ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

FAKULTA
STROJNÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2024

KRYŠTOF
ERNST

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Ernst** Jméno: **Kryštof** Osobní číslo: **509034**

Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**

Zadávající katedra/ústav: **Ústav energetiky**

Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**

Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Využití malých modulárních reaktorů v oblasti kogenerace

Název bakalářské práce anglicky:

The application of small modular reactors for cogeneration

Pokyny pro vypracování:

Přehled designů SMR vyvíjených ve světě
Možnosti využití kogenerace pro teplárenství
Metody výroby vodíku a desalinizace
Výpočet potenciálu přenosu energie v průběhu roku

Seznam doporučené literatury:

- ADVANCES IN SMALL MODULAR REACTOR TECHNOLOGY DEVELOPMENTS Vienna: IAEA, 2022
- ZHITAO, Liu a Fan JIHONG. Technology readiness assessment of Small Modular Reactor (SMR) designs. Progress in Nuclear Energy, 2014
- ROWINSKI, Marcin, Timothy WHITE a Zhao JIYUN. Small and Medium sized Reactors (SMR): A review of technology. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Lukáš Novotný ústav energetiky FS

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

Datum zadání bakalářské práce: **12.04.2024** Termín odevzdání bakalářské práce: **03.06.2024**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2025**

Lukáš Novotný	prof. Ing. Michal Kolovratník, CSc.	doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce	podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry	podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

© ČVUT v Praze, Design: ČVUT v Praze, VIC

Anotační list

Jméno autora:	Kryštof Ernst
Název BP:	Využití malých modulárních reaktorů v oblasti kogenerace
Anglický název:	The application of small modular reactors for cogeneration
Akademický rok	2024
Ústav/Odbor:	Ústav energeticky
Vedoucí BP:	Ing. Lukáš Novotný
Konzultant:	Ing. Lukáš Novotný
Bibliografické údaje:	Počet stran: 67 Počet obrázků: 19 Počet tabulek: 13 Počet příloh: 0
Klíčová slova:	SMR; kogenerace; tepelná energie; desalinizace; vodík
Keywords:	SMR; cogeneration; thermal energy; desalination; hydrogen

Anotace: Teoretická část této bakalářské práce začíná seznámením s technologií malých modulárních reaktorů (SMR), ke které je následně zpracována rešerše některých nejpokročilejších návrhů. Dále pak obsahuje zasvěcení do některých možných kogeneračních funkcí SMR, jako je výroba tepelné energie, výroba vodíku, či možnost odsolování mořské vody. Praktická část je následně zaměřena na možnost přenosu energetických přebytků z léta do zimy. K uchování přebytků je využito transformace elektrické energie na vodík s použitím dvou různých typů elektrolyzérů. Výpočty pro oba elektrolyzéry jsou mezi sebou následně porovnány a zhodnoceny.

Abstrakt: The theoretical part of this bachelor thesis begins with an introduction to Small Modular Reactor (SMR) technology, followed by a review of some of the most advance proposals. It then includes an overview of some possible cogeneration functions of SMRs, such as thermal energy production, hydrogen production, or the possibility of desalinating seawater. The practical part then focuses on the possibility of transferring energy surpluses from summer to winter. To store the surpluses, the transformation of electrical energy into hydrogen is utilized using two different types of electrolysers. Calculations for both electrolysers are subsequently compared and evaluated.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci *Využití malých modulárních reaktorů v oblasti kogenerace* vypracoval samostatně pod vedením pana Ing. Lukáše Novotného s využitím použité literatury uvedené ve zdrojích.

V Praze dne: …… Podpis: ……..

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Lukáši Novotnému za jeho čas, vstřícnost, ochotu a vedení při zpracovávání bakalářské práce.

