



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY**

**A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

**ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY**

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

## **MODEL VYUŽITÍ PROCESNÍHO TEPLA V SOUSTAVĚ S POKROČILÝMI MALÝMI MODULÁRNÍMI REAKTORY**

SIMULATIONAL MODEL OF UTILIZATION OF PROCESS HEAT IN THE SYSTEM WITH ADVANCED SMALL MODULAR REACTORS

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Václav Doležal**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. Karel Katovský, Ph.D.**

**BRNO 2024**

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

**Student:** Bc. Václav Doležal

**ID:** 211446

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2023/24

**NÁZEV TÉMATU:**

## **Model využití procesního tepla v soustavě s pokročilými malými modulárními reaktory**

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

1. Zpracujte historický přehled využívání procesního, odběrového či odpadního tepla z jaderných elektráren k jiným účelům, než k vytápění.
2. Zpracujte přehled možností využití tepla z jaderných elektráren s ohledem na teplotní potenciál, tlak a odebírané množství.
3. Zpracujte přehled pokročilých projektů malých modulárních reaktorů s ohledem na průmyslové využití tepla. Stručně zpracujte i historickou zkušenost s výstavbou a provozem u vybraných typů, poskytujících vysokopotenciální teplo.
4. Vypracujte model využití procesního tepla získaného z pokročilých malých modulárních reaktorů.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

doporučená literatura podle pokynů vedoucího závěrečné práce

**Termín zadání:** 5.2.2024

**Termín odevzdání:** 20.5.2024

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Karel Katovský, Ph.D.

**prof. Ing. Petr Toman, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce zkoumá historii a současné využívání tepla z jaderných elektráren, a především pak malých modulárních reaktorů (SMR). Práce nejprve analyzuje historický vývoj a mapuje projekty z minulosti v této oblasti. Dále poskytuje práce přehled možných aplikací tepla z jaderných elektráren. Následně se práce zaměřuje na pokročilé projekty malých modulárních reaktorů s důrazem na průmyslové využití tepla. V rámci praktické části je sestaven model soustavy, který integruje procesní teplo z SMR v systémech vybraných potenciálních odběratelů s možností současné výroby vodíku.

## **Klíčová slova**

Malý modulární reaktor; MMR; Procesní teplo; Odběrové teplo; Odpadní teplo; Tepelná energie; Vodík

## **Abstract**

This thesis explores the history and current utilization of heat from nuclear power plants, particularly small modular reactors (SMRs). The work initially analyzes the historical development and surveys past projects in this area. Furthermore, it provides an overview of possible applications of heat from nuclear power plants. Subsequently, the thesis focuses on advanced projects of small modular reactors with an emphasis on the industrial use of heat. In the practical part, a system model is constructed that integrates process heat from SMRs in systems of selected potential consumers with the possibility of concurrent hydrogen production.

## **Keywords**

Small modular reactor; SMR; Process heat; Subscription heat; Waste heat; Thermal energy; Hydrogen

## **Bibliografická citace**

DOLEŽAL, Václav. *Model využití procesního tepla v soustavě s pokročilými malými modulárními reaktory* [online]. Brno, 2024 [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/159499>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Karel Katovský.

# Prohlášení autora o původnosti díla

**Jméno a příjmení studenta:** *Václav Doležal*

**VUT ID studenta:** *211446*

**Typ práce:** *Diplomová práce*

**Akademický rok:** *2023/24*

**Téma závěrečné práce:** *Model využití procesního tepla v soustavě s pokročilými malými modulárními reaktory*

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 20. května 2024

-----  
podpis autora

## Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Karlu Katovskému Ph.D. za jeho cenné rady, konzultace a vedení při jejím vypracování. Zároveň bych chtěl poděkovat své rodině za veškerou podporu v průběhu celého mého studia.

V Brně dne: 20. května 2024

-----  
podpis autora

# Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	9
SEZNAM TABULEK .....	10
ÚVOD .....	11
<b>1. HISTORICKÝ PŘEHLED VYUŽITÍ TEPLA Z JADERNÝCH ELEKTRÁREN .....</b>	<b>12</b>
1.1 PRVNÍ HISTORICKÉ VYUŽITÍ TEPLA Z JADERNÉHO REAKTORU .....	12
1.2 VOJENSKÉ VYUŽITÍ JADERNÉHO TEPLA .....	12
1.2.1 Jaderné teplo v letectví.....	13
1.2.2 Jaderné teplo pro pohon ponorek.....	13
1.3 TEPLA Z JADERNÝCH REAKTORŮ PRO VÝROBU ELEKTRINY .....	14
1.3.1 Jaderná elektrárna Obninsk.....	14
1.3.2 Jaderná elektrárna Calder Hall .....	14
1.3.3 První komerční jaderná elektrárna.....	15
1.4 PRVNÍ PRŮMYSLOVÉ VYUŽITÍ JADERNÉHO TEPLA .....	15
1.5 PRVNÍ VYUŽITÍ JADERNÉHO TEPLA PRO VÝROBU TĚŽKÉ VODY .....	16
1.6 ZEMĚDĚLSTVÍ A AKVAKULTURA .....	16
1.6.1 Zemědělství.....	16
1.6.2 Akvakultura.....	17
1.6.3 Závěry zkoumání využití odpadního tepla pro zemědělství a akvakulturu.....	17
1.7 ODSOLOVÁNÍ .....	18
1.8 JADERNÁ ELEKTRÁRNA BRUCE.....	19
1.9 RAFINACE SOLI .....	21
1.10 JADERNÁ ELEKTRÁRNA GÖSGEN.....	21
1.11 INET .....	21
1.12 HTTR.....	22
1.13 HTR-10 .....	22
1.14 HTR-PM .....	23
<b>2. PŘEHLED MOŽNÉHO VYUŽITÍ TEPLA Z JADERNÝCH ELEKTRÁREN .....</b>	<b>24</b>
2.1 VÝROBA TĚŽKÉ VODY .....	24
2.2 ODSOLOVÁNÍ .....	25
2.2.1 Vícetupňová destilace .....	25
2.2.2 Vícetupňová mžiková destilace .....	26
2.3 ZÍSKÁVÁNÍ ROPY Z DEHTOVÉHO PÍSKU .....	26
2.4 RAFINACE ROPY .....	27
2.5 VÝROBA VODÍKU .....	28
2.5.1 Parní perforace metanu .....	28
2.5.2 Vysokoteplotní parní elektrolyza .....	29
2.5.3 Termochemické dělení vody .....	30
<b>3. PŘEHLED POKROČILÝCH PROJEKTŮ MALÝCH MODULÁRNÍCH REAKTORŮ .....</b>	<b>32</b>
3.1 BWRX-300 .....	32
3.1.1 Kanada.....	33
3.1.2 Polsko.....	33
3.1.3 Další státy.....	33

3.2	NUSCALE SMR.....	34
3.2.1	<i>Projekty v rámci Severní Ameriky</i> .....	34
3.2.2	<i>Projekty v Evropě</i> .....	35
3.2.3	<i>Zrušený projekt</i> .....	35
3.3	NUWARD.....	36
3.4	HOLTEC INTERNATIONAL .....	36
3.4.1	<i>SMR-300</i> .....	37
3.4.2	<i>SMR-160</i> .....	37
3.5	UK SMR .....	38
3.6	WESTINGHOUSE .....	39
3.6.1	<i>AP300</i> .....	39
3.6.2	<i>eVinci</i> .....	40
3.7	I-SMR/SMART100 .....	40
3.8	X-ENERGY .....	40
3.9	TERRAPOWER .....	41
3.10	ARC CLEAN TECHNOLOGY .....	42
3.11	ČESKÉ PROJEKTY SMR.....	42
3.11.1	<i>Energy Well</i> .....	42
3.11.2	<i>TEPLATOR</i> .....	43
3.11.3	<i>CR-100</i> .....	43
3.11.4	<i>David SMR</i> .....	43
3.11.5	<i>HeFASTo</i> .....	43
<b>4.</b>	<b>MODEL SOUSTAVY ZAPOJUJÍCÍ PROCESNÍ TEPLA Z MALÝCH MODULÁRNÍCH REAKTORŮ .....</b>	<b>45</b>
4.1	VÝBĚR PROJEKTŮ SMR A JEJICH POTENCIÁLNÍCH PRŮMYSLOVÝCH APLIKACÍ.....	46
4.2	ODHAD TEPELNÉ NÁROČNOSTI A SPECIFIKACE TEPLŮTNÍCH A TLAKOVÝCH PARAMETRŮ PRO PRŮMYSLOVÉ ODBĚRATELE .....	47
4.2.1	<i>Ražinérie</i> .....	47
4.2.2	<i>Chemický průmysl</i> .....	49
4.3	OPTIMALIZACE PARAMETRŮ PÁRY Z SMR A VÝPOČET HMOTNOSTNÍCH PRŮTOKŮ PRO PRŮMYSLOVÁ VYUŽITÍ .....	51
4.4	VYUŽITÍ VODÍKU K OPTIMALIZACI PARAMETRŮ PÁRY A MOŽNOSTI JEHO VÝROBY.....	54
4.4.1	<i>Vysokoteplotní parní elektrolyza</i> .....	55
4.4.2	<i>Parní perforace metanu a termochemické dělení vody</i> .....	60
4.5	VYUŽITÍ ELEKTRICKÉHO OHŘEVU K OPTIMALIZACI PARAMETRŮ PÁRY.....	64
<b>5.</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>66</b>
	<b>LITERATURA.....</b>	<b>68</b>
	<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>80</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>83</b>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Teplotní potenciál jednotlivých typů SMR [100] .....	45
Obrázek 2 Náhradní schéma dodávky procesního tepla spotřebiteli .....	52
Obrázek 3 Energetické požadavky pro výrobu vodíku skrze proces vysokoteplotní parní elektrolýzy při atmosférickém tlaku. Převzato z [48] .....	57

# SEZNAM TABULEK

Tabulka 1-1 Využitelnost odpadního tepla [18] .....	18
Tabulka 2-1 Teploty varu složek ropy [40] .....	28
Tabulka 4-1 Přehled teplotních požadavků a energetická náročnost možných využití jaderného tepla ....	46
Tabulka 4-2 Parametry vybraných SMR .....	47
Tabulka 4-3 Požadavky na parametry páry jednotlivých spotřebitelů .....	51
Tabulka 4-4 Energie potřebná pro přehřev teplotně látky .....	52
Tabulka 4-5 Tepelná energie dodaná SMR .....	53
Tabulka 4-6 Počet SMR potřebných pro pokrytí požadavků na dodávku tepelné energie $Q_I$ .....	53
Tabulka 4-7 Potřebné množství vodíku pro přehřev páry .....	55
Tabulka 4-8 Požadované množství energie na výrobu vodíku skrze vysokoteplotní parní elektrolyzu pro jednotlivé případy .....	56
Tabulka 4-9 Teplotní parametry páry pro vysokoteplotní parní elektrolyzu a příslušný poměr tepelné a elektrické energie .....	57
Tabulka 4-10 Tepelná energie dodávaná do procesu vysokoteplotní parní elektrolyzy pro jednotlivé případy .....	58
Tabulka 4-11 Elektrická energie dodávaná do procesu vysokoteplotní parní elektrolyzy pro jednotlivé případy .....	59
Tabulka 4-12 Požadavky na tepelnou energii pro jednotlivé případy se započtením požadavků na tepelnou energii pro výrobu vodíku .....	59
Tabulka 4-13 Počet jednotlivých SMR pro pokrytí nároků na tepelnou energii jednotlivých vybraných odběratelů .....	60
Tabulka 4-14 Požadované množství energie na výrobu vodíku skrze parní perforaci metanu pro jednotlivé případy .....	61
Tabulka 4-15 Požadované množství energie na výrobu vodíku skrze termochemické dělení vody pro jednotlivé případy .....	61
Tabulka 4-16 Požadované množství elektrické energie pro ohřev páry při využití parní perforace metanu .....	62
Tabulka 4-17 Požadované množství elektrické energie pro ohřev páry při využití termochemického dělení vody .....	62
Tabulka 4-18 Požadavky na tepelnou energii pro jednotlivé případy se započtením požadavků na tepelnou energii pro výrobu vodíku skrze parní perforaci metanu .....	63
Tabulka 4-19 Požadavky na tepelnou energii pro jednotlivé případy se započtením požadavků na tepelnou energii pro výrobu vodíku skrze termochemické dělení vody .....	63
Tabulka 4-20 Požadovaný počet SMR pro pokrytí nároků na tepelnou energii jednotlivých vybraných odběratelů s využitím parní perforace metanu .....	63
Tabulka 4-21 Požadovaný počet SMR pro pokrytí nároků na tepelnou energii jednotlivých vybraných odběratelů s využitím termochemického dělení vody .....	64
Tabulka 4-22 Požadované množství elektrické energie pro optimalizaci parametrů páry .....	64
Tabulka 4-23 Nároky na tepelnou energii vyráběnou SMR pro pokrytí tepelných požadavků vybraných odběratelů .....	65
Tabulka 4-24 Požadovaný počet SMR pro pokrytí nároků na tepelnou energii jednotlivých vybraných odběratelů při uvažování elektrického přehřevu dodávané páry .....	65

# ÚVOD

Energetický sektor v dnešní době čelí stále rostoucím výzvám, vyžadujícím inovativní a dlouhodobě udržitelná řešení. Tato diplomová práce se na jednu z těchto výzev zaměřuje a prozkoumává, tak problematiku spadající do oblastí jaderné energetiky a teplárenství. Hlavním cíle práce je prozkoumat možnosti efektivního využití procesního tepla generovaného malými modulárními reaktory.

Odstavení uhelných elektráren je klíčovým krokem k redukci emisí skleníkových plynů a dosažení udržitelnější energetické budoucnosti. Zároveň to však vytváří vážné otázky týkající se stability energetických sítí a zajištění potřeby tepla pro různá odvětví průmyslu a domácností. V tomto kontextu nabízí využití tepla z SMR perspektivní možnosti řešení. SMR představují moderní technologii a nový přístup k jaderné energetice, charakterizovaný důrazem na modularitu a bezpečnost. Jejich schopnost generovat teplou vodu nebo páru při výrobě elektřiny otevírá cestu efektivního využití procesního tepla pro další energetické aplikace.

V současné době je většina diskusí o energetické transformaci zaměřena na obnovitelné zdroje energie. Přesto však nelze opomenout fakt, že tyto zdroje nemohou plně nahradit teplo získávané z uhelných elektráren, zejména v oblastech s vybudovaným centrálním systémem vytápění. Model využití procesního tepla v kombinaci s SMR může tedy poskytnout zásadní příspěvek k diverzifikaci energetického mixu a zajištění udržitelného a spolehlivého zdroje tepla pro různé sektory.

Cílem této diplomové práce je podrobně zkoumat historii využívání tepla vytvářeného jadernými reaktory, přehled současných aplikací procesního tepla ze současných jaderných reaktorů. Dále je zde uveden detailní přehled současných projektů SMR, ve kterém je kladen důraz na jejich tepelné vlastnosti. V rámci praktické části této diplomové práce je vytvářen model využití procesního tepla.

# 1. HISTORICKÝ PŘEHLED VYUŽITÍ TEPLA Z JADERNÝCH ELEKTRÁREN

Historie využívání tepelné energie z jaderných elektráren reflektuje nejen technologický vývoj, ale také stále se vyvíjející potřeby energetického průmyslu. Tato část diplomové práce se zaměřuje na systematický přehled historických i současných snah o efektivní využití procesního, odběrového či odpadního tepla z jaderných elektráren pro širší spektrum aplikací.

Celkově lze prohlásit, že historicky bylo teplo z jaderných elektráren vnímáno jako vedlejší produkt a jeho potenciál zůstával částečně nevyužit. Existují a existovaly však projekty, které se o tuto implementaci snažily.

## 1.1 První historické využití tepla z jaderného reaktoru

První zaznamenané využití tepla, generovaného jaderným reaktorem, se datuje do roku 1951. Na konci tohoto roku byl v budově National Reactor Testing Station (NRTS) v Idaho spuštěn experimentální množivý reaktor EBR-I (Experimental Breeder Reactor-I), navržený postavený a provozovaný firmou Argonne National Laboratory. Jedná se tak o první odklon od používání štěpných reakcí i pro jiné účely než zbrojní výzkum. Primární využití ERB-I bylo vyvinutí a testování konceptu množivých reaktorů pro maximalizaci užitečné energie získané z přírodního uranu.

ERB-I z počátku napájel pouze 4 žárovky. Později však byl jeho výkon zvýšen na 100 kW<sub>el</sub> a vyráběl tak elektrinu potřebnou pro napájení celé budovy, v níž byl umístěn. K tomuto účelu byl využíván až do jeho vyřazení v roce 1964. V roce 1962 se stal také prvním reaktorem, který vyráběl elektrinu z plutoniové aktivní zóny. [1]

Díky testům prováděných na tomto reaktoru bylo nashromážděno značné množství informací o funkčnosti chladících soustav, které jako chladivo využívají tekutý kov. V tomto případě tedy o chlazení za pomoci slitiny sodíku a draslíku (NaK) a to za stálého vystavení radioaktivnímu prostředí a při teplotách v rozmezí mezi 250 °C a 350 °C, což bylo považováno za velmi vysoké teploty. To významně přispělo ke znalostem o extrakci tepla z reaktoru. Toto teplo bylo skrze chladící materiál předáno ve výměníku páře, která byla následně využita pro výrobu elektrické energie. [2]

## 1.2 Vojenské využití jaderného tepla

Vojenské využití jaderných reaktorů představuje jedno z nejkontroverznějších, avšak klíčových aspektů jaderného výzkumu a vývoje. Ačkoliv počáteční vývoj jaderných technologií byl motivován potřebou výroby zbraní, jako například v projekt Manhattan během druhé světové války, pozdější aplikace se rozšířily do mnoha dalších oblastí vojenského výzkumu a využití. Jaderné reaktory nabízejí vojenským silám jedinečné

výhody, jako jsou dlouhodobá nezávislost na tradičních zdrojích paliva a schopnost operovat v extrémních podmínkách, což je zásadní pro strategické operace.

### **1.2.1 Jaderné teplo v letectví**

Zájem Spojených států o vývoj letadel s jaderným pohonem začal po druhé světové válce, v roce 1946, s programem NEPA (Nuclear Energy for the Propulsion of Aircraft). Skutečný vývoj však započal až v roce 1951, kdy byl program NEPA nahrazen novějším programem ANP (Aircraft Nuclear Propulsion), který v roce 1952 zahájil program s názvem X-6, jehož cílem bylo testování a vývoj letadel na jaderný pohon.

Pro tyto testy byly vybrány dva bombardéry Convair B-36 „Peacemaker“, označené jako NB-36H. Z těchto dvou letounů se do vzduchu dostal pouze jeden. Tento letoun byl vybaven malým vzduchem chlazeným reaktorem umístěným v zadní pumovnici. Pro zajištění bezpečnosti posádky bylo provedeno velké množství úprav, zahrnujících odstínění pilotů od radiace vydávané reaktorem. [3]

Proudové motory měly být nastartovány pomocí směsi horkých plynů produkovaných pomocí chemické reakce mezi leteckým palivem a vzduchem. Jakmile by motory dosáhly nominálních otáček, bylo by dosaženo dostatečného proudění vzduchu pro uvedení reaktoru do provozu. Teplo vzniklé v reaktoru by bylo prouděním vzduchu odváděno do motorů, kde by nahradilo spalované letecké palivo. [4]

Speciálně upravený bombardér uskutečnil celkem 47 zkušebních letů, během kterých nalétal 215 hodin, které probíhaly až do roku 1957. V žádném z těchto letů však nesloužil použitý jaderný reaktor pro pohon letadla. Program X-6 a vývoj letadla NB-36H na jaderný pohon byl ukončen v roce 1961. Důvody pro zastavení projektu zahrnovaly vysoké investiční náklady a pomalý pokrok ve vývoji. [5]

Na stejném principu měl fungovat také sovětský letoun Tu-95LAL Tupolev, vyvíjený Sovětským Svazem. Tento letoun provedl více než 40 testovacích letů mezi roky 1961 a 1965, a stejně jako jeho americký protějšek, nebyl jeho reaktor VVRL-100 nikdy použit pro pohon letadla. Hlavním cílem letů byl především výzkum efektivity stínění posádky a klíčových komponent letadla před radiací. Tento projekt byl však nakonec vzhledem k vysokým nákladům zrušen. [6]

### **1.2.2 Jaderné teplo pro pohon ponorek**

První jaderná ponorka na světě, SSN-571 Nautilus, byla uvedena do provozu 30. září 1954. Poháněna byla jaderným reaktorem typu PWR (Pressurized water reactor) od společnosti Westinghouse S2W, s výkonem 10 MW, ve kterém byl jako palivo využíván obohacený uran. Díky svému jadernému pohonu mohla být Nautilus ponořena po téměř neomezenou dobu, což znamenalo zásadní rozdíl ve srovnání s tradičními diesel-elektrickými ponorkami. Ponorka měřila 97 metrů a byla schopna dosáhnout rychlosti až 20 uzlů. Její schopnosti ji umožnily provádět rozsáhlé a dlouhodobé mise pod vodní hladinou. [7]

Teplo je v ponorkách odváděno z reaktoru do parogenerátoru, kde je využito pro produkci páry. Ta je odváděna na soustavu turbín pohánějících lodní šroub. Často využívanou metodou je však to, že je teplo z jaderného reaktoru využíváno pro tvorbu elektrické energie. Tou jsou nabíjeny elektrické baterie, které pak mohou sloužit nejen pro potřeby posádky, ale také jako zdroj energie pro elektromotor pohánějící lodní šroub. [8] [9]

### **1.3 Teplo z jaderných reaktorů pro výrobu elektřiny**

Jak již bylo zmíněno, první historickou aplikací tepla z jaderných reaktorů byla právě výroba elektrické energie. Toto využití energie jádra představovalo zásadní technologický posun ve výrobě elektřiny a krok k diverzifikaci zdrojů energie. V jaderných elektrárnách je energie, získaná štěpením atomových jader, převáděna na teplo sloužící k výrobě páry. Takto získaná pára následně roztáčí turbíny, čímž se získává kinetická energie, která je následně v generátoru přeměněna na energii elektrickou.

Tento proces je vysoce efektivní a nabízí stabilní zdroj energie s minimálními dopady na životní prostředí. První jaderné elektrárny byly stavěny těsně po přelomu poloviny 20. století. Nejvýznamnější z nich jsou zde pak představeny.

#### **1.3.1 Jaderná elektrárna Obninsk**

První jaderná elektrárna připojená k síti, známá jako elektrárna Obninsk, představovala milník v historii využití jaderné energie. Toto zařízení, nacházející se na území dnešní Ruské federace, zahájilo svůj provoz v roce 1954. Zdrojem jaderného tepla zde byl grafitový reaktor s tepelným výkonem  $30 \text{ MW}_{\text{tep}}$  a elektrický výkon  $5 \text{ MW}_{\text{el}}$ , což z něj činilo relativně malé zařízení v porovnání s pozdějšími jadernými elektrárnami.

Jako chladivo zde byla použita voda, stejně jako u většiny později postavených jaderných reaktorů. Primárním účelem elektrárny byl však výzkum a vývoj jaderných technologií. Jelikož nebylo toto zařízení vybudováno primárně za účelem výroby elektrické energie pro komerční využití, není všeobecně považováno za první postavenou jadernou elektrárnu. Provoz reaktoru byl ukončen 29. dubna 2002, po téměř půlstoletí služby. [10]

#### **1.3.2 Jaderná elektrárna Calder Hall**

Dalším z významných milníků v tomto energetickém odvětví byla jaderná elektrárna Calder Hall, která zahájila svůj provoz v roce 1956 ve Spojeném království, která je již považována za první plnohodnotnou jadernou elektrárnu na světě. Vedle své významné historické role, hrála elektrárna zásadní úlohu i v širším kontextu energetického a vojenského využití.

Calder Hall byla vybavena čtyřmi reaktory typu Magnox, které dohromady vyráběly  $180 \text{ MW}_{\text{tep}}$  tepelné energie. Tato elektrárna byla unikátní ve svém duálním využití. Krom produkce elektrické energie, zároveň poskytovala teplo do závodů na přepracování

jaderného paliva, který se nacházel v blízkém sousedství elektrárny. To bylo klíčové pro výrobu plutonia používaného v jaderných zbraních. Po ukončení produkce plutonia pro vojenské účely pak sloužil tento závod pro výrobu přepracovaného jaderného paliva pro jiné jaderné elektrárny. Toto využití mělo značný vliv na dlouhodobý provoz a celkovou životnost elektrárny, která tak byla uzavřena až po téměř padesáti letech, v roce 2003. [11]

### **1.3.3 První komerční jaderná elektrárna**

Jaderná elektrárna Shippingport je historicky první jadernou elektrárnou postavenou soukromým subjektem společností. Tím byla společnost Duquesne Light Company, která zahájila výstavbu elektrárny v roce 1954, přičemž reaktor poprvé dosáhl kritičnosti 2. prosince 1957. O šestnáct dní později, 18. prosince 1957, byla elektrická energie vyrobená pomocí tohoto reaktoru poprvé dodána do veřejné sítě. Shippingport byla navržena a vybudována čistě pro mírové využití. Tím se odlišuje od dříve postavených jaderných zařízení, které sloužily vedle výroby elektrické energie i pro vojenské účely. [12]

Jaderná elektrárna Shippingport byla vybavena tlakovodním PWR, což byl a dodnes je, nejpoužívanější typ jaderného reaktoru. V rámci svého palivového cyklu využívala zpočátku elektrárna vysoce obohacený uran s 93 % koncentrací uranu 235, který se za běžných okolností využívá pouze k vojenským účelům. Později však začala elektrárna využívat palivo s nižším obohacením. V roce 1974 byla elektrárna odstavena od sítě, aby se na místo dvou původních PWR reaktorů mohl instalovat lehkovodní množivý reaktor (Light Water Breeder Reactor, LWBR). [13]

Zajímavostí je, že reaktor použitý v jaderné elektrárně Shippingport byl zkonstruován na základě původního návrhu lehkovodního reaktoru určeného pro pohon námořních plavidel. Lze tak pozorovat první aplikace původně vojenských jaderných technologií v komerčním energetickém sektoru. [12]

## **1.4 První průmyslové využití jaderného tepla**

V roce 1956 byla v Norsku uvedena do provozu jaderná elektrárna Halden, která se stala průkopníkem v průmyslovém využití jaderného tepla. Tato elektrárna, využívající v rámci svého reaktoru těžkou vodu jak pro moderaci, tak pro chlazení, disponovala tepelným výkonem 25 MW<sub>tep</sub> s pracovní teplotou 240 °C a tlakem 34 barů (3,4 MPa). Halden poskytovala vyrobené teplo místní továrně na výrobu papíru od roku 1966, což demonstrovalo praktické využití jaderné energie v průmyslu mimo tradiční výrobu elektrické energie. [14] [15]

Kromě své role v průmyslovém využití tepla elektrárna Halden sloužila také jako centrum pro výzkum v oblasti jaderné bezpečnosti. Zde prováděné studie a testy pokrývaly širokou škálu témat, včetně testování materiálů, vývoje technologií a zkoumání

aspektů jaderné bezpečnosti. Elektrárna je v současné době zavřená, bez plánu obnovy jejího znovuspuštění. [16]

## 1.5 První využití jaderného tepla pro výrobu těžké vody

Jaderná elektrárna Douglas Point, v Kanadě, dosáhla kritického bodu v roce 1966 a byla oficiálně uvedena do provozu 26. září 1968, jako projekt společnosti Atomic Energy of Canada Limited, která elektrárnu postavila a vlastnila. Provoz elektrárny však obstarávala společnost Ontario Hydro. V Douglas Point byly použity reaktory typu CANDU (Canada Deuterium Uranium). Ty jsou charakteristické tím, že jako chladivo i moderátor používají těžkou vodu a zároveň mohou jako palivo využívat přírodní uran.

