuje 220 palivových proutků. Jako palivo se používá UO_2 obohacené do 16,4 %. Předpokládaný palivový cyklus je 7-8 let. Je zde také možnost operovat s jinými typy paliva v různých palivových cyklech, kde kromě základního paliva UO_2 je možné použít i například U-Pu MOX palivo, přičemž by pak reaktor pracoval v uzavřeném cyklu [21], [22], [27].

Reaktor se má vyrábět v několika verzích, kdy je rozdíl ve výkonu. Rozsah těchto verzí by měl být 100-600 MWe, kde rozdíl mezi jednotlivými verzemi je 100 MWe. Tímto velkým rozsahem je možné ho využít nejen pro velké projekty bohatších států, ale i v odlehlých oblastech, rozvojových zemích, a to nejen pro dodávky elektřiny a tepla, ale i například na odsolování mořské vody [35].

3.4.7 4S

Název reaktoru 4S znamená Super-safe, small & simple (Super-bezpečný, malý a jednoduchý). Jedná se o malý, sodíkem chlazený rychlý reaktor integrálního bazénového typu. Reaktor je navržen ve dvou variantách. První varianta má tepelný výkon 30 MWt a elektrický výkon 10 MWe. Druhá varianta má pak výkony větší při tepelném výkonu 135 MWt a elektrickém výkonu 50 MWe.



Obrázek 13 - Řez reaktorem 4S [36]

Kovové palivo je tvořeno slitinou uranu a zirkonia, přičemž palivo je obohacené na méně než 20 %. Palivový cyklus může být dlouhý až 30 let pro verzi s menším výkonem. Pro verzi s větším výkonem je palivový cyklus až 10 let. Po této době by se mělo palivo vyjmout, nechat rok chladit a poté odeslat na likvidaci nebo uskladnění [21], [27].

Bezpečnost je zajištěna řadou pasivních bezpečnostních prvků jako je například pohlcovač neutronů nebo neutronový reflektor. Reaktor se navíc instaluje pod zem [21].

Reaktor je navržen pro dodávky elektřiny do odlehlých oblastí, míst těžby a také například pro výrobu vodíku a kyslíku vysokoteplotní elektrolýzou. Právě tyto vlastnosti společně s kompaktností a bezpečností získaly svoji podporu například na Aljašce, kde bylo zahájeno řízení pro stavbu reaktoru 4S u města Galena už v roce 2004. Toto řízení je v současnosti pozastaveno [22], [27].

3.4.8 KLT-40S

Tento reaktor je vyvinut z předchůdce ze III. generace KLT-40, který sloužil k pohonu ledoborců. Jedná se o tlakovodní reaktor, kde jako chladivo i moderátor slouží lehká voda. Tepelný výkon reaktoru je 150 MWt a elektrický výkon je 35 MWe.



Obrázek 14 - Plovoucí elektrárna Akademik Lomonosov [37]

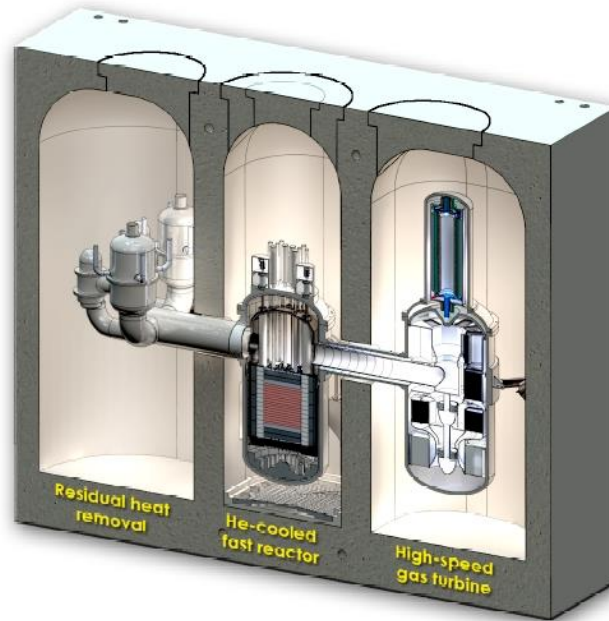
Jako palivo se používá UO_2 a palivový cyklus má délku 3 roky, přičemž se mění všechny palivové soubory. Provozní cyklus trvá dvanáct let, poté se elektrárna s reaktorem převezí na místo, kde jsou provedeny opravy a údržba. Celková životnost reaktoru je 40 let [21], [27].

Reaktor byl navržen pro dodávky elektřiny a tepla do velmi odlehlých oblastí bez centralizovaných dodávek elektrické energie. Mimo tento účel může sloužit i k odsolování mořské vody. [21], [27].

Je využíván na plovoucí jaderné elektrárně Akademik Lomonosov. Do května 2020 byla pouze ve zkušebním provozu, kdy začal komerční provoz. V červenci 2020 pak elektrárna začala zásobovat tepelnou energií čtvrt v ruském městě Pevek [38], [39].

3.4.9 EM²

Energy multiplier module (Modul multiplikátoru energie) je rychlý, heliem chlazený reaktor americké firmy General Atomics. Reaktor má tepelný výkon 500 MWt a elektrický výkon 265 MWe [27].

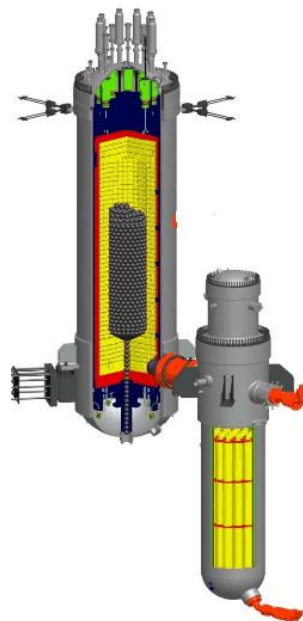


Obrázek 15 - Reaktor EM^2 s vysokorychlostní turbínou a odvodem zbytkového tepla [39]

Reaktor má dokázat využít více druhů paliv. Navíc by měl být schopný využívat i již použité palivo. Princip je takový, že pro počáteční fázi by byl použit uran obohacený na 20 %, po této fázi by pak měl být vytvořen dostatek štěpného materiálu, aby dále docházelo ke štěpení v druhé části aktivní zóny, kde by se už používal pouze radioaktivní odpad [27], [40].

3.4.10 HTR-PM

HTR-PM je SMR čínské výroby, který je chlazený heliem. Jeden modul HTR-PM má tepelný výkon 2×250 MWt a elektrický výkon 210 MWe. Tepelný výkon vychází ze dvou reaktorů v konstrukci [21], [27].



Obrázek 16 - Reaktor HTR-PM [41]

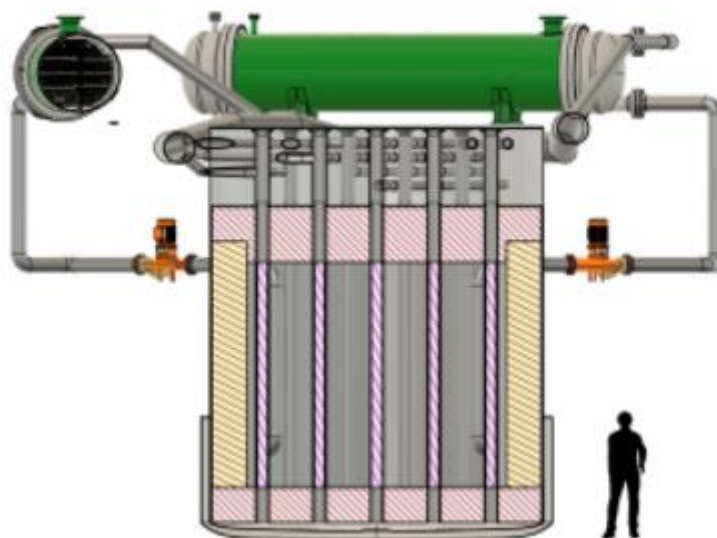
Jako palivo se používá UO_2 obohacené na 8,5 %. Toto palivo se používá ve formě malých kuliček. Tyto kuličky jsou neustále centrálně dodávány a zároveň vypouštěny trubicí na dně aktivní zóny. Vypuštěné palivo projde kontrolou, kdy se zjistí míra jejich vyhoření. Po dosažení dané míry jsou uskladněny a do oběhu se již nevrací [27].

Reaktor disponuje velkým množstvím pasivních a inherentních bezpečnostních prvků. Navíc radioaktivita chladiva v primárním okruhu je velmi nízká, takže i při úniku není potřeba přijímat krizová opatření [27].

Očekává se výstavba dalších reaktorů tohoto typu, a to stejného i vyššího výkonu, reaktor se během testů, které na něm již byly provedeny osvědčil [42].

3.4.11 TEPLATOR

Jedná se o koncept centrálního zásobování teplem pomocí použitého jaderného paliva. Nemá vyrábět elektrickou energii, ale pouze tepelnou, a to o výkonu 50 - 200 MWt v závislosti na uspořádání aktivní zóny [43].



Obrázek 17 - Řez TEPLATOREM [43]

Jedna jednotka se bude skládat z 55 palivových souborů z elektrárny typu VVER-440. Jako chladivo i moderátor bude sloužit těžká voda [43].

Design TEPLATORU se skládá ze 3 okruhů. Primární okruh obsahuje nádobu, aktivní zónu s palivem, 3 výměníky a 3 čerpadla – jedná se o smyčkový design. Aktivní zóna má podobu nádoby s kanály s palivem, mezi kterými je prostor vyplněn moderátorem. Sekundární a terciální okruh jsou pak již poměrně standardní pro předání a rozvod teplotnosného média [27], [43].

Protože je TEPLATOR velmi nenáročný na palivo a zároveň nepředstavuje obrovskou investici jako jiné, větší reaktory, mohl by představovat budoucnost v českém teplárenství, kde by mohl postupně nahradit některé teplárny pracující s fosilními palivy. Tato náhrada by měla ekonomický, ale i ekologický význam [43].