Obsah

Úvod....9
TEORETICKÁ ČÁST....10
1. Seznámení se SMR....10
2. Přehled vybraných designů SMR....12
3. Význam kogenerace....25
4. Tepelná energie – výroba a využití....25
4.1. Spalování fosilních paliv....26
4.2. Spalování biomasy a bioplynu....27
4.3. Tepelná energie z jaderných elektráren....28
4.4. Tepelná energie ze slunečního záření....29
5. Desalinizace....30
6. Vodík....31
6.1. Výroba vodíku....32
6.2. Typy elektrolyzérů....33
6.3. Transport vodíku....35
6.4. Skladování vodíku....36
6.5. Degradace materiálů působením vodíku....37
6.6. Možnosti využití vodíku....38
PRAKTICKÁ ČÁST....40
7. Sběr dat....40
8. Výpočet přebytku elektrické energie....42
9. Převod přebytku elektrické energie na vodík....42
10. Uskladnění vodíku....44
11. Transport vodíku....50
12. Přeměna vodíku zpět na elektrickou energii....52
13. Shrnutí (PEM elektrolyzér)....52
14. Nahrazení PEM elektrolyzéru vysokoteplotním elektrolyzérem....53
15. Shrnutí (SOEC elektrolyzér)....58
Závěr a zhodnocení....59
Seznam použité literatury....61
Seznam obrázků....66
Seznam tabulek....67

Seznam zkratek

AWE	Alkaline Water Elektrolysis / Elektrolýza alkalické vody
BWR	Boiling Water Reactor / Varný reaktor
CCS	Carbon Capture Storage / Proces zachytání a uskladnění odpadního CO2
CCU	Carbon Capture Utilitization / Proces zachytání a použití odpadního CO2
EDĚ	Elektrárna Dětmarovice
EDU	Elektrárna Dukovany
ETE	Elektrárna Temelín
MOX	Mixed Oxide Fuel / Směsné oxidické palivo
NRC	Nuclear Regulatory Commission / Komise pro jaderný dozor
PEM	Proton Exchange Membrane / Protonová výměnná membrána
PWR	Pressurized Water Reactor / Tlakovodní reaktor
RPV	Reactor Pressure Vessel / Tlaková nádoba reaktoru
SMR	Small Modular Reactor / Malý modulární reaktor
SOE	Solid Oxide Elektrolysis / Elektrolýza pevných oxidů
SOEC	Solid Oxide Electrolyzer Cell / Elektrolyzér s pevným oxidem
VVER	Vodo-Vodjanoj Energetičeskij Reaktor / Vodo-vodní energetický reaktor

Úvod

V době, kdy společnost řeší, jakým způsobem snížit uhlíkovou stopu, aby nedocházelo k oteplování planety, a zároveň jak obstát při narůstající spotřebě elektrické energie, přichází jaderná energetika se zajímavým a velice nadějným řešením této situace. Tím by podle všeho měla být technologie malých modulárních reaktorů. Tento nově vyvíjený typ jaderných reaktorů přislibuje společně s vysokou mírou bezpečnosti i možnost nasazení na místech, kde by to bylo dříve nemyslitelné. Společně s obnovitelnými zdroji, jako je slunce, vítr, voda a geotermální energie, by tak tyto malé modulární reaktory mohly tvořit náhradu stávajících elektráren pracujících na principu spalování fosilních paliv a s nimi spojenou produkci vysokého množství skleníkových plynů. Spojení těchto dvou metod výroby elektrické energie by se mohlo jevit jako zcela dostačující. Pravdou ale je, že výroba energie pomocí obnovitelných zdrojů nemusí být vždy zaručená. Obzvláště pak v zimních měsících, kdy kupříkladu na solární panely nedopadá takové množství slunečního záření a výroba elektrické energie tak může významným způsobem poklesnout. Malé modulární reaktory sice tímto neduhem netrpí a vyrábí energii prakticky pořád, je ale otázka, zdali jsou schopny vysokou poptávku po energii v zimních měsících utáhnout jen s malou pomocí obnovitelných zdrojů.