Teplu produkované těmito reaktory bylo, kromě výroby elektrické energie, používané také při výrobě těžké vody  $D_2O$ , a to skrze Girdlerův proces. Takto získaná těžká voda pak byla opětovně použita v jaderných reaktorech CANDU pro moderaci a chlazení. [17]

## 1.6 Zemědělství a akvakultura

Následující kapitola vychází z informací obsažených ve zdroji [18]. V roce 1969 Oak Ridge National Laboratory (ORNL) zahájilo výzkumný projekt zaměřený na využití odpadního tepla z jaderné elektrárny Vermont Yankee. Tento projekt byl motivován rostoucími obavami z tepelného znečištění, což je problém spojený s výrobou energie, zejména v jaderných elektrárnách, které produkují výrazně větší množství tepla než tradiční uhelné elektrárny. Toto teplo pak jí však není dále efektivně využito, což poskytlo tomuto projektu příležitost prozkoumat jeho možnou využitelnost.

Vzhledem k tomu, že odpadní teplo z elektrárny Vermont Yankee mělo teplotu  $49\text{ }^{\circ}\text{C}$  a méně, v závislosti na aktuálním ročním období a počasí, jevílo se jako nejperspektivnější prozkoumat možnost jejího využití v oblastech zemědělství a akvakultury. Výzkum se tak zaměřil na hodnocení toho, jak může být odpadní teplo z výroby  $175\text{ MW}_{el}$  efektivně využito na užitečné aplikace s potenciálně významnými ekonomickými a environmentálními přínosy.

### 1.6.1 Zemědělství

V rámci zemědělského využití odpadního tepla z elektrárny Vermont Yankee se výzkum zaměřil na aplikace jako je ohřev skleníků a půdy, nebo vyhřívání přístřešků pro zvířata. Design skleníků navrhla Laboratoř pro výzkum životního prostředí Arizonské univerzity, která implementovala technologie využívající odpadní teplo pro plynovou difuzi.

ORNL provedla analýzu ekonomické proveditelnosti těchto aplikací. V rámci výsledků těchto analýz bylo zjištěno, že skleník o rozloze 2,5 hektaru umístěný ve vzdálenosti 305 metrů od elektrárny, je při využití odpadního tepla výhodnější volbou v porovnání s fosilními palivy. Náklady na tento výhřev se pohybovaly mezi  $\$1,66$

a \$2,37 za GJ. Tento závěr poukazuje na potenciál snížení nákladů na energii pro zemědělské aplikace.

Výsledky analýz také naznačují, že využitelnost odpadního tepla může být silně závislé na lokalitě jaderné elektrárny a přilehlých odběratelů. Konkrétně, pokud teplota výstupní vody z kondenzátoru klesla na 21 °C, ekonomická výhodnost systému je srovnatelná s použitím fosilních paliv. To může ovšem záviset od ceny fosilních paliv v dané lokalitě. Při teplotách pod 21 °C pak již není systém odpadního tepla ekonomicky proveditelný. Naopak při teplotě odpadní vody nad 27 °C je systém výhodný pro všechny klimatické podmínky v rámci USA. Pro teploty mezi 21 a 27 °C je proveditelnost závislá na konkrétních klimatických podmínkách.

Pro výpočet ekonomické proveditelnosti byla použita metoda návratnosti kapitálu s předpokladem 8 % návratnosti po dobu 20 let a s cenou energie v centech za kWh. Z výsledků vyplývá, že proveditelnost využití odpadního tepla pro vytápění skleníků závisí především na dostupné teplotě chladící vody z kondenzátoru.

### **1.6.2 Akvakultura**

Kromě aplikací v zemědělství bylo odpadní teplo z jaderné elektrárny Vermont Yankee také zkoumáno pro možnosti využití v akvakultuře. Takovéto využití tepla zahrnovalo široké spektrum technik od extenzivních (přirozených) rybníčních metod po intenzivní závodní systémy (chov ryb v betonových nádržích). Jedním z klíčových aspektů těchto technik byla koncepce polykultury, která umožňovala současné pěstování více druhů, včetně humrů, krevet, pstruhů, lososů a sumců.

Jednou z hlavních výhod využití odpadního tepla v akvakultuře bylo snížení provozních nákladů, zejména v oblasti krmiv. Odpadní teplo bylo využito pro extenzivní kultivační techniky, podporující přirozené zásoby potravy v ekosystému rybníků, což snižuje náklady na krmivo o 30 až 40 %. Toto teplo, ve spojení s živinami z odpadních toků, bylo také využito pro pěstování planktonu, korýšů a měkkýšů, souhrnně označovaných jako planktonní biomasa.

Pro extenzivní rybníční akvakulturu, která využívá přirozených potravních řetězců, byla kontrola teploty vody prostřednictvím odpadního tepla klíčová pro maximalizaci produkce. Naproti tomu intenzivní závodní akvakultura, prováděná v betonových nádržích, spoléhala na obohacená krmiva a systémy okysličování, opět s využitím tepla pro maximalizaci výnosu.

Je důležité poznamenat, že realizovatelnost těchto projektů bude významně záviset na určitých finančních podmínkách, jako jsou ceny produktů, které mohou ovlivnit ekonomickou výhodnost využívání odpadního tepla pro tyto účely.

### **1.6.3 Závěry zkoumání využití odpadního tepla pro zemědělství a akvakulturu**

Zhodnocení využití odpadního tepla z jaderné elektrárny Vermont Yankee odhaluje, že úspěšnost takových projektů značně závisí na specifické lokalitě elektrárny. Klíčovým

poznatkem je, že pro efektivní využití odpadního tepla je nutné integrovat v rámci jednoho objektu několik technologií. Tabulka 1-1 pak ukazuje hodnocení využitelnosti odpadního tepla pro využití v různých aplikacích v porovnání mezi sebou.

Tabulka 1-1 Využitelnost odpadního tepla [18]

Hodnocení	Systém
1	Extenzivní rybníční akvakultura
2	Přístřešky pro zvířata
3	Rybníky s řasami
4	Intenzivní závodní akvakultura
5	Vytápění půdy
6	Vytápění skleníků

Při porovnání s fosilními palivy je potenciál využití odpadního tepla z jaderných elektráren podobný. Významnou překážkou však nejsou technologické omezení, nýbrž marketingové a ekonomické faktory. Trh a ekonomická situace hrají významnou roli v rozhodování o implementaci systémů využívajících odpadní teplo.

Specifické klimatické podmínky v okolí Vermont Yankee rovněž představují významnou výzvu. V chladném prostředí, zejména během zimních měsíců, se stává využití odpadního tepla obtížnějším. To znamená, že i když technologie existují a jsou schopné efektivně využívat odpadní teplo, vnější prostředí a podmínky mohou ovlivnit jejich praktickou proveditelnost.

## 1.7 Odsolování

Od roku 1973 se v Kazachstánu, tehdy součásti Sovětského svazu, začalo s využíváním jaderného tepla pro proces odsolování. Toto využití bylo spojeno s provozem reaktoru typu BN-350, což je rychlý reaktor chlazený kapalným kovem. Elektrárna Aktau, ve které byl reaktor umístěn, sloužila nejen jako hlavní výrobní elektrické energie v oblasti, ale také dokázala využít mořskou vodu a za pomoci tepla, které vytvářela, z ní získat vodu pitnou. K roku 1998 dosahovala kapacita odsolování hodnoty 80 000 kubických metrů denně, čímž se elektrárna stala klíčovým zařízením pro celou oblast. [19]

Tepelný výkon reaktoru BN-350 byl  $520 \text{ MW}_{\text{tep}}$ , přičemž elektrický výkon elektrárny byl  $125 \text{ MW}_{\text{el}}$ . Teplota sodíku při vstupu do parogenerátoru dosahovala  $437 \text{ }^\circ\text{C}$ , přičemž při výstupu měl sodík teplotu již pouze  $288 \text{ }^\circ\text{C}$ . Hlavní pára byla generována při tlaku  $4,5 \text{ MPa}$  a teplotě  $405 \text{ }^\circ\text{C}$ . Část tepla ze třetího okruhu byla speciálně vyhrazena pro proces odsolování.

Odsolování bylo prováděno pomocí metod, Multi-Stage-Distillation (MED) a Multi-Stage-Flash (MSF) v devíti odsolovačích s kapacitami  $5 \times 15\,000 \text{ t/d}$ ,  $3 \times 14\,400 \text{ t/d}$  a  $1 \times 12\,000 \text{ t/d}$ . Proces odsolování v těchto případech využívalo technologií

vícetupňových trubkových odpařovačů k odstranění soli z mořské vody. Díky vysoké efektivitě se této technologii následně začalo využívat jako předlohy pro návrhy budoucích systémů odsolování s použitím jaderného tepla. Část takto získané pitné vody byla využívána také pro vytápění, což zvyšovalo celkovou užitnou hodnotu projektu.

Bezpečnost a kvalita vody byly prokázány během více než dvaceti let provozu, přičemž odsolená voda splňovala požadavky WHO a její radioaktivita byla na úrovni přirozeného pozadí. Dlouhodobé zkoumání potvrdilo bezpečnost vody i pro pitné účely. I přes tato faktická zjištění jsou stále přijímána další opatření pro snižování koncentrace tricia při přípravě pitné vody.

V případě odstávky reaktoru, nebo když pára z jaderné elektrárny nebyla vhodná k odsolování, byly jako záložní zdroj tepla používány kotle na fosilní paliva. Tato redundantní opatření zajistila kontinuitu dodávek čisté vody i v náročných provozních podmínkách. [20]

## 1.8 Jaderná elektrárna Bruce

Jaderná elektrárna Bruce, nacházející se v Kanadském Ontariu, byla uvedena do provozu v roce 1977. Toto zařízení bylo postaveno a provozováno společností Ontario Hydro ve stejné lokalitě jako dříve zmiňovaná elektrárna Douglas Point.

Podstatnou vlastností elektrárny je schopnost kogenerace tepla a procesní páry. S využitím reaktorů typu CANDU PHWRs (Pressurized Heavy Water Reactors) produkuje elektrárna  $6 \text{ TW}_{\text{el}}$  elektrické energie, ale také poskytuje procesní páru a teplo pro další využití společností Ontario Hydro a sousedícím průmyslovým energetickým parkem.

Část elektrárny označovaná jako jaderná stanice Bruce-A se skládá ze čtyř jednotek. Každá z těchto jednotek má jmenovitý elektrický výkon  $825 \text{ MW}_{\text{el}}$ . Společně dodávají páru do parní transformační stanice, která produkuje  $720 \text{ MW}_{\text{tep}}$  procesního tepla a páry. Ta je většinou využívána pro produkci těžké vody, přičemž  $70 \text{ MW}_{\text{tep}}$  je věnováno pro potřeby Bruce Energy Centre (BEC) a  $3 \text{ MW}_{\text{tep}}$  pro vedlejší služby. Výrobní cyklus Bruce-A je typický svou paralelní kogenerací, kde z parogenerátoru vedou dva výstupy páry. Kdy jaderné teplo z reaktoru je skrze primární smyčku předáváno na parogenerátor. Pára je odváděna ze sekundární strany paralelně přívodem páry na turbínu a do parní transformační stanice. Odebíraná pára odvedená do transformační stanice již není následně využívána pro výrobu elektřiny. [21]

Tvůrcem systémů pro využití procesního tepla generovaného v elektrárně Bruce je společnost Bruce Nuclear Power Development. Tyto systémy byly zásadní pro dodávku páry pro produkci těžké vody v Bruce Energy Technology Park, což je klíčová součást celkového komplexu elektrárny. Průmyslový park Bruce rovněž zahrnuje soukromá průmyslová odvětví, která využívají páru pro své operace a produkční procesy.

Celý komplex elektrárny Bruce se skládá z osmi reaktorů, největší výrobní těžké vody na světě a Bruce Bulk Steam System (BBSS). Ten má kapacitu výroby  $5\,350 \text{ MW}_{\text{tep}}$

středotlaké procesní páry, což představuje významnou část energetického mixu regionu. Náklady na páru z tohoto systému jsou výrazně nižší než náklady na páru vyrobenou ze zemního plynu nebo fosilních paliv, což dělá BBSS konkurenceschopným zdrojem tepla. V roce 1995 dochází k odstavení bloku 2 Bruce-A. Hlavními důvody pro toto rozhodnutí byla nízká poptávka po výrobě těžké vody a technické problémy spojené s provozem bloku Bruce-A. [22]

BBSS je schopno výroby s kapacitou až 5 350 MW<sub>tep</sub> středotlaké procesní páry a celkový elektrický výklon elektrárny dosahuje 7 200 MW<sub>el</sub>. Čtyři jaderné reaktory v rámci Bruce-A, každý s celkovým tepelným výkonem 2 400 MW<sub>tep</sub>, dodávají vysokotlakou páru do šesti výměníků tepla, tedy 24 výměníků celkově. Výměníky následně produkuje středotlakou páru pro výrobu těžké vody a další jiné služby nacházející se v rámci celého komplexu. Celková kapacita výroby páry může být až 1 680 kg/s středotlaké páry z reaktorů. Dodatečných 315 kg/s jsou pak schopny dodat záložní naftové kotle.

Pro zajištění nejvyšší možné spolehlivosti je parní systém navržen tak, aby při přerušení dokázal zajistit maximální dodávku páry, s časovým oknem několika minut v zimě a až čtyři hodiny v létě. Jeden z olejových kotlů je vždy udržován v horké pohotovosti a kondenzátové pumpy jsou napájeny nepřetržitým zdrojem energie, zálohovaným generátory na plynové turbíny. Za 17 let provozu nedošlo v HWP k ztrátě nouzové páry.

BEC je průmyslový park zásobovaný parou z jaderné elektrárny Bruce, který se stal domovem pro šest průmyslových odvětví. Toto unikátní využití nukleárního tepla zvyšuje hodnotu místních obnovitelných surovin, především zemědělských plodin, a podporuje udržitelný rozvoj regionu. V BEC se soustředí především potravinářské a speciálně chemické průmyslové odvětví, kde teplo z jaderné elektrárny umožňuje efektivní provedení procesů jako fermentace, destilace, odpařování a dehydratace. Tato aplikace tepla přináší významné výhody, jako jsou dlouhodobě nízké náklady, nulové emise a velká energetická rezerva.

Mezi podniky v BEC patří společnost BI-AX International Inc., zabývající se výrobou plastových fólií, kde teplo hraje klíčovou roli v procesu zpracování plastu. Bruce Tropical Produce Inc. provozuje skleník o rozloze 700 m<sup>2</sup> pro pěstování rajčat, využívající teplo pro řízení klimatu a hydroponické pěstování. Commercial Alcohols vyrábí ethanol s roční kapacitou 16 milionů litrů a generuje vedlejší produkt v podobě 36 000 tun lihovarského zrna. Bruce Agra Dehy Inc. se specializuje na dehydrataci, kostkování a peletování rostliny Tolice Vojtěška, přičemž teplo je klíčové pro proces dehydratace. Bruce Agra Foods Inc. je zase zaměřen na koncentraci jablečné šťávy, využívající teplo pro odpařovací, sušící a dehydratační zařízení. Nakonec, St. Lawrence Technologies provádí širokou škálu zemědělského výzkumu, využívajícího teplo pro různé účely.

V BEC se přirozeně uplatňuje koncept efektivního využívání tepla, což však naráží na omezení z hlediska nákladů na potrubí, které limitují vzdálenosti dodávky tepla. Tento faktor je zvláště významný pro nové podniky, které plánují svou činnost v blízkosti jaderné elektrárny, aby využily její tepelné zdroje. [20]

## 1.9 Rafinace soli

Průkopníkem ve využívání tepla pro rafinaci soli je jaderná elektrárna Stade v Německu, která byla poprvé spuštěna v roce 1972. Jakožto významný energetický zdroj v oblasti disponovala elektrickým výkonem až  $640 \text{ MW}_{\text{el}}$  a její celkový tepelný výkon dosahoval až  $1\,892 \text{ MW}_{\text{tep}}$ . Ten dodávala elektrárna od roku 1983 do nedaleké rafinerie soli. Tato rafinerie soli, umístěná 1,5 km od jaderné elektrárny, byla schopna využít tepelný výkon až do hodnoty  $30 \text{ MW}_{\text{tep}}$ , což představuje 1,6 % z celkového tepelného výkonu elektrárny. Tepelná spotřeba rafinerie byla 45 tun páry za hodinu při teplotě  $190 \text{ }^\circ\text{C}$  a tlaku  $1,05 \text{ MPa}$ . [22]

Elektrárna ukončila svůj komerční provoz v roce 2003. Po ukončení komerčního provozu byla elektrárna v nekomerčním provozu až do října 2005. V tomto roce byla oficiálně vyřazena z provozu. [23]

## 1.10 Jaderná elektrárna Gösgen

Jaderná elektrárna Gosgen, situovaná ve Švýcarsku, byla zprovozněna v roce 1979 a od téhož roku začala dodávat teplo do místní továrny na výrobu lepenky. Kromě výroby elektrické energie s nominálním výkonem  $970 \text{ MW}_{\text{el}}$ , elektrárna Gosgen efektivně využívá páru z terciálního okruhu (s parametry  $1,37 \text{ MPa}$  a  $220 \text{ }^\circ\text{C}$ ) pro průmyslové aplikace.

Továrna na výrobu lepenky umístěná ve vzdálenosti 1 750 metrů od elektrárny využívá páru z Gosgenu pro své výrobní procesy. Jaderné elektrárna tedy napomáhá ve výrobě lepenky tím, že dodává  $54 \text{ MW}_{\text{tep}}$  tepla, což představuje přibližně 2 % z jejího celkového tepelného výkonu. Díky tomuto systému je továrna ušetří až 15 000 tun topného oleje ročně, což představuje významné snížení nákladů a emisí spojených s výrobou. [20] [22]

## 1.11 INET

Institute of Nuclear Energy Technology (INET), jakožto součást Tsinghua University v Pekingu, byl založen v roce 1989. Slouží jako centrum pro výzkum a vývoj v oblasti jaderné energetiky v Číně. INET je vybaven tlakovodním PWR, s tepelným výkonem  $5 \text{ MW}_{\text{tep}}$ . Tento reaktor je navržen pro dodávku tepla do samotného centra INET, ačkoliv

konkrétní využití tepla není specifikováno, je pravděpodobné, že je využíváno pro výzkumné účely nebo vytápění.

Charakteristickým rysem tohoto PWR je nižší tlak v primárním okruhu, pouhých 1,5 MPa, což je desetkrát méně, než je obvyklé u běžných PWR. Teploty v primárním okruhu se pohybují mezi 186 °C a 146 °C. V mezismyčce se teploty pohybují v rozmezí 110 až 160 °C při tlaku 1,7 MPa. Pro teplenou síť je pak charakteristická teplota 90 °C na vstupu a 60 °C na výstupu. [21]

## 1.12 HTTR

Vysokoteplotní testovací HTTR (High Temperature Engineering Test Reactor) v Japonsku, chlazený plynem, dosáhl kritičnosti v roce 1998. Vzhledem k tomu, že je reaktor určen primárně k testovacím a laboratorním účelům, je jeho tepelný výkon oproti reaktorům používaným v jaderných elektrárnách relativně malý, pouhých 30 MW<sub>tep</sub>. V rámci dlouhodobého výzkumu prováděného na tomto reaktoru bylo dosaženo několika významných prvenství, souvisejících s procesním teplem. V roce 2004 se HTTR stal prvním reaktorem na světě, který dosáhl teploty chladiva na výstupu 950 °C. A v roce 2010 byl provozován po dobu 50 dní s vysokou teplotou a plným výkonem. [24]

HTTR slouží k provádění studií a vývoji prvků technologií pro průmyslové využití jaderného tepla z vysokoteplotního plynem chlazeného reaktoru. Jedním z významných projektů je studie na kogeneraci plynové turbíny, která se zaměřuje na světově první demonstraci jaderné vodíkové kogenerace s výrobou elektřiny. Tento projekt kombinuje výrobu vodíku a elektrické energie, což představuje inovativní krok v oblasti energetiky. [25]

Návrh realizace systému na zmiňovanou kogeneraci probíhá od roku 2015. V rámci tohoto projektu by systém měl být schopen výroby 1 MW<sub>el</sub> za současné produkce vodíku (H<sub>2</sub>) v množství 30 Nm<sup>3</sup>/h. [26]

## 1.13 HTR-10

Testovací modulární reaktor HTR-10 v Pekingu představuje klíčový krok ve vývoji vysoce teplotních plynem chlazených reaktorů (HTGR). Reaktor poprvé dosáhl kritičnosti v prosinci 2000 a je plánován k provozu ve dvou fázích. V první fázi je cílem využít výstupní teplo z reaktoru o teplotě 700 °C pro kogenerační účely. Toto teplo by tak mohlo být využito nejen pro výrobu elektrické energie, ale také pro centrální vytápění, případně průmyslové aplikace. Ve druhé fázi projektu je plánováno zvýšení teploty chladiva až na 900 °C. Tato fáze je určena pro experimentální studie zaměřující se na vysokoteplotní aplikace, jakými může být například zplyňování uhlí.

HTR-10 se vyznačuje moderní modulární konstrukcí a bezpečnostními prvky, které umožňují umístění reaktoru blíže obydleným oblastem s menším rizikem. Tyto

charakteristiky činí HTR-10 nejen bezpečnějším, ale i flexibilnějším z hlediska možností využití, včetně potenciálu pro centrální vytápění a další lokální energetické aplikace. [27]

## 1.14 HTR-PM

HTR-PM je čínský SMR navazující na technologii reaktoru HTR-10. Jedná se o vysokoteplotní reaktor IV generace chlazený plynem s grafitem sloužícím jako moderátor. Elektrárna v zátocě Shidao v čínské provincii Shandong, ve které je tento reaktor nyní instalován, je první elektrárnou využívající vysokoteplotní plynem chlazený SMR jakožto zdroj tepla. Konstrukce této elektrárny započala už v roce 2012 a k síti pak byla úspěšně připojena v prosinci 2021.

HTR-PM je reaktor s oblázkovým ložem, obsahujícím více než 400 tisíc sférických palivových pelet, nazývaných také jako oblázky. Každá z těchto pelet má průměr 60 mm a obsahuje 7 gramů uranu obohaceného na 8,5 %. Díky svému grafitovému obalu zůstávají tyto palivové pelety neporučené až do teploty 1620 °C. To by mělo zajistit dostatečnou bezpečnost i v případě vážné havárie.

V areálu elektrárny jsou umístěny dva reaktory HTR-PM, každý s tepelným výkonem 250 MWtep. Tyto reaktory se pak starají o pohon společné turbíny. Hlavním účelem, za kterým byly tyto reaktory vyvíjeny je kogenerace elektřiny a procesního tepla až o teplotě 500 °C. Díky tomu mohou tyto reaktory sloužit jako alternativa spalování plynu nebo uhlí v petrochemickém průmyslu. [28]

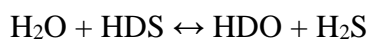
## 2. PŘEHLED MOŽNÉHO VYUŽITÍ TEPLA Z JADERNÝCH ELEKTRÁREN

Jaderné elektrárny zpravidla vedle velkého množství elektrické energie produkují i ohromné množství tepla. To však zůstává ve velkém množství případů nevyužito, a to i přes širokou škálu jeho možných využití od tradičního vytápění budov a využití v průmyslových procesech, přes výrobu čistého vodíku, až po aplikace v odlehlých oblastech, kde může být využito pro získávání pitné vody z vody mořské, skrze proces odsolování.

Všechny tyto aplikace efektivně zvyšují energetickou efektivitu jaderných elektráren a mohou přispívat i ke snižování emisí skleníkových plynů a celkové udržitelnosti, čímž se stávají perspektivnějšími zdroji energie i pro budoucnost. V rámci této kapitoly jsou proto představeny potenciální i v současnosti využívané aplikace procesního tepla z jaderných reaktorů.

### 2.1 Výroba těžké vody

V současné době existuje několik způsobů, jak lze získat těžkou vodu. Jednou z těchto možností je skrze klasický proces elektrolyzy, kdy se uvolňuje krom běžného vodíku i malé množství deuteria. Tyto plyny se následně zkapalní a destilují, načež deuterium reaguje s kyslíkem za vzniku těžké vody. Tento proces však nevyžaduje dodatečné teplo. To je však využíváno v rámci tzv. Girdlerova procesu. Ten využívá rozdílných chemických vlastností těžké a běžné lehké vody a funguje na základě výměny deuteria mezi sirovodíkem  $H_2S$  a lehkou vodou.