Dalších SMR je ve vývoji či výstavbě velké množství, tyhle příklady mají za cíl hlavně poukázat na největší pokroky a novinky v oblasti jaderných reaktorů. Jako další by šly jmenovat například CAREM-25 vyvíjený v Argentině nebo Flexblue vyvíjený francouzskou společností DCNS.

3.5 Využití SMR

3.5.1 Výroba elektrické energie v rozvojových a vyspělých zemích a odlehlých oblastech

SMR se zaměřují na jednoduché konstrukce, sériovou výrobu a vysokou bezpečnost při malém množství personálu. Tyto výhody z nich dělají vhodného kandidáta pro rozvojové země, které nemají velké zkušenosti s jadernou energetikou, protože nepředstavují příliš velké ekonomické a bezpečnostní zatížení jako velké jaderné elektrárny. Navíc svojí modularitou umožňují stavbu menších elektráren, které nebudou klást příliš velké nároky na rozvodnou síť. Samotná výroba by musela být zajištěna zeměmi jako je například Rusko nebo USA, které mají v jaderné energetice již značné zkušenosti a vývojem SMR se dlouhodobě zabývají. Určité riziko v těchto zemích může představovat politická nestabilita, pokusy o zneužití jaderného paliva a případné teroristické útoky. Většina těchto rizik je však značně snížena samotnou konstrukcí reaktorů [22].

Malé reaktory lze také využít v odlehlých oblastech jako zdroj elektrické energie, ale i tepla. V těchto případech výkonnostně stačí reaktory menších výkonů. Důkazem je zájem o reaktor 4S na Aljašce, který má navíc výhodu velmi dlouhého palivového cyklu [22], [27].

Samozřejmostí je také využití ve vyspělých zemích, kde je možné vytvořit bloky s více moduly, čímž dojde k navýšení výkonu. Příkladem může být Česká republika. Jaderné elektrárny Temelín a Dukovany dodávají do sítě okolo 35 % elektrické energie a tento podíl se má ještě zvýšit – až na 50 %, a to například rozšířením Jaderné elektrárny Dukovany. Další zvýšení podílu by mohlo vést právě přes SMR, které by se navíc daly využít i k jiným účelům. Je to přijatelnější možnost pro investory a se stále silnějším důrazem na snižování emisí mohou být vhodnou volbou jako náhrada elektráren na fosilní paliva.

3.5.2 Desalinace vody

Odsolování mořské vody je energeticky velmi náročným procesem. Většina metod spočívá v destilaci, kdy se voda ohřeje na vysokou teplotu a vypaří se. Po kondenzaci páry je voda bez soli. Kromě tohoto procesu existují i modernější, jako je například membránová metoda nebo reverzní osmóza. Všechny tyto procesy jsou však stále energeticky náročné, což však mohou SMR usnadnit a zlevnit, díky svému výkonu, stabilitě a menší ekonomické náročnosti. Státy jako Kazachstán a Japonsko tuto technologii využívají už delší dobu [44].

Nevýhodou odsolování je odpadní produkt – solanka. Jedná se o extrémně slanou vodu, která je velmi drahá na jakékoliv další zpracování a je ekologickou zátěží. Existují sice nové technologie na její zpracování – například odpařování a získání soli. Ty jsou však velmi cenově náročné a země, které využívají odsolování nejvíce, těmito technologiemi nedisponují [45].

3.5.3 Námořní doprava

Malé reaktory se v námořní dopravě využívají již delší dobu. V minulém století se používaly hlavně jako pohon ponorek. V dnešní době se využívají už i na komerčních lodích, kde se za velkou výhodu považuje výrazné snížení emisí. Malé reaktory používá například Rusko na svých ledoborcích, kde je složité doplňování paliva.

Největší výhodou je v tomto případě ekologické hledisko a v budoucnu se počítá s rozvojem jaderných reaktorů v námořní dopravě. Využití se plánuje hlavně pro velké nákladní lodě, které mají stále stejnou trasu, jako další pak je možné jmenovat velké výletní lodě s vysokou spotřebou [46].

3.5.4 Výroba vodíku

Poptávka po vodíku v dnešní době roste hlavně kvůli velkému množství potenciálních využití i přes nutnost skladování v tlakových nádobách. Uvažuje se o něm jako o možném palivu pro dopravní prostředky, má potenciál jako náhrada koksu v metalurgických operacích.

Vodík se nevyskytuje samostatně, ale musí být získán například z vody nebo z methanu, což vyžaduje energii. Některé reaktory se již využívají na výrobu vodíku pomocí elektrolýzy.

V budoucnu je také možnost vyrábět vodík termomechanicky ve vysokoteplotních reaktorech. Právě využití jaderných reaktorů pro výrobu vodíku má opět výhodu z ekologického hlediska, protože nevznikají skleníkové plyny [47].

3.5.5 Teplárenství

V tomto odvětví má SMR velký potenciál. Jak už bylo zmíněno, může se využívat na dodávky tepla v odlehlých oblastech, ale také může být využit jako náhrada některých tepláren fungujících na principu spalování fosilních paliv, čímž by došlo ke snížení produkce emisí. Samotná myšlenka není novinkou, v řadě zemí se reaktory tímto způsobem využívají a zásobují okolní obce – například v Rusku nebo Švýcarsku [48].

Toto využití má potenciál i v České republice, například pomocí reaktoru TEPLATOR. Tato možnost bude rozebrána podrobněji v kapitole 6.

3.5.6 Kogenerace

Kogenerace je současná výroba elektrické energie a tepla. Teplo je při výrobě elektřiny často nevyužito a je vypuštěno do ovzduší. Jeho využitím se však výrazně zvýší celková účinnost energetického procesu, a to až nad 90 % [49]. Tento proces se netýká pouze jaderných elektráren, ale tohle využití už je u jaderných reaktorů poměrně zavedený pojem a je tedy možné zásobovat elektřinou i teplem okolní obce, případně i města.

3.6 Zhodnocení SMR

Malé modulární reaktory přináší řadu novinek a výhod v jaderné energetice. Zakládají se na jednodušší konstrukci, možnosti sériové výroby a bezpečnosti bez nutnosti zásahu člověka. Jejich zásadní výhodou je ekonomické hledisko, kdy umožňují postupné navyšování výkonu namísto jedné velké investice do běžného jaderného reaktoru. Tato výhoda by mohla pomoci zvýšit zájem o jadernou energetiku po tom, co se od ní v posledních letech upouštělo. Tomu také nahrává snaha světa snížit emisní plyny a velká poptávka po energii v rozvojových zemích s nedostatečně rozvinutou rozvodnou sítí. Mají široké využití, od výroby elektrické energie po výrobu vodíku. Všechny tyto vlastnosti dávají SMR velký potenciál do budoucna, kdy mohou nahrazovat elektrárny a teplárny na fosilní paliva a podobně.

Je také potřeba vzít v úvahu faktory, jako jsou například poměrně velké náklady na údržbu a dlouhá doba licencování. Ačkoliv oproti klasickým reaktorům je počáteční investice mnohem lákavější, stále se jedná o zátěž, která má návratnost až po zhruba 10 letech od uvedení do provozu. Dále je potřeba si uvědomit, že ještě není zcela vyřešena otázka ukládání jaderného odpadu. Také ve světě stále panuje určitá ostražitost vůči jaderným reaktorům po haváriích v Černobylu nebo Fukušimě. Tento problém však mohou vyřešit neustále vylepšované bezpečnostní prvky, zdokonalované konstrukce reaktorů a menší velikost SMR.

4 Teplárenství v ČR

4.1 Úvod to teplárenství

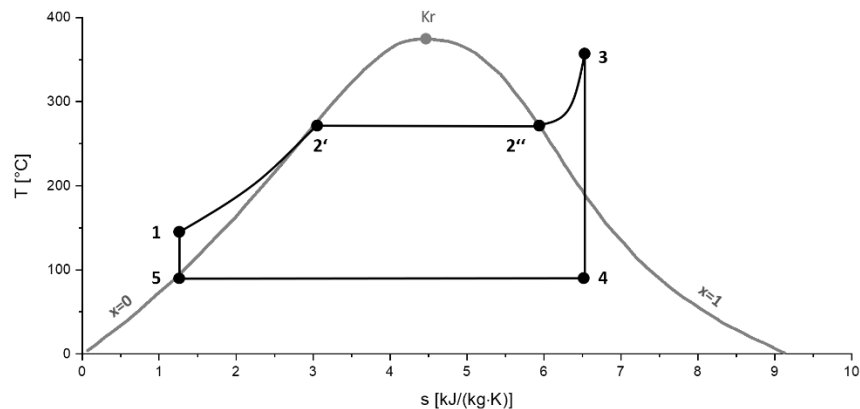
Teplárenství se dá chápat dvěma smysly. Buď jako průmyslový obor, který má za cíl zásobovat spotřebitele teplem nebo jako společnou výrobu elektřiny a tepla.

Hlavní součástí teplárenské soustavy je teplárna, což je energetická centrála, kde dochází k současné výrobě tepla a elektřiny (kogenerace). Vyrobena elektřina je pak dodávána do rozvodné sítě a teplo lokálním spotřebitelům [50].

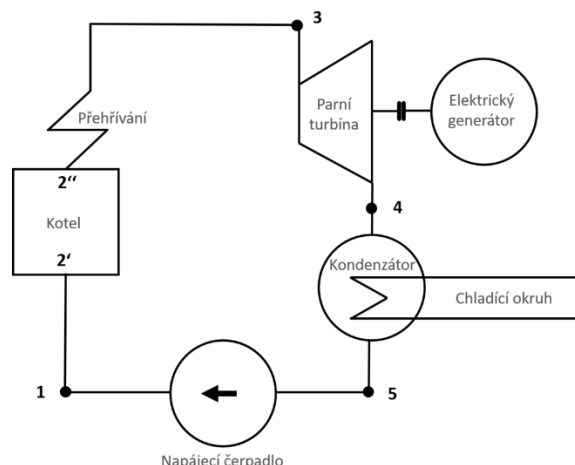
Existuje vícero druhů tepláren, nejčastějším jsou však teplárny pracující podle Rankin-Clausiova cyklu. Princip je, že tyto teplárny jsou vybaveny parními kotli, které generují vodní páru. Ta expanduje na parní turbíně, kde se její energie na hřídeli mění na mechanickou práci. Tato hřídel poté otáčí generátorem a vzniká elektrická energie. Dalšími častými typy jsou teplárny se spalovacími turbínami (Erikson-Braytonův nebo Joule-Braytonův cyklus), kde vzniklé spaliny roztáčejí turbínu. V těchto teplárnách vzniká značné množství odpadního tepla. Kombinací je pak paroplynová teplárna, která využívá odpadní teplo na výrobu páry pro parní turbínu [50].