Cílem práce je tedy kromě seznámení s technologií malých modulárních reaktorů a jejími kogeneračními možnostmi i návrh a výpočet přenosu přebytků elektrické energie z léta do zimy. K přenosu bude využito transformace přebytečné energie na vodík, který bude následně skladován a posléze spalován v paroplynové elektrárně. Transformace elektrické energie na vodík bude uskutečněna pomocí dvou typů elektrolyzérů. Oba postupy transformace a převodu budou následně porovnány a zhodnoceny.

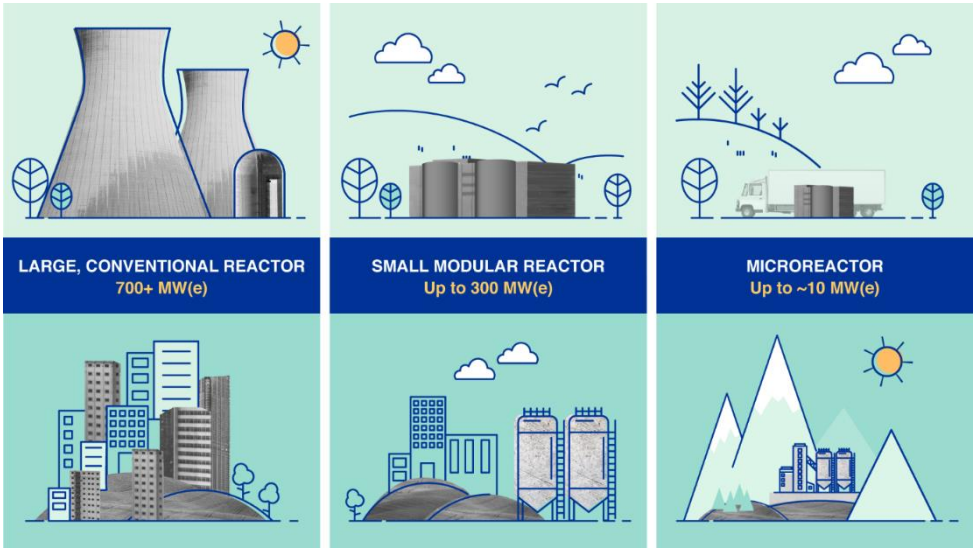
TEORETICKÁ ČÁST

1. Seznámení se SMR

Technologie malých modulárních reaktorů, neboli SMR (Small Modular Reaktor), je novodobé pojetí jaderných reaktorů. Tyto moderní projekty jaderných reaktorů a elektráren se od těch stávajících liší v mnoha aspektech. Prvním výrazných rozdílem je fakt, že malé modulární reaktory dosahují menších výkonů v rozmezí jednotek (tzv. mikroreaktory) až nižších stovek MW (do 300 MW, ale existují i větší). I když se tato vlastnost na první pohled jeví jako nejvýraznější rozdíl mezi SMR a tradičními jadernými elektrárnami s výkony mezi vyššími stovkami až dvěma tisíci MW, tak se zdaleka nejedná o nejpodstatnější rozdílový aspekt. [1]

Podstatnější rozdílový aspekt, než je samostatný fakt nižšího výkonu, je uschován za druhým slovem v názvu – **modulární**. Obvyklý postup při výstavbě jaderné elektrárny je totiž práce se standardizovaným projektem, který se však v průběhu plánování různým způsobem upravuje a mění, aby vyhovoval každé jednotlivé realizaci. U valné většiny případů to pak ve finále znamená, že je každá jaderná elektrárna víceméně unikátní. Právě tyto úpravy jsou pak ale důvodem, proč se každá taková výstavba dlouhé roky táhne a dochází v ní ke zpoždění. Příkladem elektrárny, která již nabrala několikaleté zpoždění, může být jaderná elektrárna Flamanville v severní Francii. Třetí blok této jaderné elektrárny měl zahájit svůj provoz již v roce 2012. Místo toho jej však v současné době čeká ještě dokončení posouzení bezpečnosti, a s tím spojený veřejný konzultační proces. [1; 2]