Celý proces probíhá ve dvou věžích, ve kterých dochází k výměně deuteria. V rámci studené věže, v níž se teplota pohybuje zpravidla okolo  $30\text{ }^\circ\text{C}$ , se díky rovnovážným vlastnostem za této teploty obohacuje lehká voda o deuterium ze sirovodíku. Takto obohacená, nyní již těžká voda, je vyváděna ze studené věže. Část jí je odebrána a zbytek se smíchává s lehkou vodou a putuje do vysokoteplotní věže. Zde se teplota pohybuje již okolo  $130\text{ }^\circ\text{C}$  a dochází zde k opačné reakci, při které je sirovodík obohacován o deuterium z těžké vody. [29]

Aby byl Girdlerův proces ekonomicky proveditelný, je nutné využívat kaskádového zapojení věží, při kterém je vždy v dalším páru věží vyšší koncentrace deuteria než v tom předchozím. Pro dosažení požadované koncentrace těžké vody pro využití v jaderných reaktorech, tedy na hodnotu  $99,75\%$   $D_2O$ , je zapotřebí až několik set věží zapojených do série. To a potřeba chlazení a ohřevu v rámci celého procesu ho dělá energeticky vysoce náročným a spotřeba energie potřebná pro výrobu jednoho kilogramu těžké vody je  $30\text{ GJ}$ . To odpovídá zhruba 5 barelům ropy na kilogram těžké vody. [30]

Existuje i možnost využít rozdílných teplot varu běžné a těžké vody. Rozdíl v těchto teplotách je však malý a vzhledem k malé koncentraci těžké vody v přírodě by bylo potřeba převařit velké množství vody pro získání malého množství těžké vody. Proto se této možnosti v praxi nevyužívá. [29]

## 2.2 Odsolování

Odsolování především pak mořské vody je využíváno z celé řady důvodů. V mnoha oblastech není možný přístup k pitné vodě skrze přírodní zdroje a odsolování je tak jediným zdrojem této vody potřebné k běžnému životu od konzumace po zavlažování. Elektrárny také potřebují ke své správné funkci vodu s nízkým obsahem soli a různých minerálů. Slaná voda bývá k dispozici zpravidla ve velkém množství, ovšem zároveň má vysokou slanost. Běžně okolo 35 g/kg v závislosti na lokaci. Pro odsolování jsou v současnosti používány tři procesy, vícestupňová destilace (MED), vícestupňová mžiková destilace (MFS) a reverzní osmóza mořské vody. Použití těchto procesů je zpravidla závislé na faktorech, jako je kvalita surové vody a dostupnost technologického tepla. V případě, že v daném místě není přístup k technologickému teplu možný, je využívána metoda reverzní osmózy mořské vody. V opačných případech je využíváno právě metod MED a MFS. [31]

### 2.2.1 Vícestupňová destilace

Tato metoda tepelného odsolování destiluje slanou mořskou vodu skrze vaření ve vakuu. Díky sníženému tlaku v systému dochází k poklesu bodu varu vody na teplotu zhruba okolo 65 °C, čímž jsou sníženy náklady na energii. Tento způsob odsolování lze provádět dvěma způsoby, termickou kompresí par (MED-TVC) nebo mechanickou kompresí par (MED-MVC). Pokud je využit systém MED-TVC, je do výparníku instalován termokompresor, což zvyšuje jeho efektivitu tím, že využívá tlak přivedené páry pro získání nízkotlaké páry na výstupu z výparníku. To umožňuje opětovné využití latentního tepla ve výparníku. Pokud není možnost přivedení páry do procesu, je využit systém MED-MVC, který využívá mechanický kompresor. Do výparníku je tak přiváděna jako jediný zdroj vnější energie elektřina. Nicméně z důvodu velikosti a ceny kompresoru je využití této varianty značně omezeno. [32]

Jedná se o využívanou metodu odsolování přiřazenou k tepelným elektrárnám, které mohou snadno poskytovat dostatečné množství potřebného tepla. To je v prvním stupni přivedeno do trubek tepelného výměníku, které jsou skrápěny přiváděnou mořskou vodou. To způsobuje vypařování mořské vody. Odpar se pak používá ve druhém stupni procesu, kde ohřívá a odpařuje solanku, která zbyla po odpaření z prvního stupně. Odpar z druhého stupně se pak znovu využívá k ohřevu ve třetím stupni. Pára z každého stupně se tím, jak je v následujícím stupni ochlazuje a po další potřebné úpravě se může, mimo jiné, použít jako napájecí voda do kotle případně jako pitná voda. Koncentrovaná solanka s pak nejčastěji vypouští zpět do moře. Využití páry z předchozího stupně způsobuje to,

že v každém dalším stupni je teplota páni vždy nižší, čímž je na maximum využít teplotní potenciál procesního tepla. [33]

Pára přiváděná je do procesu MSF přiváděna pod tlakem 5 barů, přičemž energetická náročnost celého procesu se pohybuje okolo  $50 \text{ kW}_{\text{tep}}/\text{m}^3$  a  $2 \text{ kW}_{\text{el}}/\text{m}^3$ . Při použití tohoto způsobu odsolování je možné dosáhnout produkce sladké vody v množství až  $30\,000 \text{ m}^3/\text{d}$ . [34]

### 2.2.2 Vícestupňová mžiková destilace

Zařízení pro odsolování na principu MFS má obvykle 4 až 40 stupňů. Každý jednotlivý stupeň obsahuje tepelný výměník, kterým ohřívá mořskou vodu přiváděnou do procesu, a kondenzátový kolektor, na kterém kondenzuje pára a je odváděna opět ve formě sladké vody. Přiváděná mořská voda se do procesu přivádí skrze tepelné výměníky v jednotlivých stupních, čímž se předehřívá z důvodu zvýšení účinnosti před vstupem na hlavní tepelný výměník. V tomto tepelném výměníku se ohřívá pomocí přiváděného procesního tepla a následně vstupuje do prvního stupně destilátoru. V něm je tlak snížený tak, aby došlo k mžikovému odpaření části jejího objemu. Tím dochází k ochlazení a zvýšení koncentrace soli v solance. Tato koncentrovanější solanka je následně přiváděna do dalšího stupně, ve kterém, aby byl zajištěn opětovný mžikový odpar, je nižší tlak než v předchozím stupni. Na trubkách vedoucích napájecí vodu přes jednotlivé stupně dochází ke kondenzaci páry a napájecí voda tek odvádí latentní teplo pryč ze stupně. Kondenzovaná vodní pára je dále sbírána kolektory a odváděna pro další využití. Vnitřek stupně je udržován v neustálé rovnováze, protože s vysokým množstvím páry vytvořeném v krátkém časovém okamžiku klesá tlak v daném stupni, čímž dochází k utlumení vypařování. [35]

Komerčně dostupné jednotky MSF mají běžně kapacitu od  $4\,000$  do  $30\,000 \text{ m}^3/\text{d}$ , přičemž energetická náročnost tohoto procesu se pohybuje v rozmezí  $13,5 - 25,5 \text{ kW}_{\text{tep}}/\text{m}^3$ . Celková rychlost procesu je pak závislá na teplotě, při které proces probíhá. Je nicméně důležité dbát na celkové provozní vlastnosti zařízení, neboť příliš vysoké provozní teploty mohou vést ke tvorbě vodního kamene a nadměrné korozi, což jsou značně negativní jevy. Maximální teploty, při kterých je smysluplné systém provozovat se pohybují v rozmezí od  $110 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $120 \text{ }^\circ\text{C}$ . Pro úplné zabránění tvorby vodního kamene jsou pak vyžadovány provozní teploty pod  $70 \text{ }^\circ\text{C}$ . [35]

## 2.3 Získávání ropy z dehtového písku

Dehtové písky se vyznačují vysokou koncentrací bitumenu. Díky tomu existuje zájem ze strany některých společností pro jeho těžbu. Přesto že se však pole s dehtovým pískem vyskytují po celém světě, zůstávají z větší části nevyužitá, především z důvodu ekonomické náročnosti těžby a zušlechťování dehtových písků. Vytěžený písek musí projít drcením a energeticky náročnou separací bitumenu od zbytku materiálu. Následným zpracováním a zušlechťováním bitumenu v koksovacích jednotkách jsou

získávány suroviny jako těžká ropa, nafta nebo petrolej. Odhaduje se však, že pro získání jednoho barelu těžké ropy, získávané z tohoto procesu, je zapotřebí tolik energie, kolik by šlo získat z ½ barelu lehké ropy, což má za následek efektivní snížení celkového obsahu ropy o 1/3. Tedy pro získání jednoho barelu ropy je zapotřebí do procesu dodat energii 805,5 kWh. [36]

Pro proces separace je nutné smíchat vytěžený dehtový písek s parou a horkou vodou. To se provádí buď pomocí cyklické parní stimulace nebo častěji využívanou metodou gravitačního odvodnění pomocí páry. Princip obou těchto metod spočívá v ohřevu vytěženého dehtového písku parou o teplotě 200 až 400 °C. Tento ohřev pak ovlivňuje především bitumen, který se tak stává méně viskózní a lze ho tak snadněji oddělit od ostatních složek dehtového písku. [37]

V současné době je těžba dehtového písku v Kanadě největším průmyslovým projektem na světě. Těžba probíhající severně od Fort McMurray v provincii Alberta využívá třetí největší naleziště na světě s předpokládanou kapacitou 170 miliard barelů ropy. Vzhledem k nutnosti povrchové těžby dehtového písku je však nutný masivní zásah do krajiny. To spolu s kyselými dešti způsobenými těžbou a zpracováváním těchto písků však znamená velkou ekologickou zátěž pro okolní krajinu. To je hlavním důvodem, proč je získávání ropy z tohoto zdroje do budoucna nejisté, přesto že existují plány na rozšíření těžby na kanadském území. [38]

## 2.4 Rafinace ropy

Skrze rafinaci surové ropy lze získat celou řadu dále využitelných produktů, jako například benzín, motorová nafta, různé druhy ropných olejů nebo také různé petrochemické suroviny. Celý proces rafinace je velmi komplexní a existuje celá řada konfigurací, podle kterých lze surovou ropu rafinovat, podle toho, jaké produkty a v jakém množství jsou požadovány na výstupu.

Teplota v tomto procesu hraje zásadní roli především v prvním kroku celého procesu rafinace, kdy je surová ropa destilována na jednotlivé frakce podle jejich teploty varu. Konkrétní teploty varu pro jednotlivé složky surové ropy lze sledovat v tabulce 2-1. Děje se tak v zařízení zvaném destilační jednotka surové ropy, často také nazývaná jako atmosférická destilační jednotka. Ta se nachází ve všech ropných rafinériích. Surová ropa je nejprve předehřáta za pomoci kombinace tepla získaného z dalších kroků celého procesu zpracování ropy a tepla z jiného zdroje. Když je ropa předehřáta na požadovanou teplotu dochází k odsolování, aby byla zbavena veškerých anorganických solí. Následně dochází k dalšímu předehřátí ropy a jejímu vstupu do pece, kde dochází k navýšení její teploty na přibližně 398 °C. Poté je ropa přiváděna do spodní části destilační jednotky. Chlazení destilační jednotky je obstaráváno kombinací několika způsobů chlazení. Výměníkem tepla s přiváděnou surovou ropou, vzduchem nebo vodou chlazeným kondenzátorem a chladícím systémem pumparound, který odvádí teplo přímo z destilační věže. Jednotlivé ropné produkty jsou odebírány z destilační věže v různých výškách

v bodech nazývaných výřezy. Z každého výřezu je odebírán jiný produkt, přičemž výška, ze které je odebírán, je určena právě varným bodem daného produktu. Takto získané produkty jsou pak následně odeslány nejčastěji do meziskladových nádrží, kde čekají na další zpracování. [39]

Tabulka 2-1 Teploty varu složek ropy [40]

Složky ropy	Teplota varu
(-)	(°C)
Plyny	0-30
Nafty	30-180
Petroleje	180-260
Plynové oleje	260-350
Maziva	350-575
Topné oleje	>490
Asfalt	>580

Pro zpracování 1 tuny surové ropy za hodinu je potřeba do procesu dodat přibližně 850 kW<sub>tep</sub>. [41] Nicméně energetická náročnost tohoto procesu silně závisí od několika různých faktorů, jakými jsou například kvalita a složení přiváděné surové ropy, technologické procesy použité při dodatečném zpracovávání ropných produktů nebo způsob, jakým je teplo v procesu regenerováno.

## 2.5 Výroba vodíku

V posledních několika letech lze pozorovat snahy o integraci vodíku do současného energetického mixu. Díky širokým možnostem jeho využití a nulovým emisím z jeho spalování se z vodíku stává perspektivní alternativa pro, v současnosti spalované, fosilní paliva. Tyto faktory zapříčiňují vyšší poptávku, kvůli které je nutné uvažovat o rozšíření současných možností a kapacit procesů pro jeho získávání. Celá řada z těchto procesů pak vyžaduje nejen vnější zdroj elektrické energie, ale často také stabilní dodávku tepla, přičemž jaderné elektrárny mohou poskytnout oba tyto klíčové komponenty.

### 2.5.1 Parní perforace metanu

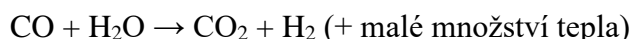
I přes současné úsilí o zvýšení celkové produkce vodíku skrze proces elektrolýzy je v současné době okolo 96 % veškerého vodíku získáváno z fosilních paliv. Děje se tak skrze chemický proces zvaný parní perforace metanu, při kterém se pára o teplotě v rozmezí 750 °C až 950 °C přivádí k metanu. Jejich vzájemná reakce dává vzniknout vodíku, oxidu uhelnatému a menšímu množství oxidu uhličitého. V následujícím kroku tohoto procesu je vzniklý oxid uhelnatý přiváděn do kontaktu s další vodní parou s vysokou teplotou, čímž je získáván další vodík. Nevýhodou druhého kroku je však již značné množství oxidu uhličitého, který vzniká jako vedlejší produkt. Přesto, že se

celková účinnost celého procesu může blížit až k 75 %, vzniká vedle vodíku i značné množství oxidu uhličitého. Na jeden kilogram vodíku tak při procesu vzniká 9 až 12 kg oxidu uhličitého. [42]

Celý proces musí probíhat pod tlakem v rozmezí od 3 barů do 25 barů při stálé přítomnosti katalyzátoru. Parní perforace metanu je endotermický proces, a tudíž musí být do procesu dodávané teplo, aby reakce pro perforaci páry a metanu mohla probíhat.



Následně dochází k přeměně voda plyn, kdy oxid uhelnatý a vodní pára opět za přítomnosti katalyzátoru reagují a vzniká tak více vodíku, spolu s oxidem uhličitým a malým množstvím tepla.



V závěrečném kroku se z proudu plynu odstraní oxid uhličitý a další nečistoty, čímž je získán téměř čistý vodík. Skrze parní perforaci lze však vodík získávat i například z etanolu, propanu nebo benzínu. [43]

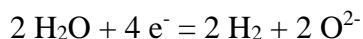
Minimální energie potřebná k výrobě 1 kg vodíku skrze proces parní perforace metanu je 79 MJ. Při uvažování energie pouze v rámci reakční komory, ve které je získáván vodík. Nejsou tedy zohledněny ztráty vzniklé například nedokonalým ohřevem reakční komory. [44]

### 2.5.2 Vysokoteplotní parní elektrolýza

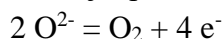
Běžný proces elektrolýzy dosahuje účinností zpravidla k 70 %. Toto číslo však lze navýšit, a to skrze zvýšení teploty roztoku ideálně až k hodnotám okolo 950 °C. Vysokoteplotní elektrolýzu lze provádět i za nižších teplot, ovšem za cenu nižší celkové účinnosti celého procesu. Proveditelnost vysokoteplotní elektrolýzy však zcela závisí na potřebě zdroje, který by byl schopen dodávat po dlouhou dobu stabilní množství levné elektrické energie a zároveň by byl schopen dodávat do procesu co nejvyšší možnou teplotu. Obě tyto podmínky mohou být zajištěny umístěním zařízení na výrobu vodíku skrze proces vysokoteplotní elektrolýzy v blízkosti elektrárny s vysokoteplotním pokročilým jaderným reaktorem. [45]

Vysoké účinnosti je v tomto procesu dosaženo skrze to, že díky vysoké teplotě elektrolytu dochází ke zvýšení jeho kinetiky, čímž jsou podpořeny elektrodové reakce. To má za následek snížení ztrát způsobených nízkou kinetikou elektrodových reakcí téměř na nulu a zvýšení účinnosti procesu. Další výhodou, kterou tato technologie poskytuje, jsou i relativně nízké náklady na katalyzátory. Slabá stránka této technologie jsou však vysoké nároky kladené na materiál, ze kterého je elektrolýzátor vyroben. [46]

Pro přenos náboje při vysokoteplotní elektrolýze se nejčastěji jako elektrolyt využívá oxid zirkoničitý ( $\text{ZrO}_2$ ) dopovaný oxidem yttritým ( $\text{Y}_2\text{O}_3$ ). Jako materiál katody je v tomto případě využívána ta samá sloučenina jako pro elektrolyt dopovaná niklem. Naproti tomu katoda může být tvořena různými směsnými oxidy. Celá reakce probíhá tak, že je na porézní katodu přiváděna vodní pára. Ta zde redukuje na vodík a kyslíkové ionty podle:



Následně vzniklé ionty kyslíku prochází skrze pevný elektrolyt směrem k anodě. Zde pak oxidují zpět na kyslík podle:



Největší překážkou v nasazení této technologie však zůstává nutnost použití speciálních keramických materiálů, které by byly schopny dlouhodobě odolávat vysokým teplotám, nutných v tomto procesu. [47]

Celkové množství energie potřebné pro vysokoteplotní elektrolýzu je proměnlivé. Závisí především na teplotě, při které je vodík získáván, přičemž s rostoucí teplotou mírně vzrůstá a pohybuje se okolo hodnoty 10,8 MJ pro výrobu 1 m<sup>3</sup> vodíku tedy 120,96 MJ/kg. Mírně vzrůstající hodnota potřebné energie je však kompenzována účinností, která se s rostoucí teplotou naopak zvyšuje. [48]

V současné době je jedním z nejpokročilejších projektů, zaměřujících se na tuto technologii GrInHy2.0. Tento projekt je součástí programu SALCOS (*Salzgitter Low CO2 Steelmaking*) ocelářské a technologické skupiny Salzgitter AG s cílem do roku 2033 snížit svou uhlíkovou stopu. Samotný vysokoteplotní elektrolýzér byl vyvinut v rámci spolupráce s německou společností Sunfire. Současná pracovní teplota, při které zařízení pracuje, je 850 °C. S celkovou elektrickou účinností 84 % LHV je zařízení schopno vyprodukovat až 200 Nm<sup>3</sup> vodíku za hodinu. [49]

### 2.5.3 Termochemické dělení vody

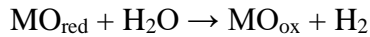
Při termochemickém dělení vody neboli termolýze dochází k celé řadě chemických reakcí za teplot pohybujících se od 500 °C až do 2 000 °C. Chemikálie, které jsou v průběhu těchto reakcí využívány, jsou znovu využívány v každém dalším následujícím cyklu. Tím vzniká uzavřená smyčka v rámci, které je spotřebovávána pouze dodaná voda, jenž je dělena na vodík a kyslík. [50]

Přímá termolýza by vyžadovala vyžaduje teploty nad 2 500 °C, což je vysoko nad současné technologické limity. Využití cyklických termochemických reakcí tak může představovat potenciálně výhodnější cestu k výrobě vodíku, neboť k němu dochází za daleko nižších teplot. To je možné díky řadě endotermických a exotermických reakcí v jednotlivých krocích procesu, které zabraňují okamžité rekombinaci H<sub>2</sub> a O<sub>2</sub>. Způsobů, jak to provádět, existuje vícero a jejich vlastnosti se odvíjí především od použitých typů kovových oxidů skrze redoxní reakce v rámci daného cyklu. Použité oxidy pak mohou být buď těkavé, jako například ZnO a SnO<sub>2</sub>, nebo netěkavé, mezi které se řadí Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> a CeO<sub>2</sub>. Případně mohou být použity i materiály se strukturou petrovskytu. [51]

V současné době nejvíce využívaným způsobem získávání vodíku z vody za pomoci termochemických reakcí je dvoustupňový cyklický proces skrze redoxní reakce oxidů s jednou endotermickou a jednou exotermickou reakcí. V rámci tohoto procesu je nejdříve počáteční oxid kovu na oxid kovu se sníženou valencí.

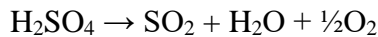


Tento oxid kovu se sníženou valencí následně reaguje s vodou, přičemž dochází ke vzniku vodíku a obnovení počátečního oxidu kovu.

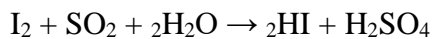


Oxid kovu je tak recyklován a může být znovu v rámci procesu použit. Pro uskutečnění tohoto procesu je však nutné dodat do procesu teplo o teplotě 1 500 °C.

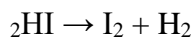
Druhou možností výroby je využití třístupňového procesu. Tento způsob je navržen tak, aby při jeho použití bylo možné vyrobit více vodíku a za nižších teplot než při využití dvoustupňového procesu. Nejtypičtějším zástupcem je sirno-jódový proces, složený ze dvou endotermických reakcí a jedné exotermické reakce. První krok vyžaduje, aby byla teplota při této reakci mezi 850 a 900 °C.



Druhý krok je exotermický a vzniká při něm teplota okolo 100 °C



Pro uskutečnění poslední reakce celého procesu je pak nutné dodat reakci teplotu v rozmezí 400 až 500 °C.



Pro uváděné teploty je účinnosti výroby vodíku tímto způsobem okolo 52 %. Dle dostupných informací je možné však tento proces realizovat i za nižších teplot, ovšem za cenu značného poklesu účinnosti. Naopak pokud by v rámci prvního kroku byla teplota zvýšena na 1 000 °C, bylo by možné dosáhnout účinnosti až 60 %. [52]

Pro tento proces je potřeba dodat 83,582 kW, aby byl v průběhu jedné hodiny vyprodukován 1 kg vodíku. [41]

### 3. PŘEHLED POKROČILÝCH PROJEKTŮ MALÝCH MODULÁRNÍCH REAKTORŮ

V posledních několika letech se v oblasti jaderné energetiky objevují nové trendy, které slibují transformaci tradičních přístupů, nejen k výrobě elektrické energie, ale také dalších možností užití této technologie. Mezi tyto inovace patří rozvoj technologie SMR, které představují generaci III+ a IV. jaderných reaktorů. Tyto reaktory jsou navrženy tak, aby byly bezpečnější, měly menší prostorové nároky a mohly být, díky své modularitě postaveny výrazně rychleji ve srovnání s konvenčními jadernými elektrárnami.

Zvýšená bezpečnost SMR v podobě pasivních bezpečnostních opatření funguje na základě spolehnutí se na přirozené fyzikální zákony pro odstavení a chlazení reaktoru i v případě neobvyklých podmínek. SMR tím získávají řadu výhod. Jednou z nejvýznamnějších je i menší ochranné pásmo v okolí elektrárny. Díky tomu mohou být postaveny blíže průmyslovým centrům nebo oblastem s vyšší hustotou zalidnění. Zároveň nižší prostorové nároky dovolují, aby mohla být tato zařízení umístěna i například v areálech uhelných elektráren, jež mohou zcela nahradit.

V rámci této kapitoly jsou pak řešeny projekty, jenž mají v současné době největší potenciál pro reálné využití.

#### 3.1 BWRX-300

SMR BWRX-300, vyvíjený společností GE Hitachi (GEH), představuje pokročilý typ varného reaktoru (BWR) s přirozenou cirkulací. Tento reaktor je navržen pro použití běžného komerčního a snadno dostupného jaderného paliva s obohacením 3,81 %  $^{235}\text{U}$  v průměru a maximálním obohacením 4,95 %  $^{235}\text{U}$ . Jaderné teplo generované reaktorem BWRX-300 lze uplatnit nejen pro výrobu elektřiny, ale i v různých průmyslových aplikacích, jako je výroba vodíku, odsolování vody či dálkové vytápění. S elektrickým výkonem 300 MW<sub>el</sub>, který je tento reaktor schopen dodat do sítě, se zařazuje mezi Středně výkonné SMR.

BWRX-300 je navržen tak, aby vyžadoval menší prostorové nároky oproti konvenčním jaderným elektrárnám. Na zhruba 50 % objemu tak dosahuje stejného elektrického výkonu. To znamená zejména značnou úsporu na stavební materiály. Výstavba tohoto reaktoru by měla trvat 24 až 36 měsíců, což je výrazně kratší doba ve srovnání s tradičními jadernými elektrárnami.

Klíčovým bezpečnostním prvkem reaktoru BWRX-300 je jeho schopnost autonomního chlazení díky přirozené cirkulaci. Reaktor je navržen tak, aby byl schopen sám sebe chladit po dobu minimálně jednoho týdne bez jakékoli potřeby vnějšího napájení nebo obsluhy. Tato funkce představuje významný bezpečnostní prvek, který zvyšuje odolnost reaktoru v případě mimořádných situací a minimalizuje riziko výpadků chlazení.

GEH plánuje postavení prvního BWRX-300 do roku 2029. Pokud se svým plánem uspěje, bude se jednat o jednu z prvních společností, které se povede spustit SMR. Plánovaná životnost reaktoru je 60 let, což je standardní doba provozu pro moderní jaderné reaktory. [53]

V současné době má GEH rozpracovaných několik projektů pro nožnou výstavbu svých SMR po celém světě. Ty nejvýznamnější projekty jsou řešeny níže.

### **3.1.1 Kanada**

Od ledna 2023 je ve výstavbě jeden SMR typu BWRX-300 v Kanadě v lokaci Darlington poblíž Toronta. Dne 7. července 2023 oznámila vláda provincie Ontario spolupráci s Ontario Power Generation na zahájení plánování a licencování dalších tří SMR BWRX-300 v téže lokalitě. Celkový výkon těchto čtyř reaktorů BWRX-300 je plánován na 1 200 MW, což by mělo být dostatečné pro zásobování elektřinou přibližně 1,2 milionu domácností. [54]

### **3.1.2 Polsko**

Orlen Synthos Green Energy, společnost odpovědná za budoucí stavbu SMR BWRX-300 v Polsku, obdržela dne 23. května 2023 obecné stanovisko od Polské národní agentury pro jadernou energii. Toto stanovisko potvrzuje, že plánovaný projekt splňuje požadavky polských zákonů na jadernou bezpečnost, což je zásadní krok k jeho realizaci. Tento projekt je prvním, který v Polsku úspěšně splnil všechny podmínky v rámci předlicenčního procesu a je tak prozatím nejbližší své realizaci.