4.1.1 Rankin-Clausioův cyklus

Tento oběh je nejrozšířenější právě v energetice. Pracovní látkou je voda, proto se mu také někdy říká parní oběh. Ta koluje v uzavřeném systému. V kotli je jí dodáváno teplo a voda se mění na páru. Pára pohání parní turbínu a tím vzniká mechanická práce. Vzhledem k tomu, že se jedná o oběh s vnějším přestupem tepla, lze jako zdroj tepla použít nejen fosilní paliva, ale například i jadernou energii nebo biomasu. Existuje několik způsobů, jak zvýšit účinnost tohoto cyklu, jako například regenerace páry [51].



Obrázek 18 - Rankinův cyklus v T - s diagramu [53]



Obrázek 19 - Rankinův cyklus [53]

4.1.2 Zásobování teplem

Existují dva základní druhy zásobování teplem. Decentralizované zásobování teplem spočívá v tom, že je zdroj tepla umístěn přímo v místě spotřeby. Typickým příkladem je byt vybavený plynovým kotlem pro vytápění. Výhodou je nezávislost na topné sezóně – spotřebitel si může zatopit kdykoliv. U centralizovaného zásobování teplem se jedná o vytápění a zásobování centrálně pro potřeby domů a průmyslových podniků. Soustava centralizovaného zásobování je tvořena vzájemně propojenými zdroji tepla (teplárnami), tepelnými sítěmi, předávacími stanicemi a spotřebitelskými zařízeními. Tato varianta bývá zpravidla ekonomicky výhodnější [52].

4.2 Současný stav teplárenství v ČR

V dnešní době je ze soustav dálkového vytápění a blokových kotelen zásobováno 40 % domácností a v případě, že by byly započteny i domovní kotelny, pak je ze zdroje mimo byt zásobováno 49 % obyvatelstva. Toto teplo se získává ze dvou třetin z uhlí a z jedné třetiny z plynu, tento poměr se však postupně vyrovnává. Do budoucna se dá očekávat, že zdroje, které slouží pouze jako výtopy budou méně ekonomicky výhodné, vzhledem k růstu ceny paliva. Tato situace nahrává kogeneračním zdrojům, kde nárůst ceny tepla související s cenou paliva bude možné vyrovnat zvýšením ceny elektřiny [54].

Podíl výroby elektřiny v kombinované výrobě je v ČR mírně vyšší, než je průměr v EU. V roce 2011 byl podíl hrubé výroby elektřiny v kogeneraci v ČR 12,8 %, zatímco v průměr EU činil 11,2 %. Vzhledem k tomu, že kogenerační výroba výrazně zvyšuje efektivitu využití paliva a je ekologičtější, je státem podporována a je dlouhodobým cílem podíl kogenerační výroby zvýšit [54], [55].

V současnosti se také výrazně projevuje snaha o snížení emisí. V roce 2020 investovaly teplárny v ČR do snížení emisí 1,5 miliardy korun, přičemž tato modernizace si od roku 2013 vyžádala již 25 miliard korun. Výsledkem je snížení emisí oxidu siřičitého a prachu z tepláren téměř o dvě třetiny a emisí oxidů dusíku o více než dvě pětiny s tím, že modernizace bude dále pokračovat [56].

Jak již bylo zmíněno, poměr získaného tepla z uhlí a z plynu se vyrovnává. Do roku 2030 však budou muset všechny české teplárny přejít na plyn, což si vyžádá obrovské investice, které by měly dosáhnout až 108 miliard korun [57].

5 Teplárenské společnosti v ČR a jejich zařízení

5.1 Veolia Energie ČR, a.s.

Veolia Energie ČR je předním českým výrobcem a dodavatelem tepla a elektrické energie v kogeneraci. Je také provozovatelem sítě chladu [58].

Společně s dceřinými společnostmi působí v Moravskoslezském, Olomouckém, Jihočeském, Plzeňském, Karlovarském, Ústeckém, Libereckém a Středočeském kraji a v Praze, přičemž největší zastoupení má v Moravskoslezském kraji, dále pak v Olomouckém [59]. Kromě níže uvedených zařízení je provozovatelem například ještě Elektrárny Kolín, Teplárny Přívoz, Teplárny Karviná a dalších.



Obrázek 20 - Mapa působnosti Veolia Energie ČR [59]

5.1.1 Teplárna Olomouc

Teplárna Olomouc je spalovací zařízení na kombinovanou výrobu elektřiny a tepla, přičemž její tepelný výkon činí 213,4 MWt, pro nějž využívá dva parní kotle [60].

- Parní kotel K3 – má tepelný výkon 72,1 MWt. Jako palivo se používá černé prachové energetické uhlí a pro najíždění a stabilizaci režimu kotle se používá lehký topný olej.
- Parní kotel K5 – má tepelný výkon 141,3 MWt. Jako palivo slouží hnědé prachové uhlí, je ale možné využít černé prachové energetické uhlí. Pro najíždění a stabilizaci režimu kotle slouží podobně jako u kotle K3 lehký topný olej.

Celkový elektrický výkon teplárny je 49 MWe, který zajišťují turbíny TG3 o výkonu 41 MWe a TG4 o výkonu 8 MWe. Celkově Teplárna Olomouc zásobuje ve městě teplem 29 026 domácností [60], [61].

5.1.2 Teplárna Přerov

Jedná se o zařízení pro kogeneraci tepla a elektrické energie. Má dva parní kotle a celkový tepelný výkon 169 MWt. Jako palivo se v obou kotlích využívá černé prachové uhlí a proplástek. Pro zapalování a stabilizaci se využívá lehký topný olej a jako přídatné palivo se používá biomasa [62].

- Parní kotel K1 – tepelný výkon kotle je 84,5 MWt.
- Parní kotel K2 – tepelný výkon kotle je 84,5 MWt

Pro tvorbu elektrické energie se využívají dvě turbíny, přičemž celkový elektrický výkon činí 47,5 MWe.

- Turbína TG1 – kondenzační odběrová turbína, její elektrický výkon činí 41 MWe
- Turbína TG2 – kondenzační turbína o elektrickém výkonu 6,5 MWe

Dále je možné využít záložní kotelnu, kde se nachází kotle K11 a K12, přičemž oba mají tepelný výkon 17,3 MWt. Teplárna Přerov zásobuje přes 14 600 bytů a více než 100 přímých zákazníků [64], [65].

5.1.3 Elektrárna Třebovice

Elektrárna Třebovice funguje jako teplárenský a kondenzační provoz na spalování pevných paliv – hlavním palivem je černé uhlí. Má celkem 3 provozní celky. Provozní celek ETB 1 tvoří horkovodní kotel K2 a parní kotle K3 a K4. ETB 2 je tvořen parním kotlem K12 a celek ETB 3 je tvořen parními kotli K13 a K14. Celkový tepelný výkon elektrárny je 651,74 MWt a elektrický výkon je 147 MWe. Elektrárna zásobuje teplem zhruba 100 000 domácností v Ostravě [62], [63].

5.1.4 Teplárna Krnov

Teplárna Krnov je další kogenerační zařízení, ve kterém jsou instalovány dva kotle a jedna turbína. Celkový tepelný výkon je 88 MWt a elektrický výkon činí 4,8 MWe [66].

- Kotel K5 – je fluidní dvoutahový bubnový strmotrubnatý kotel s přirozenou cirkulací. Jako palivo se využívá černé uhlí nebo směs proplástek a hnědého uhlí. Tepelný výkon kotle činí 60 MWt
- Kotel K6 – je roštový bubnový strmotrubnatý kotel s přirozenou cirkulací. Palivo je biomasa a tepelný výkon činí 28 MWt.
- Turbína TG4 – Elektrický výkon činí 4,8 MWe

Tato teplárna je schopna pokrýt pětinu spotřeby města Krnova [67].

5.2 Pražská teplárenská, a.s.

Pražská teplárenská byla v roce 2020 zakoupena skupinou Veolia. Jedná se o významné rozšíření vzhledem k tomu, že pod Pražskou teplárenskou spadaly mimo níže jmenovanou Výtopnu Krč ještě například Teplárna Malešice, Teplárna Michle a Teplárna Holešovice [68].

5.2.1 Výtopna Krč

Výtopna Krč vyrábí pouze tepelnou energii pomocí celkem 6 instalovaných kotlů.

Kotle K1, K2 a K3 jsou plynové, strmotrubné, dvoububnové s přirozeným oběhem o výkonu 17,44 MWt. Kotle K4 a K6 jsou středotlaké, horkovodní, vodotrubné kotle, které spalují zemní plyn s výkonem 18 MWt. K5 je horkovodní kotel, který spaluje zemní plyn s výkonem 23,8 MWt [69].

5.3 Elektrárna Mělník 1

Provozovatelem elektrárny je společnost Energotrans, a.s., tedy dceřiná společnost společnosti ČEZ, a.s. Hraje klíčovou roli v dodávání centrálního tepla do Pražské teplárenské soustavy pomocí napáječe tepla. Kromě dodávek do Prahy, kde dodávka tepla činí 650 MWt zásobuje Mělník 1 i město Neratovice. Celkový tepelný výkon elektrárny je 1111,998 MWt a elektrický výkon je 240 MWe [70], [71].

Tepelný výkon je zajištěn 6 kotli – tyto kotle jsou bubnové, dvoutahové s šachtovými mlýny a granulačním ohništěm s přímým foukáním uhelného prášku do spalovací komory. Jako palivo slouží hnědé uhlí [71].