Myšlenka SMR oproti tomu plánuje maximálním možným způsobem standardizovat celý projekt. Cílem by pak měla být výroba celého jaderného zařízení v k tomu určené továrně. Takovýto výsledný produkt by si následně mohl zákazník koupit podobným způsobem, jakým si kupuje kupříkladu auto či lednici. Z tohoto pohledu jde tedy o značné urychlení prací z hlediska kontrol a lepší přípravy komponent, které probíhají v uzavřeném a lépe kontrolovatelném prostředí. Licenční řízení by se zde poté v ideálním případě zkrátilo pouze na dva kroky. Prvním krokem by bylo zhodnocení cílové lokality, zdali vyhovuje požadavkům spojených s provozem daného typu SMR. Druhým pak zhodnocení samotného budoucího provozovatele. [1]



Obrázek 1: Schéma porovnání SMR vůči tradiční jaderné elektrárně [3]

SMR dělíme podle použité technologie na reaktory lehkovodní (generace lll.+) a reaktory IV. generace.

Mezi ***lehkovodní reaktory*** řadíme reaktory typu PWR (tlakovodní reaktory) a BWR (varné reaktory). Hlavní výhodou oproti reaktorům IV. generace je skutečnost, že se v obou případech jedná o již celkem dosti zvládnuté technologie, které mají na mnoha místech po světě (USA, Francie, Čína, Rusko, Kanada atd.) většinové zastoupení. To ve výsledku znamená, že se u projektování lehkovodních SMR dá z velké míry vycházet z konstrukcí již fungujících jaderných reaktorů (samozřejmě je nutno tuto konstrukci zmenšit a poupravit, aby se dala zařadit pod pojem SMR) a z mnohaletých zkušeností.

Reaktory IV. generace jsou z hlediska zkušeností přesným opakem lehkovodních reaktorů. Jedná se totiž zatím převážně pouze o demonstrační reaktory nebo dokonce jen o projekty. Většina těchto reaktorů pracuje s rychlými neutrony a uzavřeným palivovým cyklem, což by mělo mít za následek zvýšení efektivity využití jaderného paliva a zároveň snížení množství radioaktivních odpadů.

2. Přehled vybraných designů SMR

V této kapitole budou uvedeny pouze některé z obrovského množství stávajících designů SMR. Uvedené designy SMR jsou vybrány buďto díky jejich slibně vypadajícím parametrům anebo kvůli jejich specifické konstrukci. Zároveň je i nutno podotknout, že některé z těchto uvedených designů jsou přímo zapojeny do výběrového řízení o výstavbu SMR v České republice.