Pro Polskou stranu je klíčové, že v rámci projektu Vendor Design Review získal BWRX-300 předlicenční schválení v Kanadě, kde je již ve výstavbě první z těchto reaktorů poblíž města Toronto v areálu jaderné elektrárny Darlington. Právě výstavba tohoto reaktoru v Kanadě má sloužit jako referenční projekt pro prvního SMR v Polsku, což umožní využít zkušenosti a poznatky získané během jeho výstavby a provozu. Ty získají v rámci plánu na výměnu informací mezi polskými a kanadskými dozorovými orgány o postupech a přezkumech v dané technologii. [55]

Polské ministerstvo klimatu a životního prostředí nedávno vydalo principiální rozhodnutí o výstavbě šesti jaderných elektráren, které budou vybaveny reaktory BWRX-300. Tyto elektrárny by měly být vybaveny celkem až 24 SMR, což potvrzuje polský plán na vytvoření flotily reaktorů BWRX-300. Společnost GEH již v rámci tohoto plánu získal první povolení na udělování investic. [56]

Polsko plánuje nasazení svého prvního SMR do roku 2030. Tento cíl je považován za významný krok v procesu dekarbonizace a přechodu k čistějším zdrojům energie v zemi. [57]

### **3.1.3 Další státy**

Tennessee Valley Authority (TVA) připravuje žádost o stavební povolení pro malý modulární reaktor BWRX-300, který má být umístěn v lokalitě Clinch River Site

v Tennessee. V roce 2019 Úřad Amerického jaderného dozoru vydal předběžné schválení pro tuto lokalitu, což byl významný krok vpřed v realizaci projektu. Kromě této lokality probíhá průzkum i dalších potenciálních míst pro umístění těchto reaktorů. Do současné chvíle investovalo TVA do projektu částku ve výši 200 milionů dolarů a na začátku roku 2024 je plánováno podání žádosti o zahájení výstavby. Tyto události tak znamenají jasný krok vpřed v realizaci celého projektu. [58] [59]

V roce 2020 bylo podepsáno memorandum mezi energetickou společností ČEZ a GEH o prozkoumání možností ekonomické a technické proveditelnosti potenciální výstavby SMR BWRX-300 v České republice. [60]

Další země Evropy, ve kterých existuje podpora BWRX-300, jsou Estonsko a Švédsko. Přičemž ve Velké Británii požádala GEH o posouzení svého návrhu SMR pro možnou budoucí realizaci. Krom výše jmenovaných existují probíhající diskuse o aplikaci BWRX-300 i na Blízkém východě, v Africe, Asii a Austrálii. Celkem tak o tento projekt projevilo zájem více než 30 zemí z celého světa. [53]

## 3.2 NuScale SMR

Společnost NuScale se specializuje na vývoj SMR. Významným úspěchem společnosti je fakt, že jako první obdrželi schválení návrhu vlastního SMR od americké Nuclear Regulatory Commission, díky čemuž si NuScale zajistila významnou pozici na mezinárodním trhu.

Hlavním projektem je design elektrárny s názvem VOYGR, který v sobě obsahuje vždy několik SMR navržených společností NuScale. V současnosti jsou v nabídce návrhy VOYGR-4, VOYGR-6 a VOYGR-12, přičemž poslední číslo v názvu udává počet reaktorů v každé elektrárně. Například VOYGR-12 by měl obsahovat dvanáct reaktorů s celkovým výkonem až 924 MW<sub>el</sub>, přičemž každý jednotlivý reaktor má výkon 77 MW<sub>el</sub>.

Design VOYGR-4 má při připojení k odsolovacímu zařízení dostatečnou kapacitu na to, aby dokázal zásobovat pitnou vodou metropoli o velikosti Kapského města. Tedy město, které má přibližně 4,6 milionů obyvatel. Elektrárny VOYGR-4 a 6 jsou navrženy tak, aby byly snadno rozšiřitelné o další reaktory, což umožňuje flexibilní reakci na rostoucí energetické potřeby.

VOYGR-12 je největší z nabízených modelů. Zabírá plochu necelých 0,3 km<sup>2</sup>, což je oproti elektrárnám s podobným výkonem velmi malý prostor. V případě katastrofální ztráty energetické infrastruktury by VOYGR-12 měl schopnost napájet mikrosít o výkonu 154 MW<sub>el</sub> po dobu až 12 let bez nutnosti výměny paliva. Běžný palivový cyklus však může být u těchto reaktorů až 24 měsíců, a to s běžně používaným palivem v konfiguraci 17 x 17 obohaceným na méně než 5 % <sup>235</sup>U. [61]

### 3.2.1 Projekty v rámci Severní Ameriky

Společnost NuScale, ve spolupráci se společností Standard Power, plánuje postavit dvě pokročilá jaderná zařízení ve státech Ohio a Pensylvánie. Jaderná zařízení by měla

dodávat až 2 GW<sub>el</sub> energie pro napájení pokročilých datových center společnosti Standart Power. Plánované spuštění těchto zařízení je naplánováno na rok 2029. NuScale byla pro tento projekt vybrána především právě díky schválení jejího návrhu od Nuclear Regulatory Commission. Na tomto projektu se mimo jiné podílí i společnost ENTRA1. [62]

Ve spolupráci s Dairyland Power je hodnocena možnost nasazení elektráren VOYGR ve Wisconsinu. Tento projekt nabízí možnost rozšíření portfolia obnovitelných zdrojů společnosti Dairyland. Elektrárny VOYGR jsou považovány za vhodnou náhradu odstavovaných uhelných elektráren, přičemž kladný dopad mají i na zachování pracovních míst v regionu. Obdobné kroky probíhají i ve státech Missouri a Severní Karolína, kde by navíc mohly elektrárny VOYGR zásobovat energií i místní ocelárny.

Paralelně s projekty v USA NuScale rozvíjí také projekt v Kanadě, kde momentálně probíhá vývoj regulačního rámce a licencování jejich technologie. Tento projekt zahrnuje plán na výstavbu a provoz až 12 plovoucích jaderných elektráren. [63]

### **3.2.2 Projekty v Evropě**

V Rumunsku plánuje NuScale výstavbu elektrárny VOYGR-6 na místě bývalé uhelné elektrárny Doicesti. Projekt, jehož dokončení je plánováno do roku 2030, má potenciál snížit emise CO<sub>2</sub> až o 4 miliony tun ročně a vyprodukovat 462 MW<sub>el</sub> energie.

Probíhá také projekt výstavby elektráren VOYGR v Polsku s teoretickým termínem dokončení v roce 2029. V současné době probíhá proces vyhodnocování vhodných lokalit, tvorba plánů a bezpečnostních analýz, ve spolupráci s národní agenturou pro atomovou energii.

V Bulharsku byla pro výstavbu elektrárny NuScale vybrána lokalita v okolí jaderné elektrárny Kozloduj. Práce na projektu zahrnují detailní analýzy a studie, včetně odhadů nákladů, časových plánů a licenčních činností.

V rámci ČR probíhá výměna jaderných a technických expertíz s cílem zkoumání možných aplikací technologií NuScale SMR.

Dalším projektem je potenciální výstavba VOYGR na území Ukrajiny. Tento projekt je však v současné době, kvůli ruské okupaci Ukrajiny, včetně největší jaderné elektrárny na území Evropy, v ohrožení [63]

### **3.2.3 Zrušený projekt**

V listopadu 2023 bylo oznámeno ukončení projektu Carbon Free Power Project v Utahu, který měl zahrnovat výstavbu elektrárny VOYGR-6 s plánovaným výkonem 462 MW<sub>el</sub>. Původně se očekávalo, že projekt bude spuštěn v roce 2030.

Cena projektu měla být původně 600 milionů dolarů, ovšem postupně se tyto původně odhadované náklady začaly čím dál více zvyšovat. To vedlo k tomu, že některá z měst v blízkosti budoucí lokality elektrárny začala od projektu postupně ustupovat. Jedním z rozhodujících faktorů pro zrušení projektu byl například aktualizovaný odhad ceny za

MWh, který vzrostl na 89 dolarů. Tato cena představuje nárůst o 53 % oproti původnímu odhadu 58 dolarů za MWh, což značně snížilo ekonomický výnos objektu. [64]

### 3.3 Nuward

Na počátku roku 2023 byla ve Francii založena společnost Nuward, dceřiná společnost energetické skupiny EDF, které byl předán projekt na vývoj SMR. Nuward se specializuje výhradně na vývoj těchto typů reaktorů. V současné době se nachází ve fázi intenzivního vývoje a pracuje na získání potřebných licencí potřebných pro budoucí provoz svých reaktorů. [65]

Tyto reaktory jsou navrženy tak, aby byly schopny nahradit uhelné elektrárny o výkonu 300–400 MW<sub>el</sub>. Nuward SMR jsou navrženy nejen pro výrobu elektřiny, ale také pro podporu dalších energetických aplikací, jako je kogenerace elektřiny a tepla, výroba vodíku, dálkové vytápění nebo odsolování vody.

Předpokládaná doba výstavby zařízení využívající tuto technologii je odhadována na 40 měsíců, což z nich dělá relativně rychle nasaditelné řešení ve srovnání s tradičními jadernými elektrárnami. V rámci jednoho takového zařízení mají být umístěny dva reaktory typu PWR.

Konstrukční řešení projektu společnosti Nuward zahrnuje budovu s reaktory, která je částečně zasypaná do země, což přispívá k jejich ochraně. Primární okruh reaktoru je navržen bez použití boru. Dále jsou implementovány pasivní systémy chlazení, které zvyšují bezpečnost reaktoru i v případě výpadku elektrické energie. Malá bezpečnostní zóna umožňuje umístění těchto reaktorů v blízkosti populačních nebo průmyslových center, což je významným přínosem především pro využití jaderného tepla.

Každý z reaktorů v těchto zařízeních má výkon 170 MW<sub>el</sub> a tepelný výkon 540 MW<sub>tep</sub>. Předpokládá se, že plánovaná životnost reaktoru bude větší než 60 let. Palivový cyklus těchto reaktorů může trvat až 24 měsíců. Jako palivo je používán standardní oxid uraničitý (UO<sub>2</sub>) s obohacením pod 5 % v uspořádání do čtvercovém formátu.

Pro zabezpečení licenčního procesu je projekt Nuward SMR podroben důkladnému přezkumu třemi bezpečnostními orgány: francouzským Úřadem pro jadernou bezpečnost (ASN), českým Státním úřadem pro jadernou bezpečnost (SÚJB) a finským Úřadem pro radiační a jadernou bezpečnost (STUK). [66]

### 3.4 Holtec International

Holtec International je společnost se sídlem ve Spojených státech a představuje jednoho z předních hráčů v oblasti vývoje SMR. Zaměřuje se na inovace v jaderné technologii a stojí za dvěma projekty SMR-160 a SMR-300 popsány níže.

### 3.4.1 SMR-300

Jako novější z projektů společnosti Holtec International disponuje výkonem 300 MW<sub>el</sub>. V rámci celé budovy je tento SMR umístěn kompletně pod povrch, což výrazně zvyšuje jeho bezpečnost a odolnost vůči vnějším vlivům. SMR-300 využívá technologii "Walk-away free", která zajišťuje, že v případě přírodních katastrof, nehod nebo hrozeb způsobených člověkem reaktor nevyžaduje žádnou obsluhu. Tato technologie je základem použitých pasivních bezpečnostních systémů.

Životnost tohoto typu reaktoru je odhadována až na 80 let, což představuje významný pokrok v srovnání s tradičními jadernými elektrárnami. SMR-300 je také flexibilní v možnostech chlazení. Může být napojen jak se standardními vodou chlazené kondenzátory, tak i na kondenzátory chlazené vzduchem, což umožňuje jeho využití i ve velmi suchých oblastech.

Výjimečnou schopností projektu SMR-300 je jeho schopnost startu ze tmy, což znamená, že může být spuštěn i v případě, kdy není napojený na žádný vnější zdroj energie. [67]

### 3.4.2 SMR-160

Do roku 2030 plánuje Holtec International výstavbu malého modulárního reaktoru SMR-160 v USA. Ačkoli přesné místo výstavby ještě není definitivně určeno, nejpravděpodobnější lokalitou se jeví areál stávající jaderné elektrárny Oyster Creek. SMR-160 je navržen jako reaktor typu PWR s elektrickým výkonem 160 MW<sub>el</sub> a tepelným výkonem 525 MW<sub>tep</sub>. Disponuje přirozenou cirkulací a pasivními systémy chlazení. Tento jednosmyčkový reaktor je navíc navržen tak, aby mohl být napojen na kogenerační zařízení, což umožňuje další průmyslové využití tepla generovaného reaktorem.

Jednou z klíčových vlastností projektu je jeho flexibilní výkon, což umožňuje rychlejší přizpůsobení aktuálním potřebám. Na rozdíl od některých jiných projektů SMR, bude SMR-160 využívat standardně používané jaderné palivo 17 x 17 GAIA, což zjednoduší logistiku a zásobování. [68]

Společnost Holtec International navázala v roce 2018 spolupráci se společností GE Hitachi (GEH) na vývoji projektu SMR-160. Původní plán zahájení provozu prvního reaktoru SMR-160 byl stanoven na rok 2026. [69]

Dne 11. října 2022 uzavřela společnost Holtec International memorandum se společností Škoda Praha, které se týká plánování výstavby SMR-160 v České republice. Součástí tohoto memoranda je vypracování odhadu nákladů pro tento projekt. Kromě toho bylo v září 2022 podepsáno memorandum se společností ČEZ o vyhodnocení možnosti nasazení SMR-160 v jaderné elektrárně Temelín. V rámci tohoto plánu se předpokládá, že první SMR by mohlo být v Temelíně nasazeno již v roce 2032.

Holtec International a ČEZ také vyhodnocují jiné lokality v České republice pro potenciální náhradu stávajících uhelných elektráren. V rámci této strategie spolupracuje

Holtec se českým Ministerstvem průmyslu a obchodu na zkoumání dalších možností využití SMR, včetně dálkového vytápění a průmyslových procesů. Pro realizaci těchto projektů je však nezbytné splnit požadavky na vhodnost lokality, přičemž každá lokalita může hostit 4 až 8 jednotek SMR-160. [70]

### 3.5 UK SMR

Společnost Rolls-Royce (RR) založila dceřinou společností RR SMR, která se zaměřuje na vývoj a realizaci projektu UK SMR. Tento SMR má zabírat pouze desetinu prostoru ve srovnání s konvenčními jadernými elektrárnami, a to při nominálním elektrickém výkonu 470 MW<sub>el</sub>. [71]

Projekt UK SMR využívá technologii PWR, což je běžně používaný typ v jaderné energetice. Tento konkrétní design je založen na tří smyčkovém systému s jedním čerpadlem pro každou smyčku a třemi parogenerátory. Jako palivo používá standardní oxid uraničitý v konfiguraci 17 x 17, obohacený do 4,95 %.

Jako většina jiných SMR je i tento vyvíjen tak, aby se teplo které generuje dalo jednoduše použít i na řadu sekundárních aplikací. Jako například odsolování vody, produkci vodíku, dálkovému vytápění, výrobě až 280 tun syntetických paliv za den, nebo pro technologie přímého zachytávání CO<sub>2</sub> z atmosféry. [72]

Plánovaná životnost reaktoru je 60 let. V rámci stavby jaderných elektráren s touto technologií bude až 90 % vyrobeno v továrně a dodáno na místo. To může být provedeno po silnici, železnici nebo lodí, v závislosti na poloze budoucí elektrárny. Elektrárna bude pak na místě smontována a uvedena do provozu týmem RR SMR, a to v rámci smlouvy na klíč. [73]

Společnost RR SMR má plán spustit výrobu elektřiny z SMR a připojit je do elektrické sítě do roku 2029. Celkově RR plánuje postavit až 16 SMR, v rámci výstavby deseti elektráren s touto technologií do roku 2035. Dále RR SMR udává, že doba výstavby takové elektrárny zabere pouze 500 dní, což je výrazně kratší čas ve srovnání s výstavbou tradičních jaderných elektráren. Každý reaktor má mít rozměry přibližně 16 x 4 metry a rozloha každé elektrárny je plánována na přibližně 3,67 hektaru. [74]

V říjnu 2023 byla společnost RR SMR se svým projektem UK SMR vybrána společně s dalšími šesti společnostmi do další fáze soutěže o stavbu SMR ve Velké Británii. Těmito společnostmi jsou skupina EDF, GE-Hitachi Nuclear Energy International LLC, Holtec Britain Limited, NuScale Power a Westinghouse Electric Company UK Limited. Cílem Velké Británie je výstavba jaderné elektrárny s technologií SMR do poloviny 30. let 21. století. Rozhodnutí o udělení státní podpory pro projekty SMR ve Velké Británii se očekává na jaře 2024. [75]

## 3.6 Westinghouse

Společnost Westinghouse Electric Company v současné době pracuje na dvou projektech SMR. Prvním projektem je běžný malý modulární PWR AP300. Druhým je unikátní projekt s názvem eVinci, jehož jedinečnost spočívá v tom, že se jedná o takzvaný mikroreaktor.

### 3.6.1 AP300

Projekt AP300 je založen na technologii PWR AP1000. Tyto reaktory standardní velikosti již byly úspěšně postaveny a provozovány společností Westinghouse, přičemž čtyři z nich jsou umístěny v Číně a dalších šest je ve fázi výstavby. Krom toho byly dva reaktory AP1000 postaveny a spuštěny v elektrárně Vogtle v Georgii USA. Zásadním rozdílem oproti svému předchůdci je fakt, že AP300 disponuje pouze jednou chladicí smyčkou.

Elektrický výkon AP300 je navržen na  $300 \text{ MW}_{\text{el}}$ . Tepelný výkon pak bude dosahovat  $990 \text{ MW}_{\text{tep}}$ , což umožňují další průmyslové využití tepla, zejména pro produkci vodíku, dálkové vytápění nebo odsolování.

Vysoká bezpečnost projektu je zaručena díky využití pasivních bezpečnostních prvků, které mimo jiné například zajišťují bezpečný provoz reaktoru i v případě mimořádných situací, jako jsou přírodní katastrofy nebo technické poruchy. Pasivní bezpečnostní systémy umožňují, aby se reaktor v případě potřeby bezpečně sám odstavil, aniž by byl vyžadován zásah obsluhy, záložní napájení nebo čerpadla. Tato vlastnost značně snižuje riziko jakéhokoli nebezpečí pro životní prostředí nebo veřejnost.

Životnost těchto reaktorů je odhadována na více jak 80 let, čímž převyšuje valnou většinu svých konkurentů. AP300 je navíc navržen s čtyřletým cyklem doplňování paliva. Tento relativně dlouhý cyklus minimalizuje frekvenci výměny paliva a snižuje provozní nároky na elektrárnu. [76]

Palivo využívané v tomto reaktoru bude typu LWR, vyráběné v Jižní Karolíně. Toto palivo je obohacené na nejvýše 5 %  $^{235}\text{U}$ . [77]

AP300 má kapacitu dodávat dostatek energie pro až 300 tisíc domácností. Díky využití technologie založené na již existujících reaktorech AP1000 se očekává, že proces licencování AP300 bude jednodušší a rychlejší. Společnost Westinghouse plánuje začít s výrobou elektřiny z AP300 a jejím dodáváním do sítě už v roce 2033. Zájem o postavení AP300 existuje také na území České republiky, kde by mohl být tento reaktor pilotním projektem SMR v jaderné elektrárně Temelín. K tomu by mohl dopomoci i fakt, že konstrukce AP300 již byla schválena regulačními úřady v USA, Číně, Velké Británii a je v souladu s evropskými normami pro jadernou energetiku, jakými jsou European Utility Requirements. [78]

### 3.6.2 eVinci

Projekt eVinci od společnosti Westinghouse představuje první mikroreaktor firmy, který se momentálně nachází ve fázi vývoje. Tento mikroreaktor je navržen s elektrickým výkonem  $5 \text{ MW}_{\text{el}}$  a tepelným výkonem  $13 \text{ MW}_{\text{tep}}$ , což ho činí ideálním pro malé a středně velké aplikace.

Jednou z klíčových vlastností eVinci je to, že díky jeho aktivní zóně, může pracovat na plný výkon po dobu osmi let bez potřeby výměny paliva. Tato vlastnost poskytuje významnou výhodu ve smyslu snížení nákladů a údržby.

eVinci je navržen tak, aby byl plně smontovatelný v továrně, což zjednodušuje proces instalace a zprovoznění. Pro instalaci reaktoru je vyžadována plocha pouze 2 akry, což znamená minimální prostorový otisk.

Tento reaktor je také schopen poskytnout procesní teplo pro aplikace, jako je dálkové vytápění nebo vysokoteplotní tepelné aplikace. Využívá palivo TRISO obohaceno na 19,75 %.

Samozřejmostí už pak je to, že je reaktor navrhován s pokročilými prvky pasivní bezpečnosti, což zajišťuje jeho bezpečný provoz i v případě neobvyklých situací. Tento mikroreaktor je tak díky své velikosti a vlastnostem ideální pro použití ve vzdálených nebo oddělených oblastech, jako jsou doly, vojenská zařízení a další lokality, kde je nutná decentralizovaná a spolehlivá energetická produkce. [79]

### 3.7 i-SMR/SMART100

Korea Hydro & Nuclear Power (KHNP) je další společností na poli jaderné energetiky, která se v posledních letech zaměřila na vývoj SMR. Původní projekt této společnosti, známý jako SMART100, však neuspěl v Saudské Arábii, což vedlo k jeho přepracování. Na jaře 2021 byl projekt SMART100 transformován na inovativní projekt i-SMR. Realizace prvních projektů s reaktorem i-SMR je plánována nejdříve na rok 2030. [80]

Reaktor i-SMR je navržen jako reaktor typu PWR s plánovaným výkonem  $170 \text{ MW}_{\text{el}}$ . Společnost KHNP si klade za cíl dokončit návrh i-SMR do roku 2025. Na konci roku 2023 společnost KHNP podepsala memorandum o spolupráci s partnery z Indonésie a Jordánska. Toto memorandum se zaměřuje na zkoumání možností umístění jednotek i-SMR v těchto zemích. [81]

### 3.8 X-energy

Společnost X-energy, původně zaměřená na vývoj palivových technologií pro jaderné reaktory, v současné době vyvíjí vlastní SMR s názvem Xe-100. Jedná se o reaktor typu HTGR, IV. generace s tepelným výkonem  $200 \text{ MW}_{\text{tep}}$  a teplotou na výstupu z reaktoru pohybující se k hranici  $750 \text{ }^\circ\text{C}$ . Díky vysoké teplotě na výstupu je tak možné využít tyto reaktory pro různé průmyslové procesy vyžadující širokou škálu teplot. Jeden reaktor je schopen při spojení s generátorem produkovat až  $80 \text{ MW}_{\text{el}}$ . Pro rozšíření celkových

kapacit reaktoru je možné navýšení počtu reaktorů až na 4, v rámci jednoho zařízení. Díky tomu lze v rámci jedné elektrárny generovat až 320 MW<sub>el</sub>. Jako chladicí médium je v rámci tohoto reaktoru použito hélium pod tlakem 6 MPa, které v parogenerátoru předává své teplo vodní páře s výstupní teplotou 565 °C pod tlakem 16,5 MPa. [82]

Xe-100 využívá palivo TRISO-X, vyráběné společností X-energy. Jedná se o částicové palivo kulového tvaru s vysokou energetickou hustotou na bázi nízkoobohaceného uranu. Jádrem paliva TRISO-X je tvořeno oxidem/karbidem uranu obklopeném čtyřmi ochrannými vrstvami pro stabilizaci jádra. Díky své konstrukci dokáže toto palivo odolávat vyšším teplotám, aniž by došlo k jeho roztavení, což do značné míry zajišťuje jeho bezpečnost. [83]

V současné době existuje snaha o výstavbu dvanácti SMR Xe-100 s výrobní kapacitou 960 MW<sub>el</sub> ve státě Washington v USA v sousedství elektrárny Columbia. Zahájení provozu elektrárny je plánováno na rok 2030, přičemž v současné době je projekt ve fázi licenčního a regulačního procesu s vypracovaným modelem realizace projektu. [84]

Další možnou lokalitou pro umístění reaktorů Xe-100 je areál současné jaderné elektrárny Hartlepool ve Velké Británii. Současná jaderná elektrárna, provozovaná společností EDF, bude vyřazena z provozu v roce 2026 a následně nahrazena novým SMR, přičemž společnost X-energy projevila zájem o výstavbu Xe-100 v této lokalitě jako náhradu za stávající elektrárnu. [85]

Poslední lokalitou, na které by mohla v budoucnosti stát elektrárna využívající Xe-100 je jedna z nespecifikovaných lokalit patřících pod společnost Dow na pobřeží Mexického zálivu. Cílem dohody mezi společnostmi Dow a X-energy je stavba jaderné elektrárny se čtyřmi bloky sloužící, mimo jiné, jako demonstrativní projekt pokročilého SMR napojeného na přilehlý průmyslový areál v Severní Americe. [86]

### **3.9 TerraPower**

Jaderný reaktor Natrium od společnosti TerraPower je jedním z vyvíjených rychlých reaktorů IV generace chlazený tekutým sodíkem. Tento SMR je navržen tak aby byl schopen stabilně dodávat do sítě 345 MW<sub>el</sub>, přičemž je však schopen po omezenou dobu dosáhnout vyššího výkonu až 500 MW<sub>el</sub>. Tento výkon by měl být schopen dodávat nejméně 5,5 hodin a slouží pro pokrytí případných špičkových poptávek po elektrické energii. Takového zvýšení výkonu je reaktor schopen díky integrovanému systému pro skladování energie, založenému na technologii roztavených solí. [87]

V současné době probíhají práce na demonstračním projektu v lokalitě uhelné elektrárny Kemmerer ve Wyomingu. Ten má sloužit pro ověření funkčnosti konstrukce a systémů nutných pro provoz SMR Natrium. Projekt je realizován prostřednictvím partnerství veřejného a soukromého sektoru v rámci programu ARDP amerického ministerstva energetiky. Skrze tento program mohou být čerpány finanční prostředky až do výše 2 miliard dolarů, přičemž tato investice bude navýšena o stejnou sumu

společností TerraPower a jejími partnery, mezi kterými je i společnost GE Hitachi. Po dokončení projektu přejde tento objekt pod vlastnictví společnosti PacifiCorp, která bude zároveň odpovědná za jeho provoz. [88]

Úplné dokončením výstavby tohoto projektu je předpokládáno do roku 2030. V současné době stále prochází projekt licenčním řízením, jehož kladný výsledek se předpokládá na rok 2027. Do té doby na zvolené lokalitě probíhá výstavba nejaderné části elektrárny. [89]

### 3.10 ARC Clean Technology

Společnost ARC Clean Technology vyvíjí sodíkem chlazený, rychlý SMR s názvem ARC-100. Tento reaktor je navržen tak aby dosahoval tepelného výkonu až  $286 \text{ MW}_{\text{tep}}$  s možností výroby elektřiny o výkonu  $100 \text{ MW}_{\text{el}}$ . To je výkon potřebný pro pokrytí nároků zhruba 75 tisíc domácností. S výstupní teplotou  $510 \text{ }^\circ\text{C}$  je nabízí ARC-100 široké spektrum využití od konvenční výroby elektrické energie po pokročilé průmyslové využití tepla. Palivový cyklus tohoto reaktoru je oproti většině jaderných reaktorů nezvykle dlouhý. K výměně paliva by mělo docházet jednou za 20 let. Životnost tohoto reaktoru je pak plánována na 60 let. [90]

Za chystaným projektem výstavby prvního ARC-100 stojí společnost NB Power, která podala v roce 2023 žádost kanadskému ministerstvu životního prostředí a kanadské komisi pro jadernou bezpečnost k povolení výstavby tohoto reaktoru. Lokalitou, na které by měl reaktor stát, se má stát poloostrov Lepreau, přičemž reaktor má dodávat vyrobenou energii do elektrické sítě New Brinswik. V současné době se čeká na vyjádření ministerstva pro životní prostředí o posouzení vlivu elektrárny a její výstavby na její okolí. [91]

### 3.11 České projekty SMR

V současné době existuje pět českých projektů, zabývajících se návrhem a potenciální budoucí aplikací vlastních malých modulárních reaktorů. Takovéto zdroje mohou v budoucnu sloužit jako uhlíkově neutrální zdroje energie, jejichž výstavbou by došlo k podpoře lokálních projektů.