5.4 Teplárny Brno, a.s.

Teplárny Brno jsou vlastněny Statutárním městem Brno. Společnost zásobuje teplem okolo 4000 odběrných míst v Brně, mezi které patří například univerzity, Masarykův onkologický ústav nebo SONO centrum. Nově má také licenci na distribuci elektřiny, kterou vyrábí v kogeneraci s teplem. Jedná se o čtvrtou největší teplárenskou společnost v ČR. Má čtyři hlavní provozy [72].

- Provoz Špitálka – zařízení, které umožňuje kogenerační výrobu. Instalovaný tepelný výkon činí 411 MWt a elektrický výkon činí 80,6 MWe
- Provoz Červený mlýn – zajišťuje výrobu tepla a elektřiny v paroplynovém cyklu. Tepelný výkon je 160 MWt a elektrický výkon je 95 MWe.
- Provoz Brno-Sever – také zajišťuje kogenerační výrobu elektřiny a tepla. Tepelný výkon je 180 MWt, elektrický výkon činí 3,5 MWe.
- Provoz Staré Brno – využívá zemní plyn a slouží pouze k výrobě tepla. Tepelný výkon činí 34 MWt.

Pátým tepelným zdrojem je zařízení pro energetické využití odpadu (ZEVO), které vlastní společnost SAKO, a.s. Zařízení v současnosti vyrábí až 22 % tepelné energie distribuované tepelnými sítěmi Tepláren Brno. Dále pak Teplárny Brno využívají lokální zdroje, a to Provoz Kamenný Vrch a Provoz Bystrc [72].

5.5 Teplárna Liberec, a.s.

Vlastníkem Teplárny Liberec je ze 76 % společnost ENERGIE Holding, a.s., která je členem skupiny MVV Energie CZ, a.s. Toto zařízení dodává energii do 13 254 domácností, 10 samostatných průmyslových areálů a 123 odběratelům z terciární sféry [73].

Zařízení má čtyři kotle, přičemž kotle K1 a K2 slouží ke kombinovanému spalování zemního plynu a těžkého topného oleje. K1 má tepelný výkon 52 MWt, K2 má tepelný výkon 78 MWt. Kotle K3 a K4 používají jako palivo zemní plyn. Oba mají tepelný výkon 11 MWt.

Pro tvorbu elektrické energie je v zařízení nainstalována turbína o výkonu 5 MWe. Celkový tepelný výkon zařízení je 152 MWt [74].

5.6 Plzeňská Teplárenská, a.s.

Plzeňská Teplárenská je největším výrobcem energií v Plzeňském kraji. Dodává teplo do 54 000 domácností a dalších komerčních, podnikatelských, správních a školských systémů. Jako palivo je využíváno hnědé uhlí, v některých kotlích je však možné použít i biomasu. Samotnou výrobu energie zajišťuje centrální teplárna, ZEVO, zařízení Energetika a lokální plynové kotelny [75].

Centrální teplárna využívá kogeneraci. Má celkem 6 kotlů – mezi nimi jsou fluidní, granulační práškové a horkovodní roštové kotle, z nichž čtyři mohou spalovat biomasu. Kromě

kotle K7 všechny spalují hnědé uhlí. Celkový tepelný výkon teplárny je 504,6 MWt, elektrický výkon činí 150,5 MWe [76]. ZEVO má tepelný výkon 31,65 MWt a elektrický výkon 10,5 MWe [75]. Zařízení energetika má instalované čtyři kotle o různých výkonech. Všechny spalují hnědé uhlí. Tepelný výkon zařízení je 364,39 MWt a elektrický výkon 103,56 MWe, který zajišťují tři turbíny a tři motorgenerátory [77].

5.7 Teplárna České Budějovice, a.s.

Společnost se zabývá hlavně výrobou, nákupem, prodejem a rozvodem tepla a teplé užitkové vody. Teplárna využívá kogeneraci. Tepelný výkon zajišťují 4 kotle, všechny jsou na zemní plyn a poskytují celkový výkon 412 MWt. Elektrický výkon je zajištěn třemi turbínami pro celkový výkon 51,6 MWe [78], [79].

5.8 Teplárna Kladno, s.r.o.

Teplárna Kladno patří skupině Sev.en Energy AG. Komplex teplárny má 5 výrobních bloků, z nichž jsou 4 určeny pro výrobu tepla a elektrické energie [80]. Výrobu tepla zajišťují kotle různých výkonů, přičemž většina využívá jako palivo hnědé nebo černé uhlí. Celkový tepelný výkon elektrárny činí 613,3 MWt. Čtyři turbíny zajišťují elektrický výkon, který činí 472,5 MWe [81].

5.9 Teplárna Zlín, s.r.o.

Podobně jako teplárna Kladno patří i Teplárna Zlín skupině Sev.en Energy AG. Teplárna disponuje dvěma hlavními výrobními bloky, dále pak třemi středotlakými kotly. Jako hlavní palivo je využíváno uhlí, navíc je možnost spoluspalování biomasy a bioplynu [80].

Výrobu tepla zajišťují 4 kotle a navíc jeden záložní zdroj pro celkový výkon 346 MWt. Elektrickou energii vyrábí tři turbíny o celkovém elektrickém výkonu 64 MWe [82].

5.10 Teplárna Trmice, a.s.

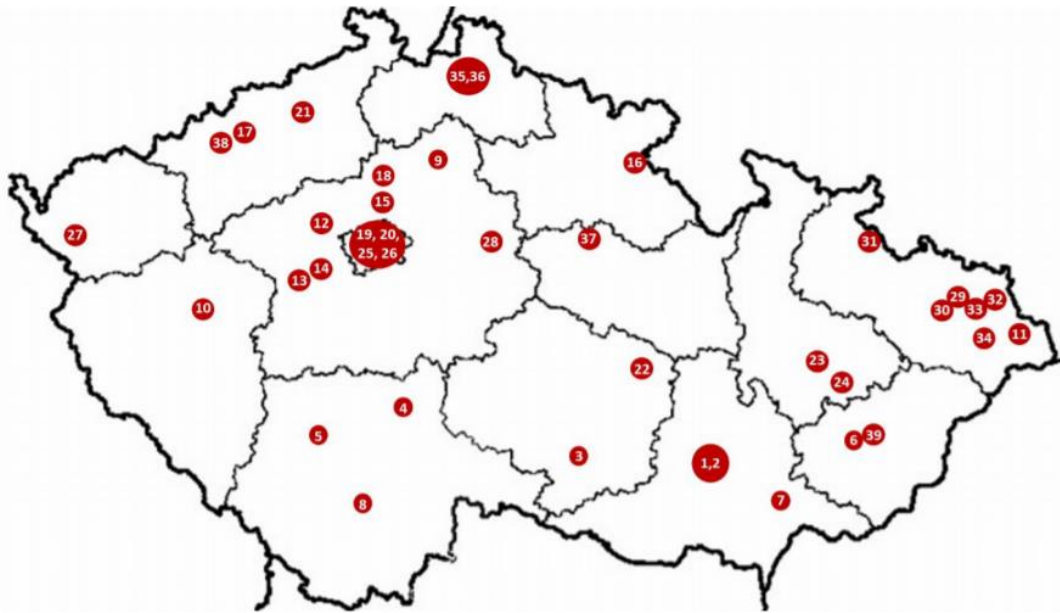
Teplárnu Trmice vlastní společnost ČEZ Teplárenská. Teplárna zásobuje přibližně 30 000 domácností a velkou část průmyslových závodů v Ústí nad Labem. Jedná se o uhelnou teplárnu, ve které je instalováno 6 kotlů o celkovém výkonu 469,2 MWt a 6 turbogenerátorů o celkovém elektrickém výkonu 89 MWe [88].

5.11 Shrnutí

Tato kapitola měla za cíl analyzovat tepelné výkony tepláren v ČR. Uvedené teplárny nejsou jediné v ČR, ale slouží jako dostatečný vzorek pro vytvoření představy, jaká je v ČR teplárenská situace a také pro zlepšení možného odhadu, kde by se daly teplárny nahradit SMR. Pro uvedení více tepláren a jejich poloh slouží uvedená mapa. Většina tepláren už pracuje s principem kogenerace, tedy výrobou tepelné i elektrické energie současně, čímž je prudce zvýšena efektivita využití paliva. Teplárny jsou také nuceny přijímat stále přísnější ekologická opatření. I přesto jsou jimi vypuštěné emise značné, zvláště těch, kde se jako palivo používá hnědé uhlí. Právě obrovské investice do snižování emisí a přestavby na využívání plynu místo uhlí by mohly přesvědčit investory o náhradě tepláren malými modulárními reaktory.

Vzhledem ke svému členství v EU se Česká republika snaží řešit ekologické dopady tepláren a nezaostávat v modernizaci a snižování emisí. Strategie EU je kromě využívání odpadního tepla také zvýšení podílu vyrobené energie z obnovitelných zdrojů [84]. Tohle počínání má za cíl snížit emise o 55 % do roku 2030 a stát se uhlíkově neutrální do roku 2050 [85]. V tomto směru ČR mírně zaostává za západní Evropou, kde například Německo a Rakousko investují do solárních a větrných elektráren. Ačkoliv se nejedná o obnovitelné zdroje, velké využití jaderných reaktorů ve Francii má vliv na snížení emisí v energetickém průmyslu.

Zájem o jaderné reaktory, konkrétně SMR kvůli snaze o snížení emisí vznikl také v Polsku a Nizozemsku.