VOYGR™

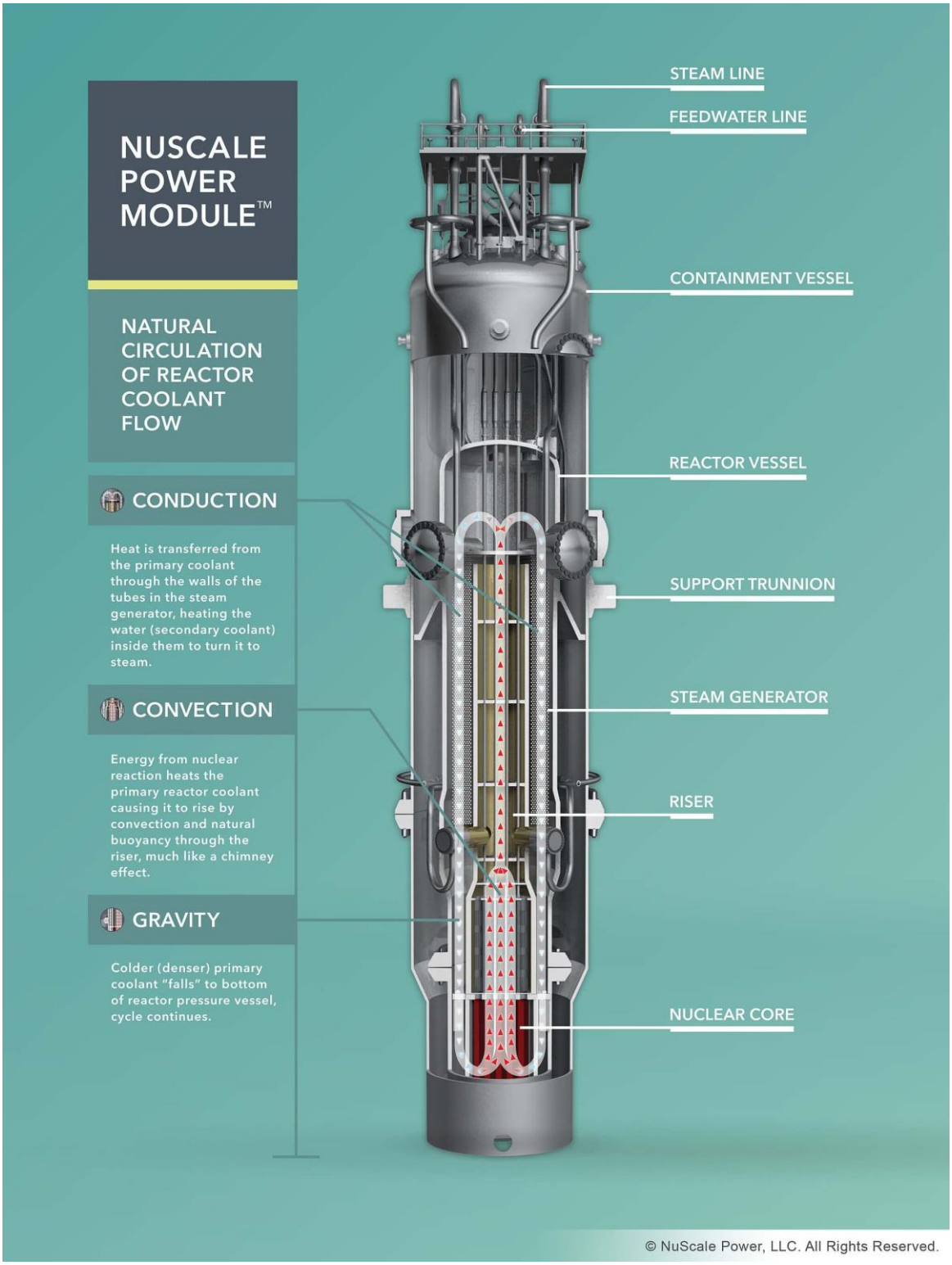
VOYGR™ je malý modulární reaktor od americké společnosti NuScale Power, která od roku 2019 spolupracuje i s českou firmou ČEZ. Jedná se o reaktor typu PWR (tlakovodní reaktor) s tzv. přirozenou cirkulací, jehož jmenovitý tepelný výkon dosahuje 250 MWt a elektrický následně 77 MWe. Jako palivo pak reaktoru slouží uran s obohacením na 4,95 %. Jedná se tedy o stejný typ paliva, který se používá u většiny stávajících tlakovodních reaktorů. Rozdíl lze nalézt pouze v délce palivových sestav, která je zde pouze 2 metry. [4; 5]

VOYGR™ aplikuje v provozu princip konvekčního chlazení (konvekční chlazení – proces přenosu tepla prouděním kapaliny nebo plynu, který využívá přirozeného pohybu tekutiny nebo plynu v důsledku změny jejich hustoty s teplotou), které se v jaderné energetice řadí mezi chlazení pasivní. To znamená, že je VOYGR™ schopen chladit aktivní zónu bez jakéhokoliv přívodu energie. Jedinou pohyblivou součástí, kterou tento SMR disponuje, je tak systém pohonu regulačních tyčí. [4; 5]