#### 3.11.1 Energy Well

Projekt Energy Well, vyvíjený Výzkumným Centrem Řež, využívá, na rozdíl od většiny moderních jaderných reaktorů, tekuté soli k chlazení pro chlazení a moderaci. Reaktor je koncipován tak, aby byl energetický výstup plně přizpůsobitelný potřebám koncového uživatele. Může tak sloužit jako zdroj tepla a elektřiny pro domácnosti, případně je možné jeho využití při výrobě vodíku pro potřeby skladování energie. [92]

Reaktor je navržen s tepelným výkonem až  $20 \text{ MW}_{\text{tep}}$ , přičemž při použití v rámci zamýšlené cílové aplikace v rámci elektrárny je možno dosáhnout elektrického výkonu

8 MW<sub>el</sub>. V rámci této elektrárny jsou navrženy tři chladicí okruhy. V prvních dvou cyklech jsou jako teponosné médium uvažovány tekuté soli FLiBe a NaBF<sub>4</sub>, přičemž teplota na výstupu z reaktoru se pohybuje až k 700 °C. V rámci terciálního okruhu pak má být využíván oxid uhličitý v superkritickém stavu. Jako palivo je zde pak uvažován uran s obohacením na 15 % <sup>235</sup>U s 19 palivovými soubory v aktivní zóně reaktoru a předpokládaným čtyřicetíměsíčním palivovým cyklem. [93]

### 3.11.2 TEPLATOR

SMR TEPLATOR je projekt stejnojmenné české společnosti, zaměřující se především na uspokojení poptávky po tepelné energii. Díky technologii využívající již vyhořelé palivo z jaderných elektráren je TEPLATOR schopen dodávat 50 – 150 MW<sub>tep</sub> při minimální ceně pohybující se, v roce 2019, pod hranicí 4 EUR/GJ. [94]

V současné době je vypracován koncepční design s výkonem 50 MW<sub>tep</sub>. Tato jednotka v sobě zahrnuje 55 palivových souborů, dříve využívaných v reaktorech typu VVER-440, s teplotou na výstupu 98 °C. Konstrukce tohoto zařízení je plánována do roku 2028. V rámci dalšího postupu projektu je předpokládáno, že zařízení bude možné přelicencovat na tzv. TEPLATOR Full s tepelným výkonem až 170 MW<sub>tep</sub> a teplotou na výstupu až 200 °C. [95]

### 3.11.3 CR-100

V rámci výzkumného Centra v Řeži je kro projektu Energy Well vyvíjen také projekt SMR s názvem CR-100. Jedná se o malý modulární tlakovodní reaktor s tepelným výkonem 100 MW<sub>tep</sub>. Jako palivo je plánováno využít stejný typ jaký je používán v jaderných reaktorech VVER-1000, tedy stejné palivo, jaké využívá jaderná elektrárna Temelín. V aktivní zóně má být umístěno 37 palivových souborů s aktivní délkou palivového sloupce 1 450 mm. [96]

### 3.11.4 David SMR

Návrh společnosti Witkowitz počítá s uvedením vlastního SMR na trh okolo roku 2035. Plánovaný výkon 175 MW<sub>tep</sub> má tento tlakovodní reaktor využívat, vedle výroby až 50 MW<sub>el</sub>, pro dálkové vytápění. Výrobu vodíku anebo také odsolování. [97] [98]

### 3.11.5 HeFASTo

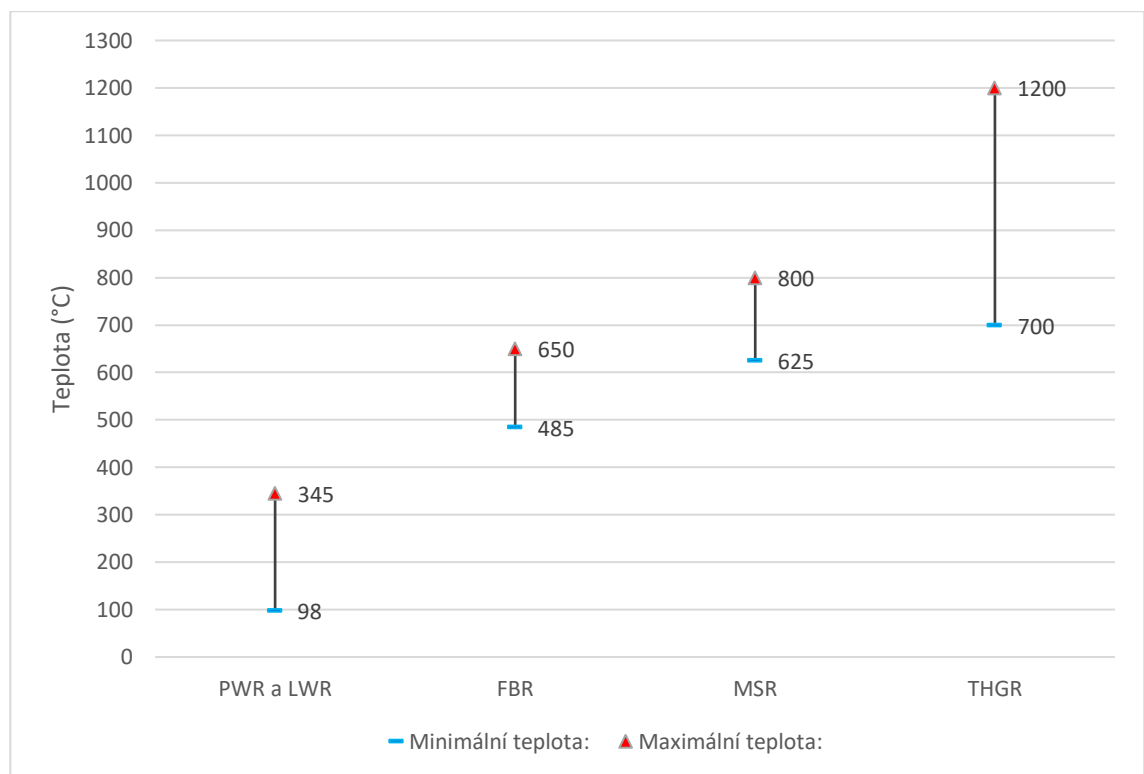
Koncept SMR HeFASTo je založen na technologii rychlého a plynem chlazeného reaktoru. Předpokládaný tepelný výkon 200 MW<sub>tep</sub> s výstupní teplotou aktivní zóny dosahující 900 °C je teoreticky využitelný pro širokou škálu technologických aplikací. Díky využití rychlých neutronů je schopen si HeFASTo vytvářet za chodu nový štěpný materiál, a to i s využitím přepracovaného paliva z jiných jaderných reaktorů. Jako palivo pro tento reaktor může být využito jak uran, tak plutonium při obohacení 30 % s plánovaným pětiletým palivovým cyklem. Jako chladivo v primárním okruhu je

uvažováno hélium pod tlakem 7,5 MPa, v rámci sekundárního okruhu má pak být použit dusík ve směsi s héliem pod tlakem 8 MPa. [99]

## 4. MODEL SOUSTAVY ZAPOJUJÍCÍ PROCESNÍ TEPLLO Z MALÝCH MODULÁRNÍCH REAKTORŮ

Při zvažování nasazení SMR pro využití procesního tepla je důležité brát v potaz dva klíčové parametry. Jsou jimi tepelný výkon reaktoru a teplota teplotonosné látky. Tyto dva faktory jsou zásadní pro využitelnost daného reaktoru v různých oblastech průmyslového využití.

Teplota, při níž reaktor pracuje a kterou je teoreticky schopen poskytnout danému odběrateli, je nejvíce určována typem daného jaderného reaktoru. Rozmezí teplot, za kterých jednotlivé typy jaderných reaktorů pracují, jsou graficky znázorněny na obrázku 1.



Obrázek 1 Teplotní potenciál jednotlivých typů SMR [100]

Jak již bylo rozvedeno v kapitole 1, jaderné teplo se využívalo během historie i v současnosti k mnoha průmyslovým aplikacím s širokou škálou požadavků na parametry dodávaného tepla (viz. Tabulka 4-1). Krom těchto aplikací lze však jaderné reaktory použít pro dodávku tepla prakticky všude tam, kde je po něm poptávka a umožňují to technické a bezpečnostní požadavky.

Tabulka 4-1 Přehled teplotních požadavků a energetická náročnost možných využití jaderného tepla

Využití:		Minimální teplota:	Optimální teplota:	Energie pro výrobu/zpracování:
		$t_{\min}$	$t_{\text{opt}}$	Q
		(°C)	(°C)	(kWh)
Výroba vodíku	Termochemické dělení vody	850	900	83,582/kg
	Parní perforace metanu	750	950	21,94/kg
	Vysokoteplotní parní elektrolýza	200	950	33,6/kg
Ropa	Rafinace ropy	200	550	850/tunu
	Těžba ropy z dehtového písku	200	400	805,5/barel
Centrální vytápění		120	150	x
Výroba D2O		30	130	8300/kg
Odsolování	MFS	100	120	0,0135-0,0256/kg
	MED	65	100	0,05/kg

## 4.1 Výběr projektů SMR a jejich potenciálních průmyslových aplikací

V rámci přípravy výstavby SMR na území ČR byla uzavřena memoranda o spolupráci s několika výrobci. Podrobnosti o SMR nabízených těmito výrobci jsou uvedeny v kapitolách 3.1 až 3.7. Z těchto projektů byly pak vybrány tři projekty s nejvyšším potenciálem výstavby na našem území. Jedná se o BWRX-300 od společnosti GE Hitachi, UK SMR od společnosti Rolls Royce a AP300 od společnosti Westinghouse. Jedná se tedy o nejčastěji používané a vodou chlazené reaktory.

V kontrastu s tím byly pro porovnání v rámci této práce zvoleny také tři vysokoteplotní reaktory, zmiňované v [101]. Tedy Xe-100 od společnosti X-energy, chlazený heliem a reaktory ARC-100 a Natrium od společností ARC Clean Technology a TerraPower, oba chlazené sodíkem. Přesto, že potenciál jejich reálného nasazení je relativně malý, stále mohou poskytovat značný přínos, zejména právě pro průmyslová využití procesního tepla v procesech, které vyžadují konzistentní dodávku tepelné energie při vysoké teplotě. Důležité parametry pro tvorbu modelu využití procesního tepla pro vybrané reaktory jsou uvedeny v tabulce 4-2.

Tabulka 4-2 Parametry vybraných SMR

Projekt	Teplota primárního okruhu	Tepelný výkon	Elektrický výkon	Tepelná energie za hodinu	Poměr tepelného a elektrického výkonu SMR
	$t_{\text{prim}}$	$P_{\text{tep}}$	$P_{\text{el}}$	$Q_{\text{tep}}$	$P_{\text{tep,SMR}}/P_{\text{el,SMR}}$
	(°C)	(MW <sub>tep</sub> )	(MW <sub>el</sub> )	(GJ)	(-)
BWRX-300	288	870	290	3132	3,000
UK SMR	325	1358	470	4888,8	2,889
AP300	324	990	300	3564	3,300
Xe-100	750	200	80	720	2,500
ARC-100	510	286	100	1029,6	2,860
Natrium	700	834	345	3002,4	2,417

Jako místa, na kterých by bylo možné v budoucnu využít SMR jako zdroj tepla, byly vybrány tři lokality se čtyřmi potencionálními odběrateli. Konkrétně se jedná o Kralupy nad Vltavou, kde se nachází ropná rafinerie společnosti ORLEN a společnost SYNTHOS Kralupy a.s., která se zaměřuje především na výrobu plastových výrobků. [102] Dále lokalita Neratovice, na jejímž území se nachází společnost SPOLANA, zabývající se především výrobou PVC výrobků a různých druhů chemikálií, jakými jsou například hydroxid sodný, kyselina chlorovodíková, kyselina sírová a jiné. [103] Třetí lokalitou je pak Litvínov, kde se nachází rafinerie společnosti ORLEN.

## 4.2 Odhad tepelné náročnosti a specifikace teplotních a tlakových parametrů pro průmyslové odběratele

Vzhledem k omezenému množství veřejně dostupných informací o požadavcích na množství tepelné energie vyžadované jednotlivými odběrateli je nutné stanovit tuto hodnotu podle informací, které zjistit možné je. Tyto odhady slouží pouze k hrubému určení nároků jednotlivých spotřebitelů a od reálných hodnot se mohou lišit mimo jiné i tím, že někteří tito odběratelé mohou využívat celou řadu opatření pro snížení spotřeby tepelné energie, jakými může být například zachytávání vlastního odpadního tepla, úprava jednotlivých parametrů procesů využívajících teplo, nebo v případě rafinérií, pálení vlastních odpadních produktů, které by jinak neměly jiné využití pro následné zpracování nebo prodej.

### 4.2.1 Rafinérie

Zařízení společnosti ORLEN pro zpracování ropy v Kralupech nad Vltavou a Litvínově využívají teplo pro oddělení jednotlivých ropných produktů a jejich následnou úpravu. Odhad jejich tepelné spotřeby pak lze provést za pomoci dostupných informací

o kapacitách zpracování ropy jednotlivými rafinériemi za jeden rok. V případě rafinérie v Kralupech nad Vltavou se jedná o 3,3 milionu tun ropy, kdežto rafinérie v Litvínově má celkovou kapacitu zpracování 5,4 milionů tun ropy. [104] [105]

Jak již bylo zmíněno v rámci kapitoly 2.4, ke zpracování 1 tuny ropy je zapotřebí zhruba 850 kWh<sub>tep</sub>. Za předpokladu nepřetržitého provozu rafinérií tedy podle vzorce

$$Q_{tep,r} = m_{r,r} \cdot \frac{Q_{tep}}{m_r} \quad (4.1)$$

kde  $Q_{tep,r}$  představuje množství tepelné energie spotřebované rafinérií v průběhu jednoho roku,  $m_{r,r}$  představuje hmotnost ropy zpracované danou rafinérií v průběhu celého roku a zlomek  $\frac{Q_{tep}}{m_r}$  představuje množství tepelné energie potřebné ke zpracování jedné tuny ropy, tedy již zmíněných 850 kWh<sub>tep</sub>.

Hodnoty získané z tohoto výpočtu jsou následně pro účely dalších výpočtů přepočítány na tepelnou energii vyžadovanou jednotlivými rafinériemi v průběhu jedné hodiny. Výsledná hodnota je tedy podělena hodnotou 8 760, což je počet hodin v jednom kalendářním roce. Poslední úpravou takto odhadnuté hodnoty tepelné energie je její převod na GJ, a to z důvodu následného využívání těchto hodnot v kalorimetrických rovnicích dále v této práci.

Dalšími podstatnými parametry teploty látky, v tomto případě páry, jsou tlak a teplota. Tlak, pod kterým je pára v rafinériích využívána, se podle [107] pohybuje okolo 1,72 barů. Teploty páry na vstupu a výstupu tohoto procesu jsou voleny na základě hodnot uvedených v kapitole 2.4, tedy vstupní teplota do procesu 550 °C a teplota na výstupu z procesu 150 °C.

Posledním parametrem, který je důležitý pro budoucí výpočty, je měrná tepelná kapacita páry při daném tlaku a teplotě. Jako teplota zde byla použita střední hodnota teplot na vstupu a výstupu rafinérie, tedy průměrná hodnota těchto dvou teplot. V tomto případě se tedy jedná o teplotu 350 °C. Pro výpočet přesné hodnoty měrné tepelné kapacity bylo zapotřebí provést lineární interpolaci mezi různými hodnotami tlaku, neboť použité tabulky neuvádějí měrnou tepelnou kapacitu páry pro tlak 1,72 barů. Výpočet musel být tedy proveden skrze

$$c = c_0 + (p - p_0) \cdot \frac{c_1 - c_0}{p_1 - p_0} \quad (4.2)$$

kde  $c$  značí hledanou hodnotu měrné tepelné kapacity páry,  $c_0$  měrnou tepelnou kapacitu páry při známé hodnotě nižšího tlaku,  $c_1$  měrnou tepelnou kapacitu páry při známé hodnotě vyššího tlaku,  $p_0$  a  $p_1$  známé hodnoty nižšího a vyššího tlaku a  $p$  hodnotu tlaku, pro který je počítána hledaná měrná tepelná kapacita. Konkrétní hodnoty pro tento výpočet jsou uvedeny v tabulce v příloze A jejíž hodnoty jsou brány ze zdroje [106].

#### 4.2.2 Chemický průmysl

Pod pojmem chemický průmysl jsou v tomto případě uvažována zařízení společnosti SYNTHOS Kralupy a.s. a SPOLANA. Pro odhad spotřeby tepelné energie těchto zařízení bylo použito informací z [108], kde jsou udávány hodnoty BTU (British thermal unit) na dolar hodnoty chemického výrobku v USA, Kanadě a Rusku v roce 2015. Udává tedy, kolik BTU bylo potřeba k vytvoření chemického výrobku s hodnotou jednoho dolaru. Ze tří zmiňovaných států se na nejnižší hodnotě BTU/\$ drží USA s 22 000 BTU/\$, dále Kanada 68 000 BTU/\$ a Rusko s 98 000 BTU/\$. Z těchto dostupných dat byla odhadnuta hodnota pro naše podmínky na 60 000 BTU/\$.

Pro upřesnění byla tato hodnota přepočítána skrze inflaci na současnou hodnotu dolaru pro rok 2024 skrze

$$\frac{BTU}{\$_{2015}} \cdot \frac{\$_{2015}}{\$_{2024}} \quad (4.3)$$

kde  $\frac{BTU}{\$_{2015}}$  vyjadřuje hodnotu BTU/\$ pro rok 2015 a  $\frac{\$_{2015}}{\$_{2024}}$  změnu hodnoty dolaru mezi lety 2015 a 2024. Výsledkem tohoto výpočtu je pak současná hodnota 79 200 BTU/\$. Aby bylo možno počítat s touto hodnotou, je nutné ji převést do soustavy SI. To je možné skrze poměr mezi BTU a Wh, který má hodnotu 0,293 [109]. Přepočet je pak prováděn skrze

$$\frac{Q}{\$_{2024}} = \frac{BTU}{\$_{2024}} \cdot 0,293 \quad (4.4)$$

Posledním krokem úpravy této hodnoty je převod dolarů na koruny, přičemž je použit kurz ke dni 19.4. 2024, 1 \$ = 23,707 Kč, [110] tedy

$$\frac{Q}{\$_{2024}} \cdot \frac{1}{23,707} \quad (4.5)$$

Výsledná hodnota pro odhady energetické náročnosti uvažovaných odběratelů je 983,676 Wh/Kč.

Společnost SPOLANA v roce 2019 vykázala výnosy ze svých chemických výrobků v rámci závodu Kaprolaktam 2 187 389 000 Kč. [111] Za předpokladu neměnných výnosů mezi rokem 2019 a současností a započítání průměrné meziroční inflace 6,8 % se provádí převod daného výnosu na současnou hodnotu skrze vzorec

$$C_{2024} = C_{2019} \cdot (1 + i)^n. \quad (4.6)$$

V tomto vzorci značí  $C_{2024}$  a  $C_{2019}$  peněžní hodnotu pro dané roky,  $i$  průměrnou roční míru inflace mezi danými roky a  $n$  počet let. Odhad současných výdělků společnosti SPOLANA ze závodu Kaprolaktam za letošní rok je 3 039 361 006 Kč. Obdobným výpočtem byly odhadnuty i výnosy ze závodu společnosti SPOLANA PVC, kdy přepočtená hodnota výnosů z počátečních 1 470 808 000 Kč na současnou hodnotu je 2 043 676 951 Kč. Jelikož se dají výdělky z výroby ostatních výrobků označit za

minimální, je možné je zanedbat. Tudíž celkové odhadnuté výdělky této společnosti činí 5 083 037 957 Kč.

Díky takto získaným hodnotám lze již provést konečný odhad tepelné spotřeby společnosti SPOLANA, a to skrze

$$C_{2024} \cdot \frac{Q}{K\check{c}} \quad (4.7)$$

kdy dosazením hodnot je získána hodnota 5 000 GWh ročně.

Stejně výpočty pak byly aplikovány i na společnost SYNTHOS, jejíž celkové výnosy z chemických výrobků pro rok 2022 byly 16 440 824 000 Kč. [113] Celkové roční nároky na tepelnou energii by při použití této metody činily 18 226 GWh. Vzhledem k vysoké hodnotě tohoto odhadu byla provedena korekce a dále je tak počítáno s tím, že celková roční spotřeba tepelné energie je totožná se společností SPOLANA, tedy 5 000 GWh.

Vzhledem k velikosti zařízení obou společností u nich lze předpokládat nepřetržitý provoz. Proto při přepočtu na hodinový požadavek tepelné energie je nutno vydělit výslednou hodnotu počtem hodin v roce, tedy hodnotou 8 760, a nově získanou hodnotu opět přepočítat na GJ pro následné použití.

Pára používaná jako teplonosná látka bývá v chemickém průmyslu natlakovaná na 5 barů. Teploty byly však pro jednotlivé závody odhadovány, kvůli rozdílným technologickým nárokům v daných zařízeních, odděleně.

Vstupní teplota do zařízení společnosti SPOLANA byla stanovena na hodnotu 450 °C, neboť se jedná o teplotu nutnou pro výrobu kyseliny sírové. Výstupní teplota pak byla stanovena podle nejnižší dohledatelné teploty vyžadované při výrobě jiného produktu této společnosti, konkrétně se jedná o teplotu potřebnou pro výrobu hydroxidu sodného, tedy 100 °C.

Pro závod společnosti SYNTHOS pak bylo uvažováno, že teplota páry na vstupu je 300 °C, což je nejvyšší teplota požadovaná při zpracovávání plastů. [114] Jako výstupní teplota byla poté, na základě informací o běžném rozdílu mezi vstupní a výstupní teplotou technologických procesů, zvolena teplota 255 °C.

Stejně jako v případě rafinérií je i zde pro přesný výpočet nutné dopočítat skrze lineární interpolaci přesnou hodnotu měrné tepelné kapacity páry. V tomto případě je nutné ji dopočítávat pro střední teplotu, která není tabulkovou hodnotou v žádném z těchto zařízení. Nicméně není zapotřebí ji přepočítávat pro hodnoty tlaku, neboť 5 barů, při kterých je pára využívána v těchto zařízeních, tabulkovou hodnotou je. Lineární interpolace pro tento přepočet se tedy v tomto případě provádí skrze

$$c = c_0 + (t - t_0) \cdot \frac{c_1 - c_0}{t_1 - t_0} \quad (4.8)$$

kde  $t$  značí teplotu, pro kterou je hledaná měrná tepelná kapacita, a  $t_0$  a  $t_1$  představují nejbližší nižší a vyšší tabulkové hodnoty teplot. Konkrétní hodnoty použité pro výpočet lze nalézt v příloze A.

### 4.3 Optimalizace parametrů páry z SMR a výpočet hmotnostních průtoků pro průmyslová využití

V rámci schopnosti dodávky tepla do průmyslových procesů je uvažováno, že jednotlivá SMR jsou schopna dodat páru o teplotě shodné s teplotou na jejich primárním chladicím okruhu. Avšak vzhledem k tomu, že ne všechna vybraná SMR jsou schopna dosáhnout požadovaných teplot, je nutné optimalizovat teplotu dané páry tak, aby bylo možno ji použít.

Aby bylo možné určit energii potřebnou pro zvýšení parametrů teplotnosné látky, je nutné znát hmotnost kapaliny, kterou je potřeba ohřát, za zvolenou časovou jednotku, v tomto případě jednu hodinu. K této hodnotě se lze dopočítat skrze dříve odhadnuté parametry teplotnosné látky pro různé průmyslové aplikace dosazením do upraveného vzorce pro výpočet energie z teplotního rozdílu

$$Q = m \cdot c \cdot (t_1 - t_2), \quad (4.9)$$

kde  $Q$  označuje množství energie potřebné pro daný proces nebo odběratele,  $m$  je hmotnost páry,  $c$  je měrná tepelná kapacita a  $t_1$  a  $t_2$  označují teploty na vstupu a výstupu z daného procesu. Úprava tohoto vzorce pro zjištění hmotnosti páry má tedy tvar

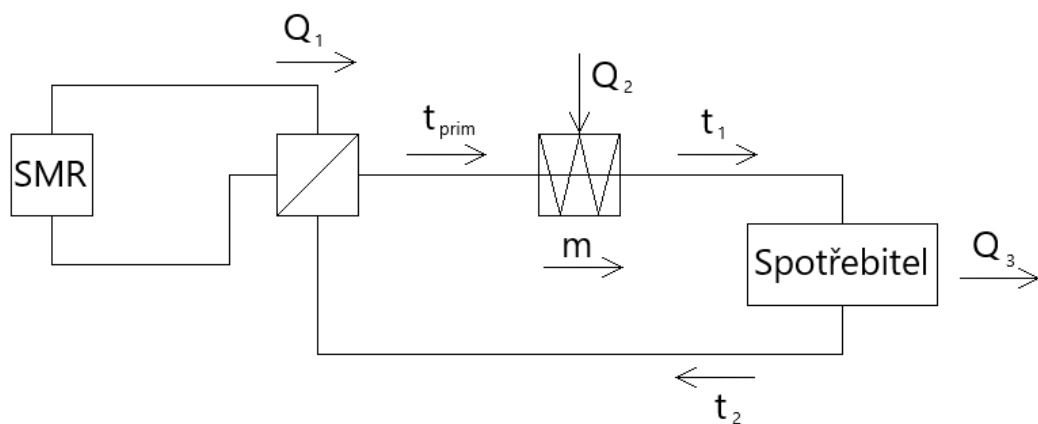
$$m = \frac{Q}{c \cdot (t_1 - t_2)} \quad (4.10)$$

Pro vybrané průmyslové spotřebitele jsou všechny příslušné hodnoty uvedeny v tabulce 4-3.