Obrázek 21 - Přehled teplotárenských společností [83]

Legenda pro mapu:

1 Teplárny Brno, a.s. – Špitálka, Červený mlýn, Brno-Sever, Staré Brno; 2 SAKO Brno, a.s. – ZEVO; 3 TTS energo, s.r.o. – Teplárna Sever, Teplárna Jih, Teplárna Západ; 4 Teplárna Tábor, a.s. – Teplárna Tábor; 5 Teplárna Písek, a.s. – Teplárna Písek; 6 Lama Energy Group, s.r.o. – Teplárna Otrokovice; 7 Lama Energy Group, s.r.o. – Teplárna Kyjov; 8 Teplárna České Budějovice, a.s. – Teplárna České Budějovice; 9 ŠKO-ENERGO, s.r.o. – Teplárna ŠKO-ENERGO; 10 Plzeňská teplotárenská, a.s. – Teplárna Plzeň, ZEVO, Energetika; 11 Energetika Třinec, a.s. – Teplárna E2, Teplárna E3; 12 Sev.en Energy AG, s.r.o. – Elektrárna Kladno; 13 innogy Energo, s.r.o. – Teplárna Králův Dvůr, 14 Výtopna Beroun, 15 Teplárna Odolena Voda, 16 Teplárna Náchod; 17 United Energy, a.s. – Teplárna Komořany; 18 Energotrans, a.s. – Elektrárna Mělník I; 19 Pražská teplotárenská, a.s. – Teplárna Malešice, Teplárna Michle, Teplárna Holešovice, Výtopna Krč; 20 Pražské služby, a.s. – ZEVO; 21 ČEZ, a.s. – Teplárna Trmice; 22 ŽĎAS, a.s. – Teplárna ŽĎAS; 23 Veolia Energie ČR, a.s. – Teplárna Olomouc, 24 Teplárna Přerov, 25 Teplárna Veleslavín, 26 Výtopna Juliska, 27 Výtopna Mariánské Lázně, 28 Elektrárna Kolín, 29 Elektrárna Třebovice, 30 Teplárna Přívoz, 31 Teplárna Krnov, 32 Teplárna Karviná, 33 Teplárna ČSA, 34 Teplárna Frýdek – Místek; 35 Teplárna Liberec, a.s. – Teplárna Liberec; 36 TERMIZO, a.s. – ZEVO; 37 Elektrárny Opatovice, a.s. – Elektrárna Opatovice; 38 ACTHERM, s.r.o. – Teplárna Chomutov; 39 Sev.en Energy AG, s.r.o. – Teplárna Zlín [83]

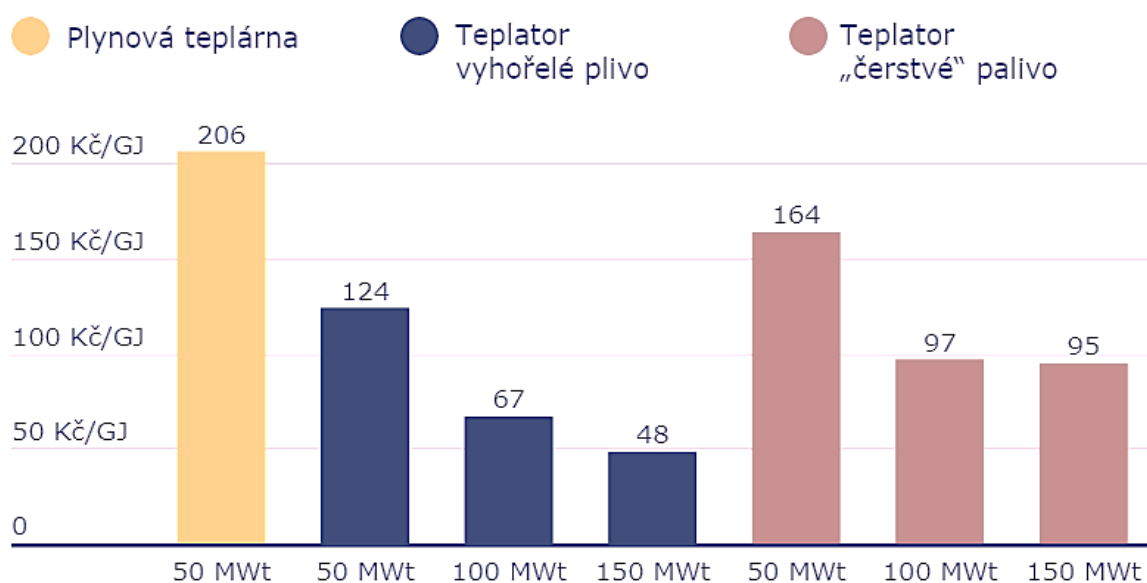
6 Aplikace SMR v teplárenství v ČR

6.1 Reaktory vhodné pro náhradu tepláren na fosilní paliva

6.1.1 TEPLATOR

Prvním kandidátem je český TEPLATOR, který vyrábí pouze teplo. Velkou výhodou je to, že má český design a jeho návrh v podstatě vznikl pro tento účel. Navíc svou výhodou v ekologickém hledisku ještě prohlubuje faktem, že jako palivo je možné použít i jaderný odpad. Vyhořelých článků je v ČR momentálně asi 20 000, což by mělo stačit na vytápění celé země po dobu 30 let. Další výhodou je, že cena tepla vyrobeného Teplátorem je nižší než v případě teplárny, která jako palivo používá plyn i v případě, že využívá běžné palivo. Jako nevýhodu lze považovat fakt, že TEPLATOR nevyrábí elektřinu [86].

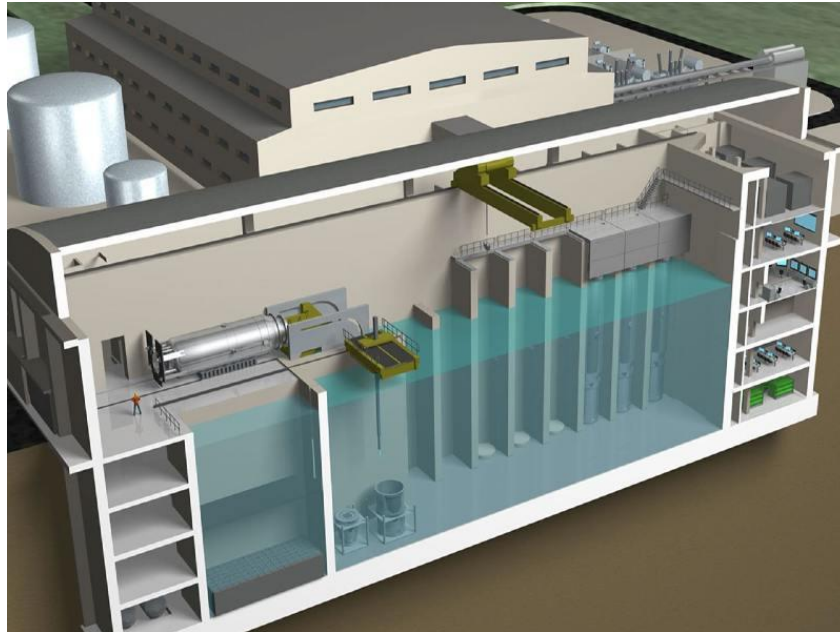
Porovnání cen tepla z Teplatoru a z plynu



Obrázek 22 - Porovnání cen tepla z Teplatoru a z plynu [86]

6.1.2 NuScale

Dalším kandidátem je reaktor NuScale, který patří ke špičce současného vývoje a jeho modularita umožňuje pokrýt širší škálu potřeb, od náhrady menších tepláren až po samostatné fungování jako jaderná elektrárna. Nevýhodou by mohla být vysoká cena. Další problém, který by bylo potřeba vyřešit je, že nejmenší zařízení, které firma NuScale Power má v plánu nabízet má mít instalované 4 moduly. Pro využití tak velkého výkonu by muselo být nahrazeno více tepláren.



Obrázek 23 - Řez elektrárnou NuScale [87]

6.1.3 SVBR-100

Tento reaktor se jeví jako vhodný kandidát díky svým několika verzím, které se liší výkonem. Tato možnost umožňuje přizpůsobit celkový výkon vybrané oblasti a teplárně, kterou by případně reaktor nahradil. Reaktor také dokáže pracovat s více druhy paliva a má dlouhý palivový cyklus. Nevýhodou může být opět vysoká cena, navíc současná situace nenahrává spolupráci ČR a Ruska na jaderných projektech.

6.1.4 Další vhodné reaktory

V úvahu by měly přijít i další reaktory, jako například korejský SMART, japonský reaktor 4S, který by byl dodán pravděpodobně ve své větší verzi s desetiletým palivovým cyklem a nebo například čínský HTR-PM.

6.2 Teplárny nahraditelné malými reaktory

Uhelné teplárny by mohly být nahrazeny malými reaktory (zejména Teplatorem) ve zhruba 12 lokalitách v ČR [86]. Na základě analýzy velikosti tepláren v ČR z kapitoly 5 byly vybrány některé teplárny, které by mohly být nahrazeny SMR.

6.2.1 Teplárna Liberec

Teplárna Liberec má celkový tepelný výkon 152 MWt. Tento tepelný výkon by mohl být pokryt několika moduly Teplatoru DEMO, který má výkon 50 MWt, pozdější verze Teplatoru by měly dosahovat až 200 MWt. V případě výstavby takového zařízení by bylo možné uvažovat i o nahrazení teplárny v Jablonci nad Nisou, vzhledem k tomu, že obě města ve svých dlouhodobých plánech zvažují možnost využití jaderné energetiky pro dodávky tepla [48]. Kromě Teplatoru by bylo možné využít také například větší verzi reaktoru 4S, kde má jeden modul výkon 135 MWt. Vzhledem k tomu, že reaktor 4S vyrábí i elektrickou energii, byl by vhodnou náhradou za teplárny v Liberci a Jablonci, jelikož pracují s principem kogenerace a vyrábí tedy i elektřinu, tohle hledisko by Teplator nevyřešil.

6.2.2 Centrální teplárna v Plzni a zařízení Energetika

Plzeň je dalším městem, které v dlouhodobém hledisku zvažuje využití jaderných reaktorů pro výrobu tepla [48]. Tyto teplárny mají poměrně velký výkon, kdy tepelný výkon centrální teplárny je 504,6 MWt a elektrický výkon 150,5 MWe. Zařízení Energetika má tepelný výkon 364,39 MWt a elektrický výkon 103,56 MWe. V tomto případě kromě velké produkce tepla je nutné vzít v úvahu i poměrně velkou výrobu elektřiny. Jako náhrada tepláren s tak velkými výkony by byly vhodné reaktory NuScale, kde by bylo možné uvažovat i o nabízeném zařízení se čtyřmi moduly, které by zcela nahradilo výkony tepláren, ale také je přesáhlo, hlavně co se tepelného výkonu týče.