Zásadní rozdíl oproti klasickým PWR reaktorům je krom modularity i samotná konstrukce reaktoru. Příkladem můžou být parogenerátory, které jsou zde umístěny uvnitř tlakové nádoby reaktoru, nebo kontejnment, který je zde situován pouze jako ochranný obal tlakové nádoby reaktoru. Takovýto celek je následně ponořen v bazénu s vodou, jež se celý nachází pod úrovní terénu. [4; 5]

NuScale Power uvažuje o nasazení reaktoru ve třech různých výkonnostních typech elektráren. VOYGR-4, VOYGR-6 a VOYGR-12. Jak již název napovídá, číslo uvedené za názvem reaktoru je počet reaktorů použitých v jednotlivých výkonnostních typech elektráren. VOYGR-4 dává celkový výkon 1 000 MWt a 308 MWe, VOYGR-6 pak 1 500 MWt a 462 MWe a VOYGR-12 následně 3 000 MWt a 924 MWe. [4; 5]

Výměna paliva by zde měla probíhat za pomoci mostového jeřábu, který by vždy dopravil jeden tento modul z jeho původního umístění v bazénu do speciální oddělitelné části bazénu pro doplňování paliva. Celý tento proces by tak probíhal pod vodní hladinou. [4; 5]

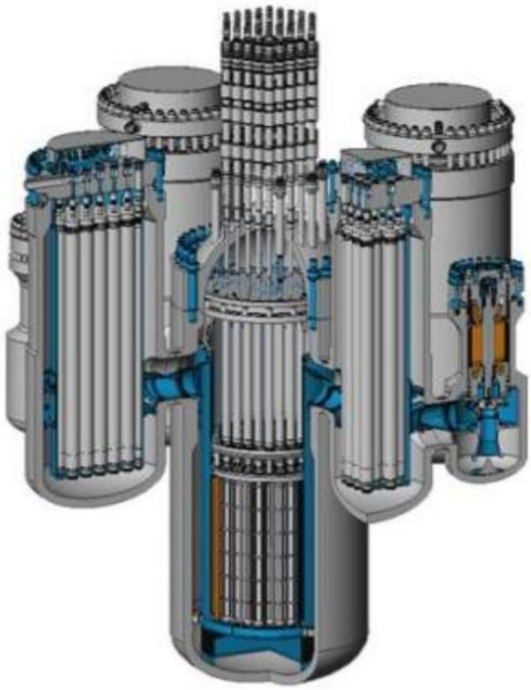


Obrázek 2: Schéma SMR od společnosti NuScale [6]

VBER – 300

VBER-300 je malý lehkovodní modulární reaktor ruského typu VVER (PWR), vyvíjený společností Rosatom. Dosahuje tepelného výkonu 917 MWt a elektrického výkonu 325 MWe. Jako palivo je zde použit uran obohacený na hodnotu 4,95 %. Design VBER-300 vychází z modulárních reaktorů využívaných pro pohon lodí a ponorek. I z tohoto důvodu by měla být jednou z funkcí tohoto reaktoru tzv. desalinizace, alias schopnost odsolování mořské vody. Reaktor VBER-300 byl vyvinut na základě zkušeností získaných při návrhu a provozu reaktorů VVER. VBER-300 tedy ve výsledku čerpá z designu reaktorů využívaných u lodí a ponorek zároveň se zkušenostmi získaných z provozu reaktorů VVER. Díky tomu disponuje tento SMR zlepšenou bezpečností společně s nižšími náklady při výstavbě. [4; 5; 7]

Reaktor VBER-300 je zároveň koncipován tak, aby byl schopen umožnit tzv. víceblokový typ jaderné elektrárny. [4; 5; 7]