Tabulka 4-3 Požadavky na parametry páry jednotlivých spotřebitelů

Spotřebitel	Poptávaná tepelná energie	Tlak páry	Teplota na vstupu	Teplota na výstupu	Střední teplota	Měrná tepelná	Hmotnost páry
	Q	p	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>s</sub>	c	m
	(GJ)	(bar)	(°C)	(°C)	(°C)	(kJ·kg <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> )	(kg)
Rafinerie Kralupy n. V.	1152,0	1,72	550	150	350	2,0468	1407047
Rafinerie Litvínov	1886,4	1,72	550	150	350	2,0468	2304039
SYNTHOS	2055,6	5	300	255	277	2,0718	22048992
SPOLANA	2055,6	5	450	100	275	2,0723	2834186

Obrázek 2 představuje zjednodušené schéma odběru tepla z SMR pro využití v rámci vybraných průmyslových zařízení se zapojením přehřevu dodávané páry. Zde  $Q_1$  a  $Q_2$  představují tepelnou energii dodanou do procesu,  $Q_3$  tepelnou energii, kterou si z procesu spotřebitel odebere pro vlastní využití,  $t_s$  značí teplotu primárního okruhu SMR,  $t_1$  je teplota na vstupu do procesu,  $t_2$  je teplota na výstupu z procesu.



Obrázek 2 Náhradní schéma dodávky procesního tepla spotřebiteli

Ze známých hodnot pro přihřev, tedy teploty na vstupu a výstupu, a hmotnosti páry lze dopočítat, jaký výkon je potřeba dodat pro zvýšení teploty páry jdoucí z výměníku tepla s primárním okruhem daného SMR na teplotu požadovanou daným odběrem. Měrná tepelná kapacita byla opět počítána skrze lineární interpolace pomocí vzorců 4.2 a 4.8, tak aby odpovídaly požadovanému tlaku a průměrné teplotě přihřevu. Konkrétní hodnoty, podle kterých byl výpočet prováděn, jsou uvedeny v příloze A. Pro získání hodnoty energie potřebné pro přihřev je nutné tyto hodnoty dosadit do vzorce 4.9. Takto vypočítané hodnoty jsou pak uvedeny v tabulce 4-4.

Tabulka 4-4 Energie potřebná pro přihřev teplotnosné látky

Spotřebitel	Poptávaná tepelná energie $Q_3$ (GJ)	Energie pro přihřev					
		$Q_2$					
		(GJ)					
		BWRX-300	UK SMR	AP300	Xe-100	ARC-100	Natrium
Rafinerie Kralupy n. V.	1152	769,19	663,98	666,84	x	121,32	x
Rafinerie Litvínov	1886,4	1259,55	1087,27	1077,98	x	198,66	x
SYNTHOS	2055,6	547,59	x	x	x	x	x
SPOLANA	2055,6	957,12	741,05	746,89	x	x	x

Aby bylo možné zjistit kolik tepelné energie je odebíráno přímo z SMR, je zapotřebí využít kalorimetrickou rovnici

$$Q_{\text{dodaná}} = Q_{\text{spotřebovaná}} \quad (4.11)$$

Pro správné použití této rovnice v daném výpočtu je nutné rozumět, které komponenty procesu energii do systému dodávají a které ji spotřebovávají. Jelikož je již známé odebírané množství tepelné energie z procesu i množství energie potřebné pro přihřev páry, lze jednoduchou úpravou zjistit, jaké množství tepelné energie je odebíráno přímo z SMR. Přesná podoba této rovnice je tedy

$$Q_1 = Q_3 - Q_2, \quad (4.12)$$

příčemž hodnoty takto získané jsou uvedeny v tabulce 4-5.

Tabulka 4-5 Tepelná energie dodaná SMR

Spotřebitel	Poptávaná tepelná energie	Energie dodaná SMR					
		$Q_1$					
	$Q_3$	(GJ)					
		(GJ)	BWRX-300	UK SMR	AP300	Xe-100	ARC-100
Rafinerie Kralupy n. V.	1152	382,81	488,02	485,16	1152	1030,68	1152
Rafinerie Litvínov	1886,4	626,85	799,13	808,42	1886,4	1687,74	1886,4
SYNTHOS	2055,6	1508,01	2055,6	2055,6	2055,6	2055,6	2055,6
SPOLANA	2055,6	1098,48	1314,55	1308,71	2055,6	2055,6	2055,6

Porovnáním hodnot tepelných výkonů požadovaných jednotlivými spotřebiteli v tabulce 4-5 a tepelných výkonů jednotlivých SMR v tabulce 4-2 si lze povšimnout, že některé z vybraných SMR nejsou schopny dodat požadované množství tepelné energie. Konkrétně se pak jedná o SMR od společnosti X-energy a ACR-100. Pro plné pokrytí tepelných požadavků jednotlivých spotřebitelů je tedy nezbytné v daných lokalitách umístit vícero SMR. Toto řešení je pro skutečnou realizaci uvažováno v některých projektech SMR uvedených v rámci kapitoly 3 a společností X-energy pro pokrytí tepelných požadavků továrny společnosti DOW v lokalitě Seadrift. [115] Lze tedy předpokládat, že i pro ostatní projekty SMR existují plány na výstavbu vícero reaktorů v jedné lokalitě pro pokrytí místních požadavků na dodávku tepelné nebo elektrické energie. Konkrétní počet SMR pro pokrytí potřeby dodávky tepelné energie  $Q_1$  je uveden v tabulce 4-6.

Tabulka 4-6 Počet SMR potřebných pro pokrytí požadavků na dodávku tepelné energie  $Q_1$

Spotřebitel	BWRX-300	UK SMR	AP300	Xe-100	ARC-100	Natrium
Rafinerie Kralupy n. V.	1	1	1	2	2	1
Rafinerie Litvínov	1	1	1	3	2	1
SYNTHOS	1	1	1	3	2	1
SPOLANA	1	1	1	3	2	1

## 4.4 Využití vodíku k optimalizaci parametrů páry a možnosti jeho výroby

Jak již bylo zmíněno výše, většina uvažovaných jaderných reaktorů nemá dostatečný teplotní potenciál pro splnění požadavků vybraných odběratelů. Teplota dodávané páry tak musí být dodatečně zvyšována, což vede k tomu, že ne všechna tepelná energie, kterou vyžadují odběratelé, je dodávána přímo skrze tepelné výměníky s primárním chladícím okruhem reaktoru. Zbylá část tepelné energie tak musí být páře dodávána ze zdroje s dostatečným teplotním potenciálem.

Většina současných průmyslových odvětví, ve kterých je požadavek na teplo v rámci jejich výrobních procesů, využívá plynové kotle pro pokrytí svých nároků na tepelnou energii. Pro úplné pokrytí nároků na tepelnou energii lze tak jaderné reaktory při přihřevu využít díky jejich potenciálnímu využití výroby vodíku. Kotle spalující zemní plyn jsou potenciálně schopny spalovat také vodík, pokud jsou na nich provedeny příslušné úpravy. Tato varianta by tedy plně zabezpečila požadavky na dodávku tepla, přičemž by byly zároveň využity v současnosti využívané plynové kotle.

Pro zjištění množství vodíku potřebného pro přihřev páry vybraným odběratelům při použití daných SMR jsou použity údaje z tabulky 4-4 a znalosti výhřevnosti vodíku. Ta se pohybuje v závislosti na metodě spalování od 33,33 kWh/kg do 39,39 kWh/kg. [116] V rámci této diplomové práce je uvažováno přímé spalování vodíku, a tudíž je pro další výpočty uvažováno s hodnotou 39,39 kWh/kg, tedy 141,804 MJ/kg. Vzhledem k tomu, že je známo množství energie potřebné pro výrobu vodíku skrze zvolené metody uvedené v kapitole 2.5, je ke zjištění energetické náročnosti pro jeho výrobu nutné zjistit, jaká je hmotnost vodíku potřebného k uspokojení energetických požadavků vybraných odběratelů. Tuto hodnotu pak lze získat pomocí

$$m_h = \frac{Q_2}{Q_i} \quad (4.13)$$

kde  $m_h$  značí hmotnost potřebného vodíku,  $Q_2$  energii potřebnou pro přihřev teplotnosné látky a  $Q_i$  označuje uvažovanou výhřevnost vodíku. Vypočtené hodnoty pro jednotlivé případy jsou uvedeny v tabulce 4-7.

Tabulka 4-7 Potřebné množství vodíku pro přehřev páry

Spotřebitel	Hmotnost vodíku					
	$m_h$					
	(kg)					
	BWRX-300	UK SMR	AP300	Xe-100	ARC-100	Natrium
Rafinerie Kralupy n. V.	5424,3	4682,4	4702,6	x	855,6	x
Rafinerie Litvínov	8882,3	7667,4	7601,9	x	1401,0	x
SYNTHOS	3861,6	x	x	x	x	x
SPOLANA	6749,6	5225,9	5267,1	x	x	x

Jako potencionální metody, skrze které je možné získávat vodík za využití jaderných reaktorů, byly zvoleny vysokoteplotní parní elektrolýza, parní perforace metanu a termochemické dělení vody. Vysokoteplotní parní elektrolýza byla zvolena díky svému potenciálu pro budoucí výrobu vodíku, své vysoké účinnosti a téměř nulovým emisím. Termochemické dělení vody, v tomto případě uvažován s třístupňovým procesem, z důvodu nižších nároků na teploty. Tato metoda byla vybrána, neboť v původních fázích svého návrhu bylo předpokládáno, že bude jako zdroj tepla využívat vysokoteplotní jaderné reaktory a stejně jako vysokoteplotní parní elektrolýza má i tato metoda téměř nulové emise. Jako poslední metoda byla zvolena parní perforace metanu, a to z toho důvodu, že se jedná o metodu, skrze kterou je v současnosti získáváno až 96 % veškerého vyrobeného vodíku. Porovnání základních požadavků jednotlivých metod lze pozorovat v tabulce 4-1, přičemž hodnoty v ní uvedené vychází z informací a zdrojů uvedených v kapitole 2.5.

#### 4.4.1 Vysokoteplotní parní elektrolýza

Výroba vodíku skrze proces vysokoteplotní parní elektrolýzy poskytuje oproti zbylým vybraným metodám výroby vodíku s využitím procesního tepla značnou výhodu ve značně nižších požadavcích na teplotu. Oproti ostatním zvoleným procesům pro získávání vodíku může vysokoteplotní parní elektrolýza pracovat i za značně nižších teplot s menším konečným dopadem na celkovou efektivitu výroby.

Pro zjištění potřebného množství energie, kterou je potřeba dodat do tohoto procesu  $Q_h$ , je nutné využít informace potřebného množství vodíku pro jednotlivé případy z tabulky 4-7 a následně je vynásobit potřebným množstvím energie pro výrobu jednoho kilogramu vodíku. Vzorec pro zjištění celkového množství má tedy podobu

$$Q_h = \frac{Q}{m} \cdot m_h \quad (4.14)$$

Použitím tohoto vzorce je tudíž získáno celkové množství energie potřebné pro výrobu požadovaného množství vodíku pro jednotlivé případy, přičemž konkrétní výsledky lze pozorovat v tabulce 4-8.

Tabulka 4-8 Požadované množství energie na výrobu vodíku skrze vysokoteplotní parní elektrolýzu pro jednotlivé případy

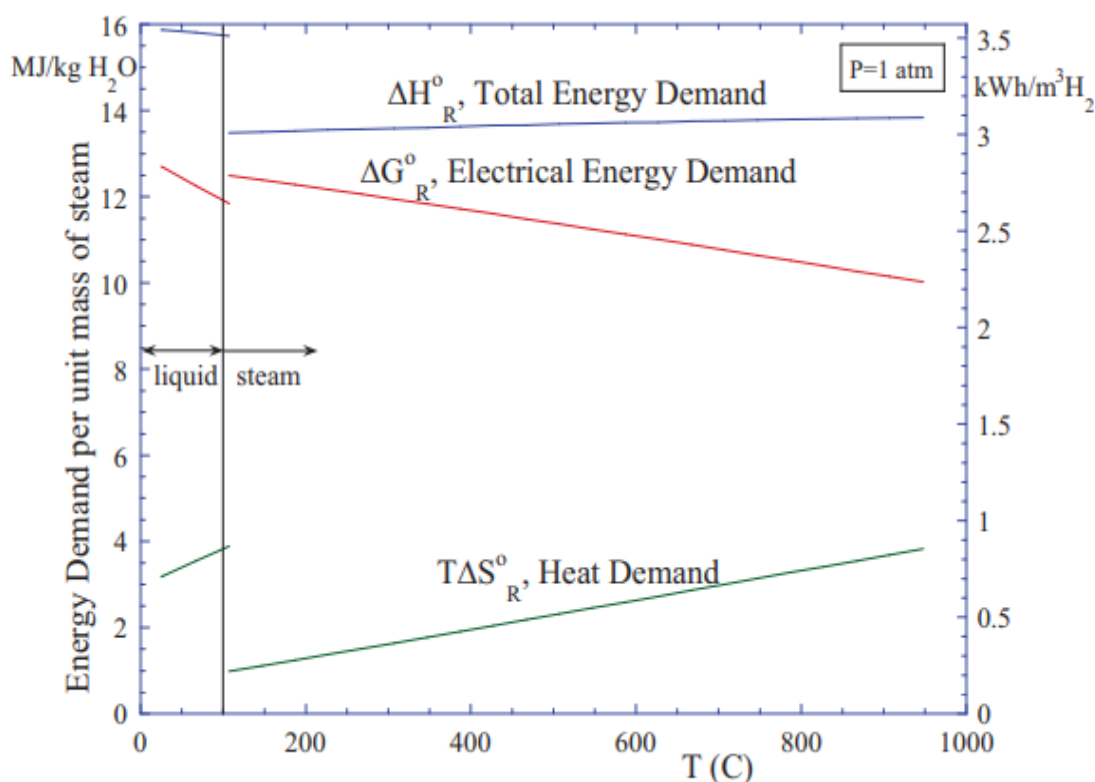
Odběratel	Energie pro výrobu požadovaného množství vodíku					
	$Q_{h,vpe}$					
	(GJ)					
	BWRX-300	UK SMR	AP300	Xe-100	ARC-100	Natrium
Rafinerie Kralupy n. V.	656,1	566,4	568,8	x	103,5	x
Rafinerie Litvínov	1074,4	927,5	919,5	x	169,5	x
SYNTHOS	467,1	x	x	x	x	x
SPOLANA	816,4	632,1	637,1	x	x	x

Energie potřebná pro výrobu daného množství vodíku je myšlena jako celkové množství energie a skládá se ze součtu elektrické a tepelné energie. Poměr mezi těmito dvěma složkami je poté závislý na teplotě, při níž je tento proces uskutečňován. To lze pozorovat na obrázku 3, který byl i použit pro získání potřebného poměru těchto dvou složek při použití jednotlivých reaktorů. Na tomto obrázku lze sledovat, že se stoupající teplotou klesá požadavek na potřebné množství elektrické energie, což činí tento proces z hlediska dodávané energie méně energeticky náročný, neboť pro současné velké zdroje je energeticky méně náročné dodat větší množství tepelné energie než elektrické.

Jako teplota tepelnosné látky byla opět zvolena provozní teplota primárního okruhu daného reaktoru, přičemž na výstupu tohoto procesu je uvažována teplota o 15 % nižší, než je teplota vstupní. Jako referenční teplota, pro níž byl odečítán poměr potřebné tepelné a elektrické energie z obrázku 3 je pak uvažována střední teplota, tedy aritmetický průměr vstupní a výstupní teploty. Hodnoty z tohoto obrázku lze pro výpočet použít přímo, neboť se jedná o poměry potřebné energie na výrobu určitého množství vodíku, byť v jiných jednotkách, než je použito v následujících výpočtech.

Pro budoucí nasazení vysokoteplotní parní elektrolýzy se předpokládá že bude pracovat za výrazně vyšších tlaků, než je zde uvažováno. Lze tedy prohlásit, při reálném nasazení, bude mít vysokoteplotní parní elektrolýza vyšší účinnost, než se kterou je zde počítáno.

Zjednodušené náhradní schéma odběru tepelné energie odběrateli, při využití vysokoteplotní parní elektrolýzy pro výrobu vodíku za účelem optimalizace teploty tepelnosné látky a jednookruhovým reaktorem je znázorněno v příloze B.



Obrázek 3 Energetické požadavky pro výrobu vodíku skrze proces vysokoteplotní parní elektrolýzy při atmosférickém tlaku. Převzato z [48]

Veškeré zmíněné hodnoty, podle kterých byl určován poměr energetických nároků na výrobu vodíku, jsou uvedeny v tabulce 4-10, stejně tak jako hodnoty odečtené a hledaný poměr.

Tabulka 4-9 Teplotní parametry páry pro vysokoteplotní parní elektrolýzu a příslušný poměr tepelné a elektrické energie

SMR	Teplota páry při vstupu do procesu	Teplota páry na výstupu z procesu	Střední teplota	Elektrická energie pro výrobu vodíku	Tepelná energie na výrobu vodíku	Poměr energií
	$t_1$ (°C)	$t_2$ (°C)	$t_s$ (°C)	$Q_{el}$ (kWh)	$Q_{tep}$ (kWh)	$Q_{el}/Q_{tep}$ (-)
BWRX-300	288	244,8	266,4	2,70	0,35	7,714
UK SMR	325	276,25	300,6	2,65	0,37	7,162
AP300	324	275,4	299,7	2,65	0,37	7,162
Xe-100	x	x	x	x	x	x
ARC-100	510	433,5	471,8	2,55	0,50	5,100
Natrium	x	x	x	x	x	x

Pro výpočet potřebného množství tepelné a elektrické energie je vycházeno ze znalosti jejich poměru v celkovém množství energie potřebné pro výrobu dostatečného

množství vodíku v jednotlivých případech a znalosti toho, že celkové množství této energie se skládá ze součtu těchto dvou hodnot, tedy

$$Q_{h,vpe} = Q_{el,vpe} + Q_{tep,vpe} \quad (4.15)$$

Dále lze ze znalosti poměru odvodit

$$Q_{el,vpe} = \frac{Q_{el,vpe}}{Q_{tep,vpe}} \cdot Q_{tep,vpe} \quad (4.16)$$

Dosazením tohoto vzorce do vzorce předchozího je získán vzorec, v němž nyní figuruje pouze jedna neznámá hodnota, kterou je  $Q_{tep,vpe}$

$$Q_{h,vpe} = \frac{Q_{el,vpe}}{Q_{tep,vpe}} \cdot Q_{tep,vpe} + Q_{tep,vpe} \quad (4.17)$$

Vhodnou úpravou tohoto vzorce lze pak dojít k výslednému vzorci,

$$Q_{tep,vpe} = \frac{Q_{h,vpe}}{\frac{Q_{el,vpe}}{Q_{tep,vpe}} + 1} \quad (4.18)$$

ze kterého při dosazení příslušných lze získat hodnotu tepelné energie, jenž je v jednotlivých případech nutné dodat do tohoto procesu (viz. Tabulka 4-9).

Tabulka 4-10 Tepelná energie dodávaná do procesu vysokoteplotní parní elektrolýzy pro jednotlivé případy

Odběratel	$Q_{tep,vpe}$					
	(GJ)					
	BWRX-300	UK SMR	AP300	Xe-100	ARC-100	Natrium
Rafinerie Kralupy n. V.	75,293	69,391	69,690	x	16,965	x
Rafinerie Litvínov	123,292	113,628	112,657	x	27,781	x
SYNTHOS	53,602	x	x	x	x	x
SPOLANA	93,689	77,446	78,056	x	x	x

Díky nyní známé hodnotě potřebné tepelné energie lze snadnou úpravou vzorce 4.15 do tvaru

$$Q_{el,vpe} = Q_{h,vte} - Q_{tep,vpe}, \quad (4.19)$$

zjistit hodnotu potřebné elektrické energie, jejíž hodnoty jsou pro jednotlivé případy uvedeny v tabulce 4-11.

Tabulka 4-11 Elektrická energie dodávaná do procesu vysokoteplotní parní elektrolýzy pro jednotlivé případy

Spotřebitel	$Q_{el,vpe}$					
	(GJ)					
	BWRX-300	UK SMR	AP300	Xe-100	ARC-100	Natrium
Rafinerie Kralupy n. V.	580,83	496,99	499,13	x	86,52	x
Rafinerie Litvínov	951,11	813,82	806,87	x	141,68	x
SYNTHOS	413,50	x	x	x	x	x
SPOLANA	722,74	554,68	559,05	x	x	x

Aplikací tohoto výpočtu jsou tedy známy veškeré nároky na výrobu dostatečného množství vodíku pro pokrytí nároků na zvýšení teploty teplotnosné látky pro jednotlivé spotřebitele.

Dalším krokem je zjištění, jaký počet jednotlivých SMR je potřeba pro pokrytí nároků jednotlivých spotřebitelů na dodávku tepla se zapojením vodíku jakožto paliva pro optimalizaci parametrů páry. Aby bylo možné zjistit, kolik SMR je potřeba pro pokrytí těchto potřeb, je nutné provést součet všech nároků na tepelný výkon, tedy

$$Q_{tep,SMR} = Q_3 + Q_{tep,vpe} + Q_{el,vpe} \cdot \frac{P_{tep,SMR}}{P_{el,SMR}} \quad (4.20)$$

kde  $Q_{tep,SMR}$  označuje tepelnou energii, kterou jednotlivé SMR vydat, aby pokryly uvažovanou spotřebu,  $Q_3$  značí tepelnou energii přímo odebíranou jednotlivými spotřebiteli,  $Q_{tep,vpe}$  je tepelnou energií, kteroužto vyžaduje výroba vodíku,  $Q_{el,vpe}$  označuje elektrickou energii pro výrobu vodíku, která je zde pomocí poměru  $P_{tep,SMR}/P_{el,SMR}$ , uvedeného pro jednotlivá SMR v tabulce 4-2 přepočítána na tepelnou energii potřebnou k její výrobě. Takto vypočítané hodnoty jsou pro každý případ uvedeny v tabulce 4-12

Tabulka 4-12 Požadavky na tepelnou energii pro jednotlivé případy se započtením požadavků na tepelnou energii pro výrobu vodíku

Spotřebitel	Tepelná energie dodávaná SMR					
	$Q_{tep,SMR}$					
	(GJ)					
	BWRX-300	UK SMR	AP300	Xe-100	ARC-100	Natrium
Rafinerie Kralupy n. V.	2200,6	1993,4	2202,0	1152,0	1295,1	1152,0
Rafinerie Litvínov	3603,5	3264,2	3583,7	1886,4	2120,7	1886,4
SYNTHOS	2802,1	2055,6	2055,6	2055,6	2055,6	2055,6
SPOLANA	3360,4	2994,7	3231,6	2055,6	2055,6	2055,6

Výpočet pro zjištění potřebného počtu SMR spočívá ve znalosti tepelné energie vydané danými SMR za vybraný časový úsek. Tato hodnota je pro každé SMR uvedena v tabulce 4-2. Počet potřebných SMR je následně počítán za pomoci vzorce

$$n_{SMR} = \frac{Q_{tep,SMR}}{Q_{tep}} \quad (4.21)$$

Výslednou hodnotu je poté nutné zaokrouhlit nahoru, čímž je získán konečný počet SMR uvedený v tabulce 4-13, nutný k úplnému pokrytí tepelných požadavků jednotlivých odběratelů.

Tabulka 4-13 Počet jednotlivých SMR pro pokrytí nároků na tepelnou energii jednotlivých vybraných odběratelů

Odběratel\SMR	BWRX-300	UK SMR	AP300	Xe-100	ARC-100	Natrium
Rafinerie Kralupy n. V.	1	1	1	2	2	1
Rafinerie Litvínov	2	1	2	3	3	1
SYNTHOS	1	1	1	3	2	1
SPOLANA	2	1	1	3	2	1

#### 4.4.2 Parní perforace metanu a termochemické dělení vody

Hlavní charakteristikou těchto metod, blíže popsanych v kapitolách 2.5.1 a 2.5.3, pro získávání vodíku je jejich požadavek na teplotu vstupní páry. Ta musí být výrazně vyšší než u předchozí řešené metody. V rámci této práce je uvažován dolní teplotní limit, při kterém je možné vodík pomocí těchto procesů získávat, jako teplota výstupní páry z těchto procesů.

Vybrané SMR, u kterých je nutno provádět přihřev pro uspokojení potřeb vybraných odběratelů, dosahují výrazně nižších teplot, než by vyžadovaly tyto procesy pro získávání vodíku. Pokud by byl v těchto případech použit přihřev páry, mohlo by dojít ke zpětnému toku energie do primární smyčky reaktoru, neboť by byla vstupní teplota na tepelném výměníku vyšší než teplota primárního okruhu. To by ve výsledku, krom možných negativních následků na chod reaktoru, také znamenalo, že by reaktor energii do tohoto procesu nedodával, ale naopak by ji odebíral.

Z tohoto důvodu nelze využít tepelnou energii, vytvářenou SMR přímo pro výrobu vodíku těmito způsoby. Pokud je tedy požadavek na úplné pokrytí tepelných nároků vybraných odběratelů, je nutno využít k tomu jiný způsob ohřevu páry. Jako alternativní možnost tohoto ohřevu byl zvolen elektrický ohřev. Tato metoda není v průmyslu pro ohřev páry na takto vysoké teploty využívána, nicméně se jedná o jedinou alternativní možnost, jakou mohou být využity vybrané SMR pro dosažení takto vysokých teplot.

Prvním krokem ke zjištění požadavků na dodávku energie SMR do těchto proces je výpočet potřebného množství energie, kterou je potřeba dodat do vybraných způsobů výroby vodíku. K tomu je použit vzorec 4.14, přičemž je do tohoto vzorce dosazována

vždy příslušná hodnota potřebné energie pro výrobu jednoho kilogramu vodíku uvedená v tabulce 4-1. Výsledné hodnoty potřebné energie při využití parní perforace metanu a termochemického dělení vody pro získání požadovaného množství vodíku jsou uvedeny v tabulce 4-14 a tabulce 4-15.