6.2.3 Teplárna Trmice

Uhelná teplárna Trmice bude muset brzy přejít přestavbou na použití plynu jako paliva. Její výkon 469,2 MWt by bylo možné nahradit například reaktory NuScale vzhledem k tomu, že zvládnou dobře pokrýt jak výrobu tepla, tak elektřiny.

6.2.4 Elektrárna Třebovice

Tato elektrárna zásobuje zhruba 100 000 domácností, což je přibližně představa, kolik domácností by měly být schopny zásobovat zařízení s SMR. Tepelný i elektrický výkon elektrárny by mohl být nahrazen reaktory NuScale, některými verzemi SVBR-100 nebo zařízením využívajícím více reaktorů 4S. Elektrický výkon zařízení s SMR by byl značně větší, než současné elektrárny.

6.2.5 Výtopna Krč

Toto zařízení vyrábějící pouze teplo o výkonu 112,12 MWt by bylo možné poměrně snadno nahradit několika reaktory Teplator DEMO nebo pozdější verzí reaktoru s větším výkonem. Nemá příliš velký smysl zde uvažovat o jiných reaktorech, vzhledem k nevelkému tepelnému výkonu a žádné produkci elektřiny.

6.3 Využití zbylého uhlí

Po nahrazení uhelných tepláren malým reaktorem je potřeba vyřešit, jak naložit se zbylým uhlím. Jednou možností by mohlo být využití zbylého uhlí v jiných odvětvích průmyslu, například na výrobu koksu. Také je možné uhlí využít v uhelných teplárnách v jiných lokalitách, kde k náhradě nedošlo.

6.4 Výhody nahrazení tepláren SMR

Zásadní výhodou SMR je, že jejich emise jsou v podstatě nulové a tím tedy přispívají k cíli snižování emisí. Další výhodou je nižší cena vyrobeného tepla. Zařízení s instalovanými SMR je navíc prostorově mnohem méně náročné, zabírá menší plochu. Z dlouhodobého hlediska se jedná o výhodné řešení, které zajišťuje stabilní zásobování teplem i elektřinou. Umožňuje českým firmám držet krok se zbytkem světa v oboru jaderné energetiky. Vzhledem k tomu, že se v blízké budoucnosti budou investovat velké částky do modernizace a přestaveb zejména uhelných tepláren, které jsou z dlouhodobého hlediska ve výsledku víceméně neudržitelné, mohly by tyto investice zamířit právě do projektů využívajících SMR.

6.5 Nevýhody nahrazení tepláren SMR

Ačkoliv jsou SMR levnější než běžné reaktory, stále se jedná o velkou investici. Navíc modularita nemusí nutně pokrýt přesné potřeby některých oblastí a mohou vzniknout zařízení s přebytně velkým výkonem. Ačkoliv se většina firem, co se zabývají SMR snaží, aby byla obsluha co nejjednodušší, stále je potřeba množství speciálně proškolených pracovníků. Navíc by tyto jaderné reaktory musely mít řádné zabezpečení, například proti teroristickému útoku. V ČR je navíc určité množství odpůrců jaderných reaktorů, zvláště, kdyby se měly vyskytovat v blízkosti jejich domovů. V neposlední řadě je tu fakt, že jaderná energetika se neřadí mezi obnovitelné zdroje, takže se nedá počítat s podporou státu, potažmo EU.

ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo vytvořit stručný úvod do jaderné energetiky včetně popisu jaderných reaktorů a jejich vývoje, popsat malé modulární reaktory a věnovat se jednotlivým typům SMR ve vývoji a jejich využití, popsat teplárenství v ČR a analyzovat velikosti českých tepláren a tyto informace pak využít při popsání možností využití této technologie v českém teplárenství.

Jaderná energetika udělala v minulém století obrovské pokroky a byly konstruovány čím dál novější reaktory, které jsou efektivnější a bezpečnější než jejich předchůdci. Vznikly různé druhy reaktorů, od tlakovodních po reaktory chlazené plynem. Tento vývoj se nezastavil ani po útlumu jaderné energetiky, který byl způsoben haváriemi a ekonomickou náročností stavby reaktorů. Vývoj těchto reaktorů se dá shrnout do čtyř generací, přičemž na světě je v provozu nejvíce reaktorů tlakovodních reaktorů, konkrétně z druhé generace.

Čím dál populárnější se stávají malé modulární reaktory. Tyto reaktory nemají výkon vyšší, než 300 MWe. Jejich velká výhoda je v tom, že pro zvýšení výkonu elektrárny stačí pouze přidat další modul s reaktorem, přičemž se počítá se sériovou výrobou. Malé reaktory se již dlouhou dobu využívají v námořní dopravě, a právě díky konceptu SMR by mohly začít být využívány i jako stacionární zdroje elektrické i tepelné energie, ale také například na odsolování mořské vody nebo výroby vodíku. Tato představa je však ale hlavně předmětem budoucnosti, protože většina SMR je stále ve vývoji a proces získávání licence je zdoluhavý.

Mezi nejdůležitější příklady SMR patří americké NuScale, který už licenci na svůj design získal a také mPower, dále pak třeba ruský SVBR-100, japonský 4S nebo čínský HTR-PM. Kromě těchto technologických mocností se vývoji věnují ale i menší státy, za zmínku stojí český reaktor TEPLATOR, který je vyvíjen pro použití v teplárenství.

Teplárenství v České republice je založeno především na spalování uhlí, plynu, případně biomasy. I přes snahu o modernizaci a snížení emisí představují tyto teplárny ekologickou zátěž a všechny uhelné teplárny by měly do roku 2030 přejít na plyn. Pro zvýšení efektivity využití paliva je hojně využíván princip kogenerace, tedy výroby tepelné a elektrické energie zároveň. Ze soustav dálkového vytápění a blokových kotelen je zásobováno 40 % domácností. Na území ČR je celá řada tepláren, z nichž většina pracuje s více kotli, a mají celkové výkony v řádu stovek MWt.

Díky malé velikosti, menší ekonomické náročnosti a v podstatě nulovým emisím mají SMR potenciál nahradit některé teplárny v ČR a zásobovat teplem části velkých měst či menší města a okolní obce. O této možnosti uvažuje například Liberec, Jablonec nad Nisou nebo Plzeň, kde by místní teplárny šly nahradit zařízeními s reaktory NuScale, které by díky své modularitě dokázaly pokrýt větší i menší poptávku po tepelné i elektrické energii. Dalším vhodným reaktorem k tomuto použití je český TEPLATOR, který vyrábí pouze teplo a jeho velkou výhodou je, že jako palivo používá i jaderný odpad a výroba tepla je levnější než v plynové teplárně.

Překážku tvoří dlouhé procesy licencování, otázka ukládání jaderného odpadu, ale také všeobecná ostražitost vůči jaderné energetice a její bezpečnosti. Nevýhodou je také požadavek na speciálně proškolený personál.

I přes tyto překážky mají však SMR do budoucna potenciál, jejich kompaktnost, velké pokroky v zabezpečení, které už není závislé na lidském zásahu, multifunkčnost a touha po výrobě energie bez emisí malým modulárním reaktorům dávají šanci se v blízké budoucnosti uplatnit.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] BEČVÁŘ, Josef. *Jaderné elektrárny*. 2. vyd. Praha: SNTL/ALFA, 1981, 634 s.
- [2] *The History of Nuclear Energy* [online]. Washington D.C: U.S. Department of Energy: Office of Nuclear Energy, Science and Technology, 2011 [cit. 2021-02-14]. Dostupné z: https://www.energy.gov/sites/prod/files/The%20History%20of%20Nuclear%20Energy_0.pdf
- [3] RAČEK, Jiří. *Jaderné elektrárny*. Vyd. 2. Brno: Zdeněk Novotný, 2005, c2002. ISBN 80-214-2945-3.
- [4] KLOBOUČEK, Jan. *Jaderná energetika*. Liberec: Ediční středisko TUL, 2005. ISBN 80-708-3948-1.
- [5] KUSALA, Jaroslav. *Jaderná energetika*. Skupina ČEZ [online]. 2004 [cit. 2021-2-28]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/nuklearni/nuklear.htm>
- [6] Nuclear Fission. *Accessscience* [online]. [cit. 2021-2-28]. Dostupné z: <https://www.accessscience.com/content/nuclear-fission/458400>
- [7] *Sustainable power generation: Current status, future challenges, and perspectives* [online]. Academic Press, 2019 [cit. 2021-2-28]. ISBN 978-0-12-817012-0. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/C2018-0-01215-3>
- [8] Jaderné palivo. *Skupina ČEZ* [online]. [cit. 2021-2-28] Dostupné z: https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/vykladovy-slovník-energetiky/hesla/jader_pal.html
- [9] Palivo pro jaderné elektrárny: uhlí ani plyn vylepšit nejdou, jaderné palivo se zdokonaluje neustále. *Proelektrotechniky.cz* [online]. 21.8. 2019 [cit. 2021-2-28]. Dostupné z: <http://proelektrotechniky.cz/vyroba-a-prenos/174.php>
- [10] Nuclear Fuel and its Fabrication. *World nuclear association* [online]. [cit. 2021-3-16]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/conversion-enrichment-and-fabrication/fuel-fabrication.aspx>
- [11] Nuclear power reactors. *World nuclear association* [online]. [cit. 2021-3-16]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/nuclear-power-reactors.aspx>
- [12] Generace jaderných reaktorů: jaké generace máme, čím se navzájem liší. *Atominfo* [online]. [cit. 2021-3-15]. Dostupné z: <https://atominfo.cz/2016/03/generace-jadernych-reaktoru-jake-generace-mame-cim-se-navzajem-lisi/>
- [13] History Of Reactor Development. *Britannica.com* [online]. [cit. 2021-3-15]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/nuclear-reactor/History-of-reactor-development>
- [14] ZÁKLADNÍ TYPY JADERNÝCH REAKTORŮ: VÝVOJOVÉ GENERACE TECHNOLOGIE JADERNÝCH REAKTORŮ. *Skupina ČEZ* [online]. [cit. 2021-3-15]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobní-zdroje/jaderna-energetika/je-ve-svete/zakladni-typy-jadernych-reaktoru>