Tabulka 4-14 Požadované množství energie na výrobu vodíku skrze parní perforaci metanu pro jednotlivé případy

Spotřebitel	Energie pro výrobu požadovaného množství vodíku					
	$Q_{h-ppm}$					
	(GJ)					
	BWRX-300	UK SMR	AP300	Xe-100	ARC-100	Natrium
Rafinerie Kralupy n. V.	542,432	468,240	470,256	x	85,556	x
Rafinerie Litvínov	888,232	766,743	760,190	x	140,098	x
SYNTHOS	386,161	x	x	x	x	x
SPOLANA	674,959	522,588	526,706	x	x	x

Tabulka 4-15 Požadované množství energie na výrobu vodíku skrze termochemické dělení vody pro jednotlivé případy

Spotřebitel	Energie pro výrobu požadovaného množství vodíku					
	$Q_{h-tdv}$					
	(GJ)					
	BWRX-300	UK SMR	AP300	Xe-100	ARC-100	Natrium
Rafinerie Kralupy n. V.	1627,3	1404,7	1410,8	x	256,7	x
Rafinerie Litvínov	2664,7	2300,2	2280,6	x	420,3	x
SYNTHOS	1158,5	x	x	x	x	x
SPOLANA	2024,9	1567,8	1580,1	x	x	x

Elektrický ohřev mívá zpravidla vysokou účinnost pohybující se téměř na hranici 100 %. V rámci zde použitých výpočtů je pak uvažována účinnost elektrického ohřevu 90 %, kvůli omezením materiálů při takto vysokých teplotách a možných úniků tepla do okolí. Pro zjištění množství tepelné energie potřebné pro ohřev teplotně odolné látky je tedy nutné přepočítat hodnoty z tabulek 4-15 a 4-16 přes vzorec

$$Q_{el} = \frac{Q_h}{\eta} \quad (4.22)$$

kde  $\eta$  označuje zvolenou účinnost elektrického ohřevu. Takto vypočítané množství potřebné elektrické energie pro ohřev páry jsou uvedeny v tabulce 4-16 při využití parní perforace metanu a v tabulce 4-17 při využití termochemického dělení vody.

Tabulka 4-16 Požadované množství elektrické energie pro ohřev páry při využití parní perforace metanu

Spotřebitel	Požadované množství elektrické energie pro ohřev páry					
	$Q_{el,ppm}$					
	(GJ)					
	BWRX-300	UK SMR	AP300	Xe-100	ARC-100	Natrium
Rafinerie Kralupy n. V.	602,702	520,266	522,506	x	95,062	x
Rafinerie Litvínov	986,925	851,936	844,656	x	155,664	x
SYNTHOS	429,067	x	x	x	x	x
SPOLANA	749,955	580,654	585,229	x	x	x

Tabulka 4-17 Požadované množství elektrické energie pro ohřev páry při využití termochemického dělení vody

Spotřebitel	Požadované množství elektrické energie pro ohřev páry					
	$Q_{el,tdv}$					
	(GJ)					
	BWRX-300	UK SMR	AP300	Xe-100	ARC-100	Natrium
Rafinerie Kralupy n. V.	1808,1	1560,8	1567,5	x	285,2	x
Rafinerie Litvínov	2960,8	2555,8	2534,0	x	467,0	x
SYNTHOS	1287,2	x	x	x	x	x
SPOLANA	2249,9	1742,0	1755,7	x	x	x

Pro zjištění nároků kladených na vybraná SMR z hlediska výroby tepelné energie je potřeba využít upravenou podobu vzorce 4.20 ve tvaru

$$Q_{tep,SMR} = Q_3 + Q_{el,h} \cdot \frac{P_{tep,SMR}}{P_{el,SMR}} \quad (4.23)$$

kde  $Q_{el,h}$  označuje elektrickou energii potřebnou pro ohřev páry při využití řešených metod. Na toto místo jsou tedy dosazovány jednotlivé hodnoty  $Q_{el,ppm}$  a  $Q_{el,tdv}$  z tabulek 4-16 a 4-17. Výsledné hodnoty tohoto výpočtu jsou uvedeny v tabulkách 4-18 a 4-19.

Tabulka 4-18 Požadavky na tepelnou energii pro jednotlivé případy se započtením požadavků na tepelnou energii pro výrobu vodíku skrze parní perforaci metanu

Spotřebitel	Tepelná energie dodávaná SMR					
	$Q_{tep,SMR}$					
	(GJ)					
	BWRX-300	UK SMR	AP300	Xe-100	ARC-100	Natrium
Rafinerie Kralupy n. V.	2190,9	1991,3	2209,4	1152,0	1302,6	1152,0
Rafinerie Litvínov	3587,6	3260,7	3595,8	1886,4	2132,9	1886,4
SYNTHOS	2795,2	2055,6	2055,6	2055,6	2055,6	2055,6
SPOLANA	3348,3	2992,3	3240,0	2055,6	2055,6	2055,6

Tabulka 4-19 Požadavky na tepelnou energii pro jednotlivé případy se započtením požadavků na tepelnou energii pro výrobu vodíku skrze termochemické dělení vody

Spotřebitel	Tepelná energie dodávaná SMR					
	$Q_{tep,SMR}$					
	(GJ)					
	BWRX-300	UK SMR	AP300	Xe-100	ARC-100	Natrium
Rafinerie Kralupy n. V.	5807,1	4997,7	5658,0	1152,0	1846,3	1152,0
Rafinerie Litvínov	9509,2	8183,8	9170,5	1886,4	3023,3	1886,4
SYNTHOS	5369,6	2055,6	2055,6	2055,6	2055,6	2055,6
SPOLANA	7848,1	6347,7	7102,5	2055,6	2055,6	2055,6

Pro zjištění potřebného množství SMR k uspokojení tepelných nároků vybraných odběratelů je opět využit vzorec 4.21, přičemž je nutné znovu zaokrouhlit výsledek na nejbližší vyšší hodnotu. Potřebný počet jednotlivých typů reaktorů při použití parní perforace metanu na výrobu vodíku pro přehřev dodávané páry vybraným odběratelům je uveden v tabulce 4-20. Naproti tomu počet potřebných vybraných typů při využití termochemického dělení vody je uveden v tabulce 4-21.

Tabulka 4-20 Požadovaný počet SMR pro pokrytí nároků na tepelnou energii jednotlivých vybraných odběratelů s využitím parní perforace metanu

Odběratel\SMR	BWRX-300	UK SMR	AP300	Xe-100	ARC-100	Natrium
Rafinerie Kralupy n. V.	1	1	1	2	2	1
Rafinerie Litvínov	2	1	2	3	3	1
SYNTHOS	1	1	1	3	2	1
SPOLANA	2	1	1	3	2	1

Tabulka 4-21 Požadovaný počet SMR pro pokrytí nároků na tepelnou energii jednotlivých vybraných odběratelů s využitím termochemického dělení vody

Odběratel\SMR	BWRX-300	UK SMR	AP300	Xe-100	ARC-100	Natrium
Rafinerie Kralupy n. V.	2	2	2	2	2	1
Rafinerie Litvínov	4	2	3	3	3	1
SYNTHOS	2	1	1	3	2	1
SPOLANA	3	2	2	3	2	1

## 4.5 Využití elektrického ohřevu k optimalizaci parametrů páry

Jak již bylo zmíněno dříve, elektrický ohřev není v průmyslu běžně využívaný způsob výroby páry nebo případné úpravy jejích parametrů. V rámci této práce je však elektrický ohřev uvažován jako alternativa ke zvyšování parametrů páry pro jednotlivé uživatele skrze spalování vodíku vyráběného pomocí energie z vybraných SMR. Současně jsou systémy pro elektrický ohřev relativně konstrukčně jednoduchá zařízení oproti ostatním způsobům ohřevu, což by mohlo vést ke snadnější instalaci nového zařízení pro tento ohřev oproti ostatním možnostem.

Postup výpočtu je poté obdobný jako v případě elektrického ohřevu pro parní perforaci metanu a termochemické dělení vody. Pro zjištění potřebné elektrické energie k ohřevu teplotně nasycené látky je hodnota tepelné energie vyžadované zvolenými odběrateli, přepočítána přes zvolenou účinnost tepelného ohřevu skrze vzorec 4.22. Přičemž tohoto ohřevu je opět volena 90 %. Nároky na elektrickou energii pro přehřev v uvažovaných případech jsou uvedeny v tabulce 4-22.

Tabulka 4-22 Požadované množství elektrické energie pro optimalizaci parametrů páry

Spotřebitel	Elektrická energie pro přehřev s uvažovanou účinností 90 %					
	$Q_{2el}$					
	(GJ)					
	BWRX-300	UK SMR	AP300	Xe-100	ARC-100	Natrium
Rafinerie Kralupy n. V.	854,66	737,76	740,93	x	134,80	x
Rafinerie Litvínov	1399,5	1208,1	1197,8	x	220,74	x
SYNTHOS	608,43	x	x	x	x	x
SPOLANA	1063,5	823,39	829,88	x	x	x

Požadavek na výrobu požadovaného množství tepelné energie vybranými SMR lze zjistit dosazením do vzorce 4.23, který v sobě kombinuje nároky na odebíranou tepelnou energii odebíranou SMR a nároky na tepelnou energii vyžadovanou pro vytvoření

dostatečného množství elektrické energie pro uvažovaný přihřev. Do tohoto vzorce jsou tedy namísto hodnot  $Q_{el,h}$  dosazovány hodnoty  $Q_{2el}$  z tabulky 4-22. Takto vypočtené hodnoty jsou pak uvedeny v tabulce 4-23.

Tabulka 4-23 Nároky na tepelnou energii vyráběnou SMR pro pokrytí tepelných požadavků vybraných odběratelů

Odběratel	Tepelná energie potřebná pro pokrytí požadavků odběratelů					
	$Q_{tep,SMR}$					
	(GJ)					
	BWRX-300	UK SMR	AP300	Xe-100	ARC-100	Natrium
Rafinerie Kralupy n. V.	2946,8	2619,7	2930,2	1152,0	1416,2	1152,0
Rafinerie Litvínov	4825,3	4289,7	4761,0	1886,4	2319,0	1886,4
SYNTHOS	3333,3	2055,6	2055,6	2055,6	2055,6	2055,6
SPOLANA	4288,9	3693,6	4047,3	2055,6	2055,6	2055,6

Pro zjištění počtu vybraných SMR, který je potřeba pro pokrytí těchto nároků, je potřeba opět využít vzorec 4.21 a výsledné číslo zaokrouhlit nahoru. Při uvažování tohoto způsobu přehřevu dodávané páry jsou počty požadovaných SMR uvedeny v tabulce 4-24.

Tabulka 4-24 Požadovaný počet SMR pro pokrytí nároků na tepelnou energii jednotlivých vybraných odběratelů při uvažování elektrického přehřevu dodávané páry

Odběratel\SMR	BWRX-300	UK SMR	AP300	Xe-100	ARC-100	Natrium
Rafinerie Kralupy n. V.	1	1	1	2	2	1
Rafinerie Litvínov	2	1	2	3	3	1
SYNTHOS	2	1	1	3	2	1
SPOLANA	2	1	2	3	2	1

## 5. ZÁVĚR

Tato diplomové práce je zaměřena na tvorbu modelu využití procesního tepla v soustavě s malými modulárními reaktory. V rámci první části je prozkoumávána historie využití jaderného tepla od prvních jaderných reaktorů až po moderní vysokoteplotní plynem chlazené SMR IV generace. Ve druhé části jsou podrobně popsány současná i možná budoucí využití tepla z jaderných elektráren skrze celé teplotní spektrum. Následující část se zabývá podrobným popisem pokročilých projektů SMR.

Praktická část tohoto projektu, tedy kapitola 4, je zaměřena na samotný model soustavy zapojující procesní teplo z SMR do soustavy odběratele. SMR, na které se tato část zaměřuje, jsou vybrány projekty BWRX-300, UK SMR, AP300, Xe-100, ARC-100 a Natrium. Jako potencionální možní odběratelé procesního tepla byly zvoleny závody společností SPOLANA, SYNTHOS a rafinérie ORLEN v Kralupech nad Vltavou a Litvínově. Energetické nároky jednotlivých odběratelů byly odhadnuty za pomoci jejich zpracovatelských kapacit a ročních výdělků.

Pro většinu vodou chlazených reaktorů je nutné provést úpravu parametrů teplotnosné látky, neboť teplota páry, kterou jsou schopny předat odběrateli, je nižší než teplota požadovaná. Oproti tomu většina vysokoteplotních reaktorů je schopna dodat páru o dostatečné teplotě a není tedy potřeba dále upravovat její parametry.

Pro případy, kdy příhřev páry nutný je, byly porovnávány možnosti příhřevu pomocí vodíku vyráběného za pomoci energie vyprodukované jednotlivými SMR a příhřevu skrze teoretický elektrický ohřev. Jako možnosti výroby vodíku byly voleny parní perforace metanu, vysokoteplotní parní elektrolyza a termochemické dělení vody. Z těchto způsobů však pouze vysokoteplotní parní elektrolyza může pracovat za dodatečně nízkých teplot, aby mohlo být teplo z SMR použito přímo pro výrobu vodíku.

Porovnáním možností výroby vodíku potřebného pro úpravu parametrů páry vybraným odběratelům, bylo zjištěno, že nejméně energeticky náročnou možností je výroba vodíku skrze vysokoteplotní parní elektrolyzu. Podobně energeticky náročnou se ukázala možnost výroby vodíku skrze parní perforaci metanu. Aplikace této varianty způsobem, jak je navrhována v této práci, je nicméně nepravděpodobná. Prvním důvodem je, že průmyslová aplikace elektrického ohřevu páry není běžná. Dalším důvodem je, že by zbytečně docházelo ke zpracování zemního plynu na vodík, který by byl následně spalován v upravených kotlích, když lze přímo využít možnosti spalování zemního plynu v kotlích bez nutnosti jejich úpravy. Poslední varianta výroby vodíku, tedy skrze proces termochemického dělení vody, je energeticky daleko náročnější než předchozí dvě možnosti a není tedy ekonomicky výhodná.

Elektrický příhřev páry dodávané odběratelům je energeticky náročnější než možnost příhřevu vyrobeným vodíkem a není tak ekonomicky výhodné ho použít. Z praktického hlediska tato možnost opět naráží na absenci praktických aplikací elektrického příhřevu páry v průmyslu.

Porovnáním potřebného počtu vybraných SMR pro úplné pokrytí tepelných nároků uvažovaných odběratelů vychází SMR Natrium jako nejvýhodnější varianta z pohledu počáteční investice, neboť pro prakticky všechny uvažované případy stačí pouze jeden reaktor pro pokrytí těchto nároků bez nutnosti přihřevu páry. Pravděpodobněji by však byl pro pokrytí těchto nároků vybrán reaktor UK SMR, neboť se jedná o lehkovodní reaktor v pokročilé fázi vývoje. Zároveň pak disponuje dostatečným výkonem, aby pokrytí energetických potřeb byl schopen zajistit pouze jeden reaktor.

Celkově práce přináší základní zhodnocení možností, jakými mohou být SMR v budoucnosti využity pro pokrytí potřeb průmyslových odběratelů tepla. Udává zjednodušený návod na možnou realizaci případných přihřevů.

## LITERATURA

- [1] *Reactors Designed by Argonne National Laboratory*. Online. Nuclear Engineering Division. 2020, Last Modified April 1. 2020. Dostupné z: <https://www.ne.anl.gov/About/reactors/frt.shtml#>. [cit. 2023-11-20].
- [2] MICHAL, Rick. Fifty years ago in December: Atomic reactor EBR-I produced first electricity. Online. *Nuclear News*. November 2001, s. 29. Dostupné z: <https://www2.ans.org/pubs/magazines/nn/docs/2001-11-2.pdf>. [cit. 2023-11-20].
- [3] HUBBARD, Bryan. *The US Air Force's Bid to Develop Nuclear-Powered Aircraft*. Online. Military.com. 2017. Dostupné z: <https://www.military.com/history/atomic-air-power.html>. [cit. 2024-01-13].
- [4] *Summary report of HTRE no. 3 Nuclear AR excursion*. Online. GENERAL ELECTRIC. Internet Archive. 1959. Dostupné z: [https://web.archive.org/web/20210321104519/https://ncsp.llnl.gov/LA13638/reports/084.ref\\_084.pdf](https://web.archive.org/web/20210321104519/https://ncsp.llnl.gov/LA13638/reports/084.ref_084.pdf). [cit. 2024-03-15].
- [5] *Review of Manned Aircraft Nuclear Propulsion Program: Report to the congress of the United States*. 1963. Dostupné také z: <https://nuke.fas.org/space/anp-gao1963.pdf>.
- [6] TRAKIMAVIČIUS, Lukas. *The Future Role of Nuclear Propulsion in the Military: Energy Highlights*. 2021. Dostupné také z: [https://web.archive.org/web/20230327163714/https://enseccoe.org/data/public/uploads/2021/10/d1\\_the-future-role-of-nuclear-propulsion-in-the-military.pdf](https://web.archive.org/web/20230327163714/https://enseccoe.org/data/public/uploads/2021/10/d1_the-future-role-of-nuclear-propulsion-in-the-military.pdf).
- [7] FRIEDMAN, Norman. *Nuclear propulsion*. Online. Britannica. B.r. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/submarine-naval-vessel/Nuclear-propulsion>. [cit. 2024-01-12]. *USS Nautilus—world's first nuclear submarine—is commissioned*. Online. The HISTORY Channel. 2010. Dostupné z: <https://www.history.com/this-day-in-history/uss-nautilus-commissioned>. [cit. 2024-01-13].
- [8] FRIEDMAN, Norman. *Nuclear submarine*. Online. Encyclopedia Britannica. B. r. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/nuclear-submarine>. [cit. 2024-03-16].
- [9] PHIDDIAN, Ellen. *Explainer: how do nuclear submarines work?: how do nuclear submarines work?* Online. Cosmos. 2021. Dostupné

- z: <https://cosmosmagazine.com/technology/how-do-nuclear-submarines-work/>. [cit. 2024-03-16].
- [10] *Obninsk: number one*. Online. Nuclear Engineering International. 2004. Dostupné z: <https://www.neimagazine.com/features/featureobninsk-number-one>. [cit. 2024-01-08].
- [11] *First nuclear power plant to close*. Online. BROWN, Paul. The Guardian. 2003. Dostupné z: <https://www.theguardian.com/uk/2003/mar/21/nuclear.world>. [cit. 2024-01-09].
- [12] *#47 Shippingport Nuclear Power Station*. Online. The American Society of Mechanical Engineers. C2024. Dostupné z: <https://www.asme.org/about-asme/engineering-history/landmarks/47-shippingport-nuclear-power-station>. [cit. 2024-01-09].
- [13] CLAYTON, J. C. *The Shippingport pressurized water reactor and light water breeder reactor*. 1993. Dostupné také z: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/25/025/25025940.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/25/025/25025940.pdf).
- [14] *The OECD Halden reactor project - International research on safety and reliability of nuclear power generation*. Online. BROY, Yvonne; WIESENACK, Wolfgang a MOEN, Lise A. Office of Scientific and Technical Information. B.r. Dostupné z: <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/20236634>. [cit. 2024-01-09].
- [15] IAEA. *The OECD Halden reactor project - International research on safety and reliability of nuclear power generation*. 1. 1974. Dostupné také z: <https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/magazines/bulletin/bull16-6/16605003337.pdf>.
- [16] *The Story of Nuclear Power in Norway*. Online. NIKEL, David. Life in Norway. 2021. Dostupné z: <https://www.lifeinnorway.net/nuclear-power/>. [cit. 2024-01-09].
- [17] IAEA. *Nuclear Heat for Industrial Purposes and District Heating: Report on an IAEA study group meeting*. 1. 1974. Dostupné také z: <https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/magazines/bulletin/bull16-6/16605003337.pdf>.
- [18] OLSZEWSKI, Mitchel. *Use of waste heat from nuclear power plants*. 1. 1978. Dostupné také z: <https://www.osti.gov/servlets/purl/6495905>.
- [19] WOITE, G.; KONISHI, T. a KUPITZ, J. *Experience and Prospects of Nuclear Heat Applications*. 1998. Dostupné také

- z: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/29/064/29064378.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/29/064/29064378.pdf).
- [20] IAEA. *Nuclear heat applications: Design aspects and operating experience*. 1998. Dostupné také z: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/29/067/29067709.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/29/067/29067709.pdf).
- [21] BARNERT, H.; KRETT, V. a KUPITZ, J. *Nuclear energy for heat applications: Co-generating electricity and heat is a promising application*. 1991. Dostupné také z: <https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/magazines/bulletin/bull33-1/33104782124.pdf>.
- [22] WOITE, G.; KONISHI, T. a KUPITZ, J. *Experience and Prospects of Nuclear Heat Applications: District heating, process heat, seawater desalination*. 1998. Dostupné také z: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/29/064/29064378.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/29/064/29064378.pdf).
- [23] *Stade NPP*. Online. Preussen Elektra. C2024. Dostupné z: <https://www.preussenelektra.de/en/our-powerplants/kraftwerkstade.html>. [cit. 2024-01-12].
- [24] JAPAN ATOMIC ENERGY AGENCY. *Outline of High Temperature Engineering Test Reactor*. Online. HTGR Research and Development Center. B.r. Dostupné z: <https://www.jaea.go.jp/04/o-arai/nhc/en/faq/htrr.html>. [cit. 2024-01-12].
- [25] JAPAN ATOMIC ENERGY AGENCY. *Heat Utilization System Design*. Online. HTGR Research and Development Center. B.r. Dostupné z: [https://www.jaea.go.jp/04/o-arai/nhc/en/research/hydrogen\\_heat/heat/index.html](https://www.jaea.go.jp/04/o-arai/nhc/en/research/hydrogen_heat/heat/index.html). [cit. 2024-01-12].
- [26] JAPAN ATOMIC ENERGY AGENCY. *Demonstration Test Plan for HTTR-GT/H2 Plantn*. Online. HTGR Research and Development Center. B.r. Dostupné z: [https://www.jaea.go.jp/04/o-arai/nhc/en/research/hydrogen\\_heat/heat/heat\\_htrr.html](https://www.jaea.go.jp/04/o-arai/nhc/en/research/hydrogen_heat/heat/heat_htrr.html). [cit. 2024-01-12].
- [27] SUN, Yuliang; ZHONG, Daxin; XU, Yuanhui a WU, Zhongxin. *The HTR-10 test reactor project and potential use of HTGR for non-electric application in China*. B.r. Dostupné také z: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/28/031/28031224.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/28/031/28031224.pdf).

- [28] *China's demonstration HTR-PM enters commercial operation*. Online. World Nuclear News. 2023. Dostupné z: <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Chinese-HTR-PM-Demo-begins-commercial-operation>. [cit. 2024-05-20].
- [29] *Heavy water*. Online. Energy Education. B. r. Dostupné z: [https://energyeducation.ca/encyclopedia/Heavy\\_water](https://energyeducation.ca/encyclopedia/Heavy_water). [cit. 2024-03-09].
- [30] RAE, H. K. *Selecting Heavy Water Processes*. Online. ACS Publications. 1978. Dostupné z: <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/bk-1978-0068.ch001?src=recsys>. [cit. 2024-03-09].
- [31] *Moderní odsolovací procesy pro integrované vodní a tepelné elektrárny IWPP*. Online. KROHNE GROUP. KROHNE. B. r. Dostupné z: <https://krohne.com/cs/prumyslova-odvetvi/vyroba-elektricke-energie/moderni-odsolvaci-procesy-integrované-vodni-tepelne-elektrarny-iwpp?tab.1=0>. [cit. 2024-03-09].
- [32] *Multiple Effect Distillation*. Online. Aqueum. C2012-2018. Dostupné z: <https://aqueum.com/water-treatment/unit-processes/desalination/med/>. [cit. 2024-03-09].
- [33] *Vícestupňová destilace s tepelnou kompresí par (MED-TVC)*. Online. KROHNE GROUP. KROHNE. B. r. Dostupné z: <https://krohne.com/cs/prumyslova-odvetvi/vyroba-elektricke-energie/moderni-odsolvaci-procesy-integrované-vodni-tepelne-elektrarny-iwpp/vicestupnova-destilace-tepelnou-kompresi-par-med-tvc>. [cit. 2024-03-09].
- [34] *Multiple Effect Distillation*. Online. ScienceDirect Topics. C2024. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/multiple-effect-distillation>. [cit. 2024-03-09].
- [35] *Multi-Stage Flash*. Online. ScienceDirect Topics. C2024. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/multi-stage-flash>. [cit. 2024-03-09].
- [36] *Tar sand*. Online. BRITANNICA. Encyclopedia Britannica. 2022. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/tar-sand>. [cit. 2024-03-12].
- [37] *Canada's Energy Futures 2021 Fact Sheet: Oil Sands: Oil Sands*. Online. Canada's Energy Future 2021 Fact Sheet: Oil Sands. 2023. Dostupné z: <https://www.cer-rec.gc.ca/en/data-analysis/canada-energy-future/2021oilsands/index.html>. [cit. 2024-03-12].
- [38] LEAHY, Stephen. *This is the world's most destructive oil operation—and it's growing*. Online. National Geographic. 2019. Dostupné

- z: <https://www.nationalgeographic.com/environment/article/alberta-canadas-tar-sands-is-growing-but-indigenous-people-fight-back>. [cit. 2024-03-12].
- [39] *The crude oil distillation unit*. Online. Expect Asia. C2003-2016. Dostupné z: <https://www.expect.com/process-plants/the-crude-oil-distillation-unit/>. [cit. 2024-03-09].
- [40] *EERE Success Story—New Software Will Enable Chemical Manufacturers to Optimize Distillation Column Configuration and Save Energy*. Online. Energy.gov. 2016. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/success-stories/articles/eere-success-story-new-software-will-enable-chemical-manufacturers>. [cit. 2024-03-12].
- [41] JANSING, W.T. a KUGELER, K. *Aspects of nuclear process heat application of very high temperature reactors (VHTR)*. Online. IAEA. 2014. Dostupné z: <https://nucleus.iaea.org/sites/htgr-kb/HTR2014/Paper%20list/Track4/HTR2014-41425.pdf>. [cit. 2024-04-01].
- [42] TICHÝ, Pavel. *Základní informace k vodíku*. Online. Česká vodíková technologická platforma. C2024. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/o-vodiku/ve-zkratce>. [cit. 2024-03-12].
- [43] *Hydrogen Production: Natural Gas Reforming: Natural Gas Reforming*. Online. Energy.gov. B. r. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-natural-gas-reforming>. [cit. 2024-03-12].
- [44] HRABOVSKY, Milan; HLÍNA, Michal; KOPECKÝ, Vladimír; MASLANI, Alan; KŘENEK, Petr et al. *Steam Plasma Methane Reforming for Hydrogen Production*. Online. SpringerLink. 2018. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11090-018-9891-5>. [cit. 2024-03-24].
- [45] *Nuclear Hydrogen R&D Plan*. Department Of Energy Office of Nuclear Energy, Science and Technology, 2004. Dostupné také z: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/articles/nuclear-hydrogen-rd-plan-0>.
- [46] KOLMANOVÁ, Marie. *Vysokoteplotní elektrolýza: „čistá“ výroba vodíku s možností zpětné konverze*. Online. Technický týdeník. 2016. Dostupné z: [https://www.technickytydenik.cz/rubriky/veda-vyzkum-inovace/vysokoteplotni-elektrolyza-cista-vyroba-vodiku-s-moznosti-zpetne-konverze\\_35526.html](https://www.technickytydenik.cz/rubriky/veda-vyzkum-inovace/vysokoteplotni-elektrolyza-cista-vyroba-vodiku-s-moznosti-zpetne-konverze_35526.html). [cit. 2024-03-12].

- [47] DROBNÝ, Josef. *Výroba vodíku elektrolýzou vody*. Online. HydroRACE4School. 2019, 19. Listopad 2019. Dostupné z: <http://hydro-race.eu/Výroba-vodíku-elektrolýzou-vody>. [cit. 2024-03-12].
- [48] O'BRIEN, J. E.; STOOFS, C. M.; HERRING, J. S.; MCKELLAR, M. G.; HARVEGO, E. A. et al. *High Temperature Electrolysis for Hydrogen Production from Nuclear Energy – Technology Summary*. Online. Idaho National Laboratory. 2010. Dostupné z: <https://inldigitallibrary.inl.gov/sites/sti/sti/4480292.pdf>. [cit. 2024-03-24].
- [49] *World's largest high-temperature electrolyzer achieves record efficiency*. Online. Sunfire. 2022. Dostupné z: <https://www.sunfire.de/en/news/detail/worlds-largest-high-temperature-electrolyzer-achieves-record-efficiency>. [cit. 2024-03-12].
- [50] *Hydrogen Production: Thermochemical Water Splitting: Thermochemical Water Splitting*. Online. Energy.gov. B. r. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-thermochemical-water-splitting>. [cit. 2024-03-12].
- [51] ABANADES, Stéphane. *Metal Oxides Applied to Thermochemical Water-Splitting for Hydrogen Production Using Concentrated Solar Energy*. Online. MDPI. 2019. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2305-7084/3/3/63>. [cit. 2024-03-12].
- [52] AL-MAAITAH, Ayman; NAYFEH, Jamal a BORETTI, Alberto, MASTRONADO, Emanuela (ed.). *Hydrogen Production by Solar Thermochemical Water-Splitting Cycle via a Beam Down Concentrator*. Online. Frontiers. 2021. Dostupné z: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2021.666191/full>. [cit. 2024-03-17].
- [53] *BWRX-300 small modular reactor*. Online. GE Hitachi Nuclear Energy. C2024. Dostupné z: <https://www.gevernova.com/nuclear/carbon-free-power/bwrx-300-small-modular-reactor>. [cit. 2024-01-14].
- [54] *Darlington SMR*. Online. OPG. 2023. Dostupné z: <https://www.opg.com/projects-services/projects/nuclear/smr/darlington-smr/>. [cit. 2024-01-14].
- [55] *OSGE gets the general opinion of the president of the PAA on the GEH BWRX-300 technology*. Online. OSGE. 2023. Dostupné z: <https://osge.com/en/osge-gets-the-general-opinion-of-the-president-of-the-paa-on-the-geh-bwrx-300-technology/>. [cit. 2024-01-14].

- [56] *OSGE obtained six decisions-in-principle*. Online. OSGE. 2023. Dostupné z: <https://osge.com/en/osge-obtained-six-decisions-in-principle/>. [cit. 2024-01-14].
- [57] *BWRX-300*. Online. OSGE. B.r. Dostupné z: <https://osge.com/en/bwrx-300-2/>. [cit. 2024-01-14].
- [58] *Tennessee Valley Authority, Ontario Power Generation and Synthos Green Energy Invest in Development of GE Hitachi Small Modular Reactor Technology*. Online. GE. 2023. Dostupné z: <https://www.ge.com/news/press-releases/tennessee-valley-authority-ontario-power-generation-and-synthos-green-energy-invest>. [cit. 2024-01-14].
- [59] SUK, Pavel. *TVA plánuje licencovat malý modulární reaktor BWRX-300 do roku 2024*. Online. OEnergetice. 2022. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/jaderne-elektrarny/tva-planuje-licencovat-maly-modularni-reaktor-bwrx-300-roku-2024>. [cit. 2024-01-14].
- [60] *Společnosti GE Hitachi Nuclear Energy a ČEZ zahajují spolupráci při zkoumání technologie malého modulárního reaktoru v České republice*. Online. Skupina ČEZ. 2020. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/pro-media/tiskove-zpravy/spolecnosti-ge-hitachi-nuclear-energy-a-cez-zahajuji-spolupraci-pri-zkoumani-technologie-maleho-modularniho-reaktoru-v-ceske-republice-80832>. [cit. 2024-01-14].
- [61] *VOYGR Power Plants*. Online. NuScale Power. B.r. Dostupné z: <https://www.nuscalepower.com/en/products/voygr-smr-plants>. [cit. 2024-01-14].
- [62] *Standard Power Chooses NuScale's Approved SMR Technology and ENTRA1 Energy to Energize Data Centers*. Online. NuScale Power. 2023. Dostupné z: <https://www.nuscalepower.com/en/news/press-releases/2023/standard-power-chooses-nuscales-approved-smr-technology-and-entra1-energy-to-energize-data-centers>. [cit. 2024-01-14].
- [63] *Projects*. Online. NuScale Power. B.r. Dostupné z: <https://www.nuscalepower.com/en/projects>. [cit. 2024-01-14].
- [64] GARDNER, Timothy a MISHRA, Manas. *NuScale ends Utah project, in blow to US nuclear power ambitions*. Online. Reuters. 2023. Dostupné z: <https://www.reuters.com/business/energy/nuscale-power-uamps-agree-terminate-nuclear-project-2023-11-08/>. [cit. 2024-01-14].
- [65] *About NUWARD*. Online. Nuward EDF Group. B.r. Dostupné z: <https://www.nuward.com/en/about-nuward>. [cit. 2024-01-14].

- [66] *Our SMR solution*. Online. Nuward EDF Group. B.r. Dostupné z: <https://www.nuward.com/en/our-smr-solution>. [cit. 2024-01-14].
- [67] *Technology*. Online. Holtec International. B.r. Dostupné z: <https://holtecinternational.com/products-and-services/smr/technology/>. [cit. 2024-01-14].
- [68] PATEL, Sonal. *Nuclear Advisory Council Deems Commissioning of Holtec SMR-160 by 2030 a 'Credible Target'*. Online. Power. 2021. Dostupné z: <https://www.powermag.com/nuclear-advisory-council-deems-commissioning-of-holtec-smr-160-by-2030-a-credible-target/>. [cit. 2024-01-14].
- [69] *Holtec and GEH team up on advancing SMR-160*. Online. World Nuclear News. 2018. Dostupné z: <https://www.world-nuclear-news.org/NN-Holtec-and-GEH-team-up-on-advancing-SMR-160-1502184.html>. [cit. 2024-01-14].
- [70] *Holtec Advances Project Delivery Plan for SMR-160 in Czech Republic*. Online. Holtec International. 2022. Dostupné z: <https://holtecinternational.com/2022/10/25/holtec-advances-project-delivery-plan-for-smr-160-in-czech-republic/>. [cit. 2024-01-14].
- [71] *The potential of the small modular reactor*. Online. Rolls-Royce. C2024. Dostupné z: <https://www.rolls-royce.com/media/our-stories/discover/2022/the-potential-of-the-small-modular-reactor.aspx>. [cit. 2024-01-14].
- [72] MACFARLANE-SMITH, Sophie. *Rolls-Royce SMR: Nuclear Academics Meeting 8th September 2021*. C2021. Dostupné také z: <https://www.nuclearuniversities.ac.uk/wp-content/uploads/2021/09/Sophie-Macfarlane-Smith.pdf>.
- [73] *Our Vision*. Online. Rolls-Royce. B.r. Dostupné z: <https://www.rolls-royce-smr.com/about-us/our-vision>. [cit. 2024-01-14].
- [74] *Rolls-Royce hopes for UK SMR online by 2029*. Online. World Nuclear News. 2022. Dostupné z: <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Rolls-Royce-hopes-for-UK-SMR-online-by-2029>. [cit. 2024-01-14].
- [75] *Six companies through to next stage of nuclear technology competition*. Online. Gov UK. 2023. Dostupné z: <https://www.gov.uk/government/news/six-companies-through-to-next-stage-of-nuclear-technology-competition>. [cit. 2024-01-14].
- [76] *AP300™ SMR*. Online. Westinghouse nuclear. B.r. Dostupné z: <https://www.westinghousenuclear.com/energy-systems/ap300-smr>. [cit. 2024-01-14].

- [77] YURMAN, Dan. *Westinghouse to Develop a 300 MW Light Water SMR*. Online. Energy Central. 2023. Dostupné z: <https://energycentral.com/c/ec/westinghouse-develop-300-mw-light-water-smr>. [cit. 2024-01-14].
- [78] *Malý modulární reaktor AP300 od Westinghouse zajistí energii až pro 300 tisíc domácností*. Online. O Energetice. 2023. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/jaderne-elektrarny/maly-modularni-reaktor-ap300-od-westinghouse-zajisti-energii-az-pro-300-tisic-domacnosti>. [cit. 2024-01-14].
- [79] *EVinci™ Microreactor*. Online. Westinghouse nuclear. B.r. Dostupné z: <https://www.westinghousenuclear.com/energy-systems/evinci-microreactor>. [cit. 2024-01-14].
- [80] TRAMBA, David. *Modulární reaktor do Temelína dodá jeden ze sedmi uchazečů. Který z nich má šanci uspět?* Online. Ekonomický deník. 2023. Dostupné z: <https://ekonomickydenik.cz/modularni-reaktor-do-temelina-doda-jeden-ze-sedmi-uchazecu-ktery-z-nich-ma-sanci-uspet/>. [cit. 2024-01-14].
- [81] *KHNP touts i-SMR to international audience*. Online. World Nuclear News. 2023. Dostupné z: <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/KHNP-touts-i-SMR-to-international-audience>. [cit. 2024-01-14].
- [82] *Xe-100: The Most Advanced Small Modular Reactor*. Online. X-energy. C2024. Dostupné z: <https://x-energy.com/reactors/xe-100>. [cit. 2024-03-17].
- [83] *TRISO-X Fuel*. Online. X-energy. C2024. Dostupné z: <https://x-energy.com/fuel/triso-x>. [cit. 2024-03-17].
- [84] AKELLA, Surya. *Energy Northwest and X-Energy bring modular reactors to Washington*. Online. Power Technology. 2023. Dostupné z: <https://www.power-technology.com/news/energy-northwest-x-energy-smr-washington/>. [cit. 2024-03-17].
- [85] *X-Energy and Cavendish Nuclear's SMR plan for Hartlepool*. Online. World Nuclear News. 2023. Dostupné z: <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/X-Energy-and-Cavendish-Nuclear-s-SMR-plan-for-Hart>. [cit. 2024-03-17].
- [86] *Dow and X-energy advance efforts to deploy first advanced small modular nuclear reactor at industrial site under DOE's Advanced Reactor Demonstration Program*. Online. Nenalezený vydavatel. 2023. Dostupné z: <https://corporate.dow.com/en-us/news/press-releases/dow-x-energy-collaborate-on-smr-nuclear.html>. [cit. 2024-03-17].

- [87] *The Natrium™ Technology*. Online. Natrium. C2024. Dostupné z: <https://natriumpower.com/reactor-technology/>. [cit. 2024-05-20].
- [88] *Providing New Energy Resources in Wyoming*. Online. Natrium. C2024. Dostupné z: <https://natriumpower.com/wyoming/>. [cit. 2024-05-20].
- [89] *Frequently Asked Questions*. Online. Natrium. C2024. Dostupné z: <https://natriumpower.com/frequently-asked-questions/>. [cit. 2024-05-20].
- [90] *Our Technology*. Online. ARC Clean Technology. C20233. Dostupné z: <https://www.arc-cleantech.com/technology>. [cit. 2024-05-20].
- [91] *ARC Projects*. Online. ARC Clean Technology. C2023. Dostupné z: <https://www.arc-cleantech.com/projects>. [cit. 2024-05-20].
- [92] *Project*. Online. Energy Well - small modular nuclear reactor. C2021. Dostupné z: <https://www.energywell.cz/project>. [cit. 2024-03-17].
- [93] *Technical Details*. Online. Energy Well - small modular nuclear reactor. C2021. Dostupné z: <https://www.energywell.cz/technical-details>. [cit. 2024-03-17].
- [94] *TEPLATOR*. Online. Teplator.cz. C2024. Dostupné z: <https://www.teplator.cz/>. [cit. 2024-03-17].
- [95] Český Teplátor nabízí změnu výroby tepla. Online. *Energie +*. 2021, s. 10, 11. Dostupné z: <https://www.mfdnes.cz/ctecka.aspx?d=27.04.2021&n=TABLOID&e=BUD EJOVICE#strana=10>. [cit. 2024-03-17].
- [96] *Malý modulární reaktor CR-100*. Online. Small Modular Reactor | Malý modulární reaktor. C2022. Dostupné z: <https://cr100.cz/>. [cit. 2024-03-17].
- [97] *Malý modulární reaktor*. Online. David SMR. B.r. Dostupné z: <https://www.davidsmr.cz>. [cit. 2024-03-17].
- [98] *Vyvíjíme malý modulární jaderný reaktor*. Online. David SMR. B. r. Dostupné z: <https://www.davidsmr.cz/technologie>. [cit. 2024-03-17].
- [99] *HeFASTo – Concept of Advanced Modular Reactor for the Future*. Online. ÚJV Řež, a. s. C2024. Dostupné z: <https://www.ujv.cz/en/products-and-services-1/research-development/hefasto>. [cit. 2024-03-17].
- [100] IAEA ARIS. *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments*. Online. IAEA. ARIS. 2022. Dostupné z: [https://aris.iaea.org/Publications/SMR\\_booklet\\_2022.pdf](https://aris.iaea.org/Publications/SMR_booklet_2022.pdf). [cit. 2024-03-20].
- [101] MINISTERSTVO PRŮMYSLU A OBCHODU. *Plán pro malé a střední reaktory v České republice - využití a hospodářský přínos*. Online. Mpo.gov. 2023.

- Dostupné z: [https://www.mpo.gov.cz/assets/cz/rozcestnik/pro-media/tiskove-zpravy/2023/11/PlanSMR\\_graficke-zpracovani\\_CZ.pdf](https://www.mpo.gov.cz/assets/cz/rozcestnik/pro-media/tiskove-zpravy/2023/11/PlanSMR_graficke-zpracovani_CZ.pdf). [cit. 2024-05-11].
- [102] *Kdo jsme a jak postupujeme?* Online. SYNTHOS. Synthos. C2024. Dostupné z: <https://www.synthosgroup.com/>. [cit. 2024-05-15].
- [103] *Nabídka produktů.* Online. SPOLANA. Nenalezený vydavatel. B. r. Dostupné z: <https://www.spolana.cz/CZ/Produkty/Stranky/default.aspx>. [cit. 2024-05-15].
- [104] *Rafinérie Kralupy.* Online. ORLEN. Nenalezený vydavatel. B. r. Dostupné z: <https://www.unipetrolrpa.cz/CS/o-nas/Rafinerie/Stranky/Rafinerie-Kralupy.aspx>. [cit. 2024-05-15].
- [105] *Rafinérie Litvínov.* Online. ORLEN. Nenalezený vydavatel. B. r. Dostupné z: <https://www.unipetrolrpa.cz/CS/o-nas/Rafinerie/Stranky/Rafinerie-Litvinov.aspx>. [cit. 2024-05-15].
- [106] *Steam tables.* Online. Nenalezený vydavatel. 2011. Dostupné z: <https://www.thermopedia.com/content/1150/>. [cit. 2024-05-20].
- [107] *Fluidní katalytické krakování - Fluid catalytic cracking.* Online. Encyklopedie. C2021. Dostupné z: [https://wikijii.com/wiki/Fluid\\_catalytic\\_cracking](https://wikijii.com/wiki/Fluid_catalytic_cracking). [cit. 2024-05-15].
- [108] SENDICH, Elizabeth. *Energy products are key inputs to global chemicals industry.* Online. U.S. Energy Information Administration (EIA). 2019. Dostupné z: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=39952>. [cit. 2024-05-15].
- [109] *Btu za hodinu.* Online. Jednotky. 2024. Dostupné z: <https://www.jednotky.cz/>. [cit. 2024-05-15].
- [110] *USD, americký dolar - převod měn na CZK, českou korunu.* Online. Kurzy.cz. 2024. Dostupné z: <https://www.kurzy.cz/kurzy-men/kurzy.asp?a=X&mena1=USD&mena2=CZK&c=1&d=19.04.2024&convert=P%F8eve%EF+m%ECnu>. [cit. 2024-05-16].
- [111] *Výroční zpráva za rok 2019.* Online. SPOLANA. Nenalezený vydavatel. 2020. Dostupné z: [https://www.spolana.cz/CZ/ONas/Documents/SPOLANA\\_V%C3%BDro%C4%8Dn%C3%AD%20zpr%C3%A1va\\_2019.pdf](https://www.spolana.cz/CZ/ONas/Documents/SPOLANA_V%C3%BDro%C4%8Dn%C3%AD%20zpr%C3%A1va_2019.pdf). [cit. 2024-05-16].
- [112] *Value of 2019 Czech Korunas today.* Online. Inflation Calculator. 2024. Dostupné z: <https://www.inflationtool.com/czech-koruna/2019-to-present-value>. [cit. 2024-05-16].

- [113] SYNTHOS KRALUPY A.S. *Výroční zpráva: 31. prosince 2022*. Online. 2022. Dostupné také z: <https://or.justice.cz/ias/content/download?id=3b23e27b2b884b66a11988a24feb16ab>.
- [114] *At what temperature is plastic extruded?* Online. La-plastic. 2023. Dostupné z: <https://www.la-plastic.com/post/at-what-temperature-is-plastic-extruded>. [cit. 2024-05-16].
- [115] HANUŠ, M. *High Temperature Gas Reactor Technology for Nuclear Power and Process Heat Applications*. X-energy, 2024.
- [116] *What is the energy content of hydrogen?* Online. Enapter. C2024. Dostupné z: [https://www.enapter.com/kb\\_post/what-is-the-energy-content-of-hydrogen/](https://www.enapter.com/kb_post/what-is-the-energy-content-of-hydrogen/). [cit. 2024-05-18].

# SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

## Zkratky:

BBSS	Bruce Bulk Steam Systém
BEC	Bruce Energy Centre
BTU	British thermal unit
BWR	Boiling Water Reactor
CANDU	Canada Deuterium Uranium
EBR-I	Experimental Breeder Reactor-I
EDF	Électricité de France
FBR	Fast Breeder Reactor
FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
GEH	GE Hitachi
HTGR	High Temperature Gass-cooled Reactor
HTTR	High Temperature engeneering Test Reactor
INET	Institute of Nuclear Energy Technology
KNHP	Korea Hydro and Nuclear Power
LWBR	Light-Water Breeder Reactor
LWR	Light-Water Reactor
MED	Multi-Stage-Distillation
MED-TVC	Multi-Stage-Distillation with Thermal Vapour Compression
MMR	Malý modulární reaktor
MSF	Multi-Stage-Flash
MSR	Molten Salt Reactor
NRTS	National Reactor Testing Station
ORNL	Oak Ridge National Laboratory
PHWR	Pressurized Heavy Water Reactor
PVC	Polyvinylchlorid
PWR	Pressurized Water Reactor
RR	Rolls-Royce
SMR	Small modular reactor
TVA	Tennessee Valley Authority
USA	United States of America
VUT	Vysoké učení technické v Brně
WHO	World Health Organization

## Symboly:

$c$	měrná tepelná kapacita	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
$c_0$	měrná tepelná kapacita, nižší tabulková hodnota	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

$c_1$	měrná tepelná kapacita, vyšší tabulková hodnota	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
$C_{2019}$	peněžní hodnota v roce 2019	Kč
$C_{2024}$	peněžní hodnota v roce	Kč
$i$	průměrná roční míra inflace	%
$m$	hmotnost páry	kg
$m_h$	hmotnost vodíku	kg
$m_{r,r}$	hmotnost ropy zpracované rafinériemi	kg
$n$	počet let	rok
$n_{SMR}$	potřebný počet SMR	-
$p$	tlak	bar
$p_0$	tlak, nižší tabulková hodnota	bar
$p_1$	tlak, vyšší tabulková hodnota	bar
$P_{el}$	elektrický výkon	W
$P_{tep}$	tepelný výkon	W
$Q_1$	tepelná energie dodávaná do procesu	J
$Q_2$	tepelná energie pro přehřev	J
$Q_{2el}$	elektrická energie pro přehřev páry	J
$Q_3$	tepelná energie spotřebovaná procesem	J
$Q_{el}$	elektrická energie	J
$Q_{el,h}$	elektrická energie pro ohřev páry při výrobě vodíku	J
$Q_{el,ppm}$	elektrická energie pro ohřev páry při výrobě vodíku skrze parní perforaci metanu	J
$Q_{el,tdv}$	elektrická energie pro ohřev páry při výrobě vodíku skrze termochemické dělení vody	J
$Q_{el,vpe}$	tepelná energie pro výrobu vodíku skrze vysokoteplotní parní elektrolýzu	J
$Q_h$	energie pro výrobu vodíku	J
$Q_{h,ppm}$	energie pro výrobu vodíku skrze parní perforaci metanu	J
$Q_{h,tdv}$	energie pro výrobu vodíku skrze termochemické dělení vody	J
$Q_{h,vpe}$	energie pro výrobu vodíku skrze vysokoteplotní parní elektrolýzu	J
$Q_i$	výhřevnost vodíku	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$
$Q_{tep}$	tepelná energie	J
$Q_{tep,r}$	tepelný výkon vyžadovaný rafinériemi	J
$Q_{tep,SMR}$	celkové množství tepelné energie vyráběné SMR	J
$Q_{tep,vpe}$	elektrická energie pro výrobu vodíku skrze vysokoteplotní parní elektrolýzu	J

$t$	teplota	°C
$t_1$	teplota na vstupu do procesu	°C
$t_2$	teplota na výstupu z procesu	°C
$t_{min}$	minimální teplota	°C
$t_{opt}$	optimální teplota	°C
$t_{prim}$	teplota primárního okruhu	°C
$t_s$	střední teplota	°C
$\eta$	účinnost	%

## **SEZNAM PŘÍLOH**

<b>PŘÍLOHA A - HODNOTY PRO ZJIŠTĚNÍ MĚRNÉ TEPELNÉ KAPACITY SKRZE LINEÁRNÍ INTERPOLACI .....</b>	<b>84</b>
<b>PŘÍLOHA B - ZJEDNODUŠENÉ NÁHRADNÍ SCHÉMA MODELU VYUŽITÍ PROCESNÍHO TEPLA S UVAŽOVÁNÍM VÝROBY VODÍKU SKRZE VYSOKOTEPLTNÍ PARNÍ ELEKTROLÝZU.....</b>	<b>85</b>

## Příloha A - Hodnoty pro zjištění měrné tepelné kapacity skrze lineární interpolaci

			Rafinerie	SYNTHOS	SPOLANA	Přihřev mezi									
						BWRX-300	BWRX-300	BWRX-300	UK SMR	UK SMR	UK SMR	AP300	AP300	AP300	ARC-100
						Rafinérie	SYNTHOS	SPOLANA	Rafinérie	SYNTHOS	SPOLANA	Rafinérie	SYNTHOS	SPOLANA	Rafinérie
Tlak nižší	$p_0$	(bar)	1	5	5	1	5	5	1	5	5	1	5	5	1
Teplota nižší	$t_0$	(°C)	x	260	260	400	280	360	420	310	380	420	310	380	520
Teplota vyšší	$t_1$	(°C)	x	280	280	420	300	370	440	320	390	440	320	390	540
Měrná tepelná kapacita pro nižší teplotu pro daný tlak	$c_0$	(kJ·kg <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> )	x	2,076	2,076	2,07	2,071	2,081	2,083	2,07	2,088	2,083	2,07	2,088	2,148
Měrná tepelná kapacita pro vyšší teplotu pro daný tlak	$c_1$	(kJ·kg <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> )	x	2,071	2,071	2,083	2,069	2,085	2,095	2,071	2,093	2,095	2,071	2,093	2,158
Měrná tepelná kapacita hledané pro nižší tlak	$c$	(kJ·kg <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> )	2,0400	2,0718	2,0723	2,0824	2,0696	2,0846	2,0935	2,0703	2,0918	2,0932	2,0702	2,0915	2,1530
Tlak vyšší	$p_1$	(bar)	5	x	x	5	x	x	5	x	x	5	x	x	5
Měrná tepelná kapacita pro nižší teplotu pro daný tlak	$c_0$	(kJ·kg <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> )	x	x	x	2,097	x	x	2,106	x	x	2,106	x	x	2,161
Měrná tepelná kapacita pro vyšší teplotu pro daný tlak	$c_1$	(kJ·kg <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> )	x	x	x	2,106	x	x	2,116	x	x	2,116	x	x	2,174
Měrná tepelná kapacita hledané pro vyšší tlak	$c$	(kJ·kg <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> )	2,078	x	x	2,1056	x	x	2,1148	x	x	2,1145	x	x	2,1675
Teplota	$t$	(°C)	350	277	275	419	294	369	437,5	312,5	387,5	437	312	387	530
Tlak	$p$	(bar)	1,72	5	5	1,72	5	5	1,72	5	5	1,72	5	5	1,72
Měrná tepelná kapacita pro danou teplotu i tlak	$c$	(kJ·kg <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> )	2,0468	2,0718	2,0723	2,0865	2,0696	2,0846	2,0973	2,0703	2,0918	2,0970	2,0702	2,0915	2,1556

## Příloha B - Zjednodušené náhradní schéma modelu využití procesního tepla s uvažováním výroby vodíku skrze vysokoteplotní parní elektrolýzu