- [15] Advanced Nuclear Power Reactors. *World nuclear association* [online]. [cit. 2021-3-15]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/advanced-nuclear-power-reactors.aspx>
- [16] Status report 69: Advanced Candu Reactor 1000 (ACR-1000). *International atomic energy agency* [online]. [cit. 2021-3-15]. Dostupné z: <https://aris.iaea.org/PDF/ACR-1000.pdf>
- [17] Generation IV Systems. *The generation IV international forum* [online]. [cit. 2021-4-10]. Dostupné z: https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_59461/generation-iv-systems
- [18] Reaktory 4. generace: rychlé reaktory FNR a další. *Oenergetice.cz* [online]. [cit. 2021-4-10]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/reaktory-4-generace-rychle-fnr-a-dalsi>
- [19] 3 Advanced Reactor Systems to Watch by 2030. *Office of nuclear energy* [online]. 12.4.2021 [cit. 2021-4-10]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/ne/articles/3-advanced-reactor-systems-watch-2030>
- [20] ŠEVEČEK, Martin. Malé modulární reaktory u nás a ve světě. *Oenergetice.cz* [online]. 7.3. 2018 [cit. 2021-4-10]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/jaderne-elektrarny/male-modularni-reaktory-u-nas-ve-svete>
- [21] Small Nuclear Power Reactors. *World nuclear association* [online]. 2021 [cit. 2020-4-20]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuelcycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx>
- [22] SMR ve světě. *Malé jaderné reaktory* [online]. [cit. 2021-5-7]. Dostupné z: <http://malereaktory.cz/smr-ve-svete>
- [23] Technology Overview: How the NuScale module works. *NuScale Power* [online]. [cit. 2021-5-7]. Dostupné z: <https://www.nuscalepower.com/technology/technology-overview>
- [24] NUSCALE POWER, LLC. *NuScale SMR Technology: An Ideal Solution for Repurposing U.S. Coal Plant Infrastructure and Revitalizing Communities* [online]. NuScale Power, LLC, Corvallis, Oregon, 2021 [cit. 2021-5-7]. Dostupné z: <https://www.nuscalepower.com/technology/technical-publications>
- [25] ŠEVEČEK, Martin. NuScale jako první žádá o licenci svého malého modulárního reaktoru. *Oenergetice.cz* [online]. 17.1.2017 [cit. 2021-5-7]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektroenergetika/nuscale-jako-prvni-zada-licenci-sveho-maleho-modularniho-reaktoru>
- [26] Nastínění licenčního plánu pro malý modulární reaktor NuScale. *Atominfo* [online]. 2015 [cit. 2021-5-7]. Dostupné z: <https://atominfo.cz/2015/07/nastineni-licencniho-planu-pro-maly-modularni-reaktor-nuscale/>
- [27] IAEA. *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments: A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS)* [online]. 2020 [cit. 2021-5-7]. Dostupné z: https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2020.pdf

- [28] HYLKO, James M. Small Is the New Big: The B&W Small Modular Reactor. *POWER Magazine* [online]. 1.8. 2012 [cit. 2021-5-7]. Dostupné z: <https://www.powermag.com/small-is-the-new-big-the-bw-small-modular-reactor/>
- [29] Malé modulární reaktory jako vhodné řešení pro budoucnost energetiky. Co český průmysl čeká? *Technický týdeník* [online]. 27.2. 2020 [cit. 2021-5-7]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/denni-zpravodajstvi/male-modularni-reaktory-jako-vhodne-reseni-pro-budoucnost-energetiky-co-cesky-prumysl-ceka_49711.html
- [30] Korea, Saudi Arabia to set up Korea's SMART reactor construction JV. *Pulse* [online]. 6.1. 2020 [cit. 2021-5-7]. Dostupné z: <https://pulsenews.co.kr/view.php?sc=30800028&year=2020&no=13894>
- [31] Infografika: Malé modulární reaktory (SMR) v pokročilé fázi vývoje. *Oenergetice.cz* [online]. 20.2.2020 [cit. 2021-5-7]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/jaderne-elektrarny/infografika-male-modularni-reaktory-smr-pokrocile-fazi-vyvoje>
- [32] Rosatom vyrobí unikátní komponenty pro reaktor BREST-OD-300. *Atominfo* [online]. 22.2. 2021 [cit. 2021-5-7]. Dostupné z: <https://atominfo.cz/2021/02/rosatom-vyrobi-komponenty-pro-brest-od-300/>
- [33] Experimentální rychlý reaktor BREST-300. *Třípól* [online]. 15.4. 2021 [cit. 2021-5-7]. Dostupné z: <https://www.3pol.cz/cz/rubriky/jaderna-fyzika-a-energetika/2669-experimentalni-rychly-reaktor-brest-300>
- [34] BUDOUCNOST JADERNÝCH TECHNOLOGIÍ (PROJEKTY 4. GENERACE, MALÉ REAKTORY, FÚZE). *Skupina ČEZ* [online]. [cit. 2021-5-7]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobni-zdroje/jaderna-energetika/je-ve-svete/budoucnost-jadernych-technologii>
- [35] Malé jaderné reaktory dnes – SVBR-100. *Atominfo* [online]. 12.11. 2012 [cit. 2021-5-7]. Dostupné z: <https://atominfo.cz/2012/11/male-jaderne-reaktory/>
- [36] ARIE, Kazuo. Current Activities on the 4S Reactor Deployment. *Yumpu* [online]. 12.11. 2012 [cit. 2021-5-7]. Dostupné z: <https://www.yumpu.com/en/document/read/37370092/current-activities-on-the-4s-reactor-deploymentpdf-uxc>
- [37] SALAVEC, Jiří. Ruská plovoucí jaderná elektrárna se vydala na poslední část své cesty. *Oenergetice.cz* [online]. 26.8. 2019 [cit. 2021-5-7]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/jaderne-elektrarny/ruska-plovouci-jaderna-elektrarna-se-vydala-posledni-cast-sve-cesty>
- [38] Plovoucí elektrárna Akademik Lomonosov už dodala do sítě 21 GWh elektřiny. *Oenergetice.cz* [online]. 11.3. 2020 [cit. 2021-5-7]. Dostupné z: <https://atominfo.cz/2020/03/plovouci-elektrarna-akademik-lomonosov-uz-dodala-do-site-21-gwh-elektriny/>

- [39] Plovoucí jaderná elektrárna začala vyrábět kromě elektřiny také teplo. *Atominfo* [online]. 17.7. 2020 [cit. 2021-5-7]. Dostupné z: <https://atominfo.cz/2020/07/plovouci-jaderna-elektrarna-zacala-vyrabet-krome-elektriny-take-teplo/>
- [40] 4th generation reactor: General Atomics EM2 uses spent fuel, runs for 30 years! *MeteoLCD* [online]. 21.9. 2012 [cit. 2021-5-7]. Dostupné z: <https://meteoLCD.wordpress.com/2012/09/21/4th-generation-reactor-general-atomics-em2-uses-spent-fuel-runs-for-30-years/>
- [41] ADAMS, Rod. HTR-PM: Nuclear-heated gas producing superheated steam. *Atomic Insights* [online]. 27.6. 2014 [cit. 2021-5-7]. Dostupné z: <https://atomicinsights.com/htr-pm-nuclear-heated-gas-producing-superheated-steam/>
- [42] PUCHNAR, Jiří. První parogenerátor pro čínský demonstrační reaktor HTR-PM prošel tlakovými testy. *Oenergetice* [online]. 6.10. 2018 [cit. 2021-5-7]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/jaderne-elektrarny/prvni-parogenerator-cinsky-demonstracni-reaktor-htr-pm-prosel-tlakovymi-testy>
- [43] FOŘTOVÁ, Anna, Radek ŠKODA a Michal ZEMAN. TEPLATOR: dostupné teplárenství 21. století. *Český institut informatiky robotiky a kybernetiky* [online]. 1.10. 2020 [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: <https://www.ciirc.cvut.cz/cs/teplator-dostupne-teplarenstvi-21-stoleti/>
- [44] PUCHNAR, Jiří. Odsolování mořské vody pomocí jaderných elektráren. *Oenergetice* [online]. 26.1. 2017 [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/odsolovani-morske-vody-pomoci-jadernych-elektraren>
- [45] DOHNAL, Radomír. Odsolování mořské vody ničí životní prostředí. Nejen spotřebou energie, ale také toxickou solankou. *Ekolist.cz* [online]. 16.5. 2019 [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: <https://ekolist.cz/cz/zpravodajstvi/zpravy/odsolovani-morske-vody-nici-zivotni-prostredi.nejen-spotrebou-energie-ale-take-toxickou-solankou>
- [46] PUCHNAR, Jiří. Plavidla na jaderný pohon: Civilní plavidla. *Oenergetice.cz* [online]. 24.9. 2015 [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/rychle-zpravy/plavidla-na-jaderny-pohon-civilni-plavidla>
- [47] Hydrogen Production and Uses. *World nuclear association* [online]. Duben 2021 [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear.org/information-library/energy-and-the-environment/hydrogen-production-and-uses.aspx>
- [48] Zvládneme v České republice perspektivní malé jaderné reaktory? *Technický týdeník* [online]. 14.6. 2016 [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/zvladneme-v-ceske-republice-perspektivni-male-jaderne-reaktory_36040.html
- [49] BUDÍN, Jan. Kogenerace: princip, technologie a výhody. *Oenergetice* [online]. 21.4. 2015 [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/odsolovani-morske-vody-pomoci-jadernych-elektraren>
- [50] KADRNOŽKA, Jaroslav a Ladislav OCHRANA. *Teplárenství*. Brno: CERM, 2001. ISBN 80-720-4222-X.

- [51] KORPÍK, Jiří. Tepelné oběhy a jejich realizace, *Transformační technologie*, 2006-11, [last updated 2020-11-05]. Brno: Jiří Škorpík, [on-line] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <https://www.transformacni-technologie.cz/06.html>
- [52] Teplárenství: Teplárenství - Dodávka energie. *MojeEnergie* [online]. [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: <http://www.mojeenergie.cz/cz/teplarenstvi-dodavka-energie>
- [53] Rankin-Clausiusův cyklus. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Rankin-Clausiusův_cyklus
- [54] KAUFMANN, Pavel. *Vývoj teplárenství v České republice* [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/1423/jaro2012/MVZ458/um/Kaufmann_2007_18-21.pdf
- [55] Podíl výroby elektřiny v kombinované výrobě je v ČR mírně nad průměrem eu. *Technický týdeník* [online]. 30.5. 2014 [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/podil-vyroby-elektriny-v-kombinovane-vyrobe-je-v-cr-mirne-nad-prumerem-eu_25338.html
- [56] SOLDATOVA, Anna. Teplárny v Česku loni investovaly do snížení emisí další 1,5 miliardy. *Odpady-online.cz* [online]. 21.1. 2021 [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: <https://www.odpady-online.cz/teplarny-v-cesku-loni-investovaly-do-snizeni-emisi-dalsi-15-miliardy/>
- [57] E15: Konec uhlí vyjde teplárny podle studie ČVUT na zhruba sto miliard korun. *Oenergetice.cz* [online]. 8.4. 2021 [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/energetika-v-cr/e15-konec-uhli-vyjde-teplarny-podle-studie-cvut-na-zhruba-sto-miliard-korun>
- [58] VEOLIA ENERGIE ČR. Naše společnost. *Veolia Energie*[online]. [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <https://www.vecr.cz/o-nas/o-spolecnosti>
- [59] VEOLIA ENERGIE ČR. Kde působíme. *Veolia Energie* [online]. [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <https://www.vecr.cz/o-nas/kde-pusobime>
- [60] IPPC. Ministerstvo životního prostředí [online]. [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/ippc/ippc4.nsf/\\$pid/MZPSKH7VM88E](https://www.mzp.cz/ippc/ippc4.nsf/$pid/MZPSKH7VM88E)
- [61] TAUBEROVÁ, Daniela. Olomoucká teplárna sníží znečištění, za stovky milionů. *Olomoucký deník* [online]. 22.2. 2017 [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: https://olomoucky.denik.cz/zpravy_region/teplarna-snizuje-emise-investuje-stovky-milionu-30170221.html
- [62] IPPC. Ministerstvo životního prostředí [online]. [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/ippc/ippc4.nsf/\\$pid/MZPDRHKLUG42](https://www.mzp.cz/ippc/ippc4.nsf/$pid/MZPDRHKLUG42)
- [63] KRUMPHOLZOVÁ, Tereza. Elektrárna Třebovice: lidé měli šanci podívat se dovnitř. *Moravskoslezský deník* [online]. 18.5. 2013 [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: https://moravskoslezsky.denik.cz/zpravy_region/elektrarna-trebovice-lide-meli-sanci-podivat-se-dovnitř-20130518.html
- [64] IPPC. Ministerstvo životního prostředí [online]. [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/ippc/ippc4.nsf/\\$pid/MZPSKHJ5IE2F](https://www.mzp.cz/ippc/ippc4.nsf/$pid/MZPSKHJ5IE2F)

- [65] VEOLIA ENERGIE ČR. Teplárna Přerov slaví 50 let. *Veolia Energie* [online]. 15.12. 2014 [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <https://www.vecr.cz/teplarna-prerov-slavi-50-let>
- [66] IPPC. Ministerstvo životního prostředí [online]. [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/ippc/ippc4.nsf/\\$pid/MZPR98EJ3THR](https://www.mzp.cz/ippc/ippc4.nsf/$pid/MZPR98EJ3THR)
- [67] VEOLIA ENERGIE ČR. Teplárna Krnov slaví kulatiny. *Veolia Energie* [online]. 20.9. 2013 [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <https://www.veolia.cz/cs/media/tiskove-zpravy/teplarna-krnov-slavi-kulatiny>
- [68] *Pražská Teplárenská, a.s.* [online]. [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <https://www.ptas.cz/>
- [69] IPPC. Ministerstvo životního prostředí [online]. [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/ippc/ippc4.nsf/\\$pid/MZPVHHJLU65P](https://www.mzp.cz/ippc/ippc4.nsf/$pid/MZPVHHJLU65P)
- [70] SKUPINA ČEZ. ELEKTRÁRNA MĚLNÍK. *Skupina ČEZ* [online]. 20.9. 2013 [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobní-zdroje/uhelne-elektrarny-a-teplarny/uhelne-elektrarny-a-teplarny-cez-v-cr/elektrarna-melnik-58183#2>
- [71] IPPC. Ministerstvo životního prostředí [online]. [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/ippc/ippc4.nsf/\\$pid/MZPVHGZJO40B](https://www.mzp.cz/ippc/ippc4.nsf/$pid/MZPVHGZJO40B)
- [72] *Teplárny Brno* [online]. [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <https://www.teplarny.cz/>
- [73] *Teplárna Liberec* [online]. [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <https://tli.mvv.cz/>
- [74] IPPC. Ministerstvo životního prostředí [online]. [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/ippc/ippc4.nsf/\\$pid/MZPR98EJ8UTP](https://www.mzp.cz/ippc/ippc4.nsf/$pid/MZPR98EJ8UTP)
- [75] *Plzeňská Teplárenská* [online]. [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: <https://www.pltep.cz/>
- [76] IPPC. Ministerstvo životního prostředí [online]. [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/ippc/ippc4.nsf/\\$pid/MZPR98EHZT6W](https://www.mzp.cz/ippc/ippc4.nsf/$pid/MZPR98EHZT6W)
- [77] IPPC. Ministerstvo životního prostředí [online]. [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/ippc/ippc4.nsf/\\$pid/MZPR98EKAWPD](https://www.mzp.cz/ippc/ippc4.nsf/$pid/MZPR98EKAWPD)
- [78] *Teplárna České Budějovice* [online]. [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <http://www.teplarna-cb.cz/>
- [79] IPPC. Ministerstvo životního prostředí [online]. [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/ippc/ippc4.nsf/\\$pid/MZPR98EJCLLM](https://www.mzp.cz/ippc/ippc4.nsf/$pid/MZPR98EJCLLM)
- [80] *Sev.en Energy* [online]. [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: <https://www.7energy.com/cz/>
- [81] IPPC. Ministerstvo životního prostředí [online]. [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/ippc/ippc4.nsf/\\$pid/MZPVHGYKO58V](https://www.mzp.cz/ippc/ippc4.nsf/$pid/MZPVHGYKO58V)
- [82] IPPC. Ministerstvo životního prostředí [online]. [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/ippc/ippc4.nsf/\\$pid/MZPR98EHXXM6](https://www.mzp.cz/ippc/ippc4.nsf/$pid/MZPR98EHXXM6)

- [83] MENŠÍKOVÁ, Barbora. Nové trendy v teplárenství [online]. Brno, 2019 [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116436>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Petr Kracík
- [84] Towards a smart, efficient and sustainable heating and cooling sector. *European Commission* [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/MEMO_16_311
- [85] The Green Deal is the EU's 'man-on-the-moon moment': here's why we need heat pumps to make it happen. *Daikin* [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: https://www.daikin.eu/en_us/daikin-blog/the-green-deal.html
- [86] KUBÁTOVÁ, Zuzana. Český vynález: Trpaslík, který může pomoci utéct od uhlí. *Seznam zprávy* [online]. 26.3. 2021 [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.seznamzpravy.cz/clanek/cesi-vyvinuli-maly-reaktor-je-to-trpaslik-ale-muze-pomoci-utect-od-uhli-148223>
- [87] Japanese EPC invests \$40m in nuclear SMR developer NuScale Power. *Power Engineering International* [online]. 7.4. 2021 [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.powerengineeringint.com/nuclear/japanese-epc-invests-40m-in-nuclear-smr-developer-nuscale-power/>
- [88] TEPLÁRNA TRMICE. *Skupina ČEZ* [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobní-zdroje/uhelne-elektrarny-a-teplarny/uhelne-elektrarny-a-teplarny-cez-v-cr/teplarna-trmice-58160>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Význam
°C	Stupeň Celsia
ABWR	Advanced boiling water reactor/ Vylepšený varný reaktor
BWR	Boiling water reactor/ Varný reaktor
CO ₂	Oxid uhličitý
ČR	Česká republika
EU	Evropská Unie
GFR	Gas cooled fast reactor/ Plyněm chlazený rychlý reaktor
HTR	High temperature reactor/ Vysokoteplotní reaktor
JAR	Jihoafrická republika
LFR	Lead cooled fast reactor/ Olovem chlazený rychlý reaktor
LWGR	Light water graphite moderated reactor/Lehkovodní, grafitem moderovaný reaktor
MOX	Mixed oxide fuel/ Směsné oxidické palivo
MSR	Molten salt reactor/ Reaktor založený na roztavených solích
MWe	Megawatt elektrický
MWt	Megawatt tepelný
PHWR	Pressurized heavy water reactor/ Tlakovodní reaktor užívající těžkou vodu
Pu	Plutonium
PWR	Pressurized water reactor/ Tlakovodní reaktor
PWR	Pressurized water reactor/ Tlakovodní reaktor
s	Entropie [J·K ⁻¹]
SCWR	Super critical water cooled reactor/ Superkritický vodou chlazený reaktor
SFR	Sodium cooled fast reactor/ Sodíkem chlazený rychlý reaktor
SMART	Smart modular advanced reactor technology/Malý modulární reaktor
SMR	Small modular reactor/ Malý modulární reaktor
T	Teplota [°C]
U	Uran
UO ₂	Oxid uraničitý
USA	United States of America/ Spojené státy americké
VHTR	Very high temperature reactor/ Reaktor s velmi vysokými teplotami