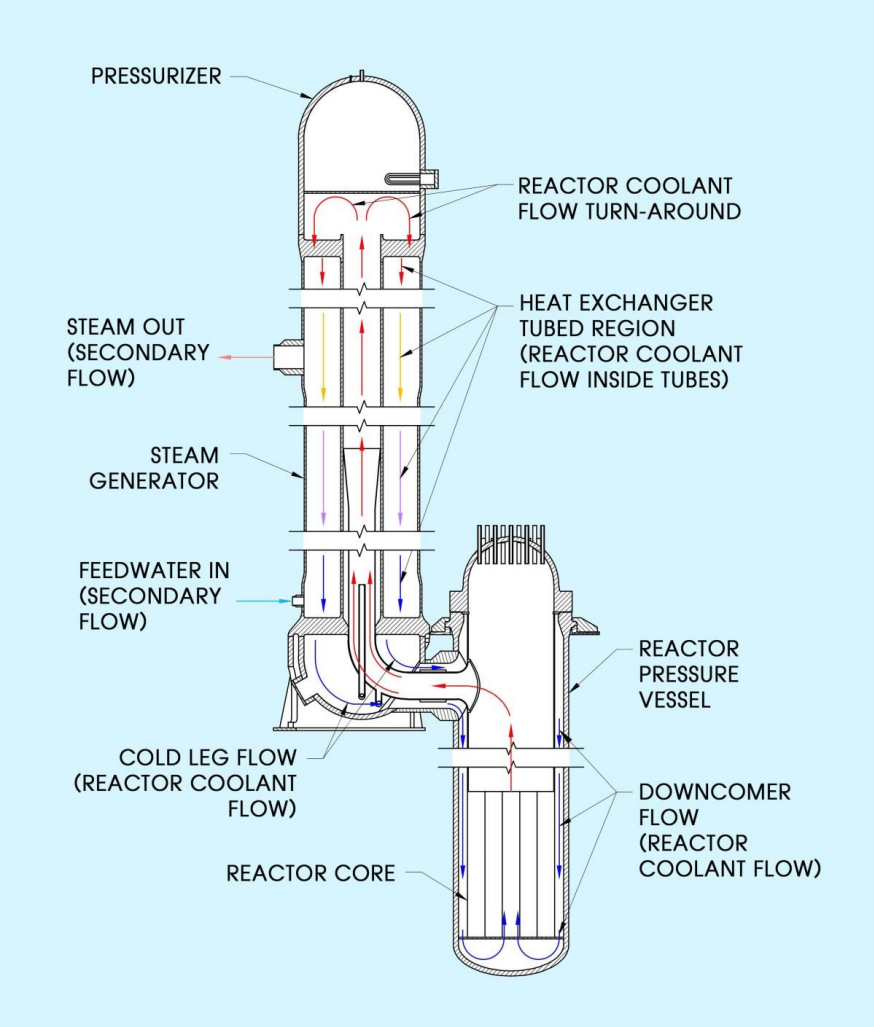


Obrázek 3: Schéma SMR typu VBER – 300 [8]

SMR – 160

Jedná se o malý modulární reaktor s externím horizontálním parogenerátorem, který je vyvíjen americkou společností Holtec International. Jeho jmenovitý tepelný výkon činí 525 MWt a výkon elektrický pak 160 MWe. Primárním využitím reaktoru SMR – 160 je výroba elektrické energie s možností volitelného kogeneračního vybavení (např. výroba vodíku, městské vytápění, desalinizace). Jako palivo je zde použit obohacený uran, s možností využití tzv. směsného oxidického (MOX) paliva. SMR – 160 obsahuje 57 palivových souborů o standardní délce. Výměna paliva zde probíhá podobně jako u větších reaktorů typu PWR s nutností odstavení bloku. [5; 9]

Stejně jako v případě reaktoru VOYGR^{TM}, tak i SMR – 160 disponuje plně pasivním chlazením. Celý reaktor vyjma parogenerátoru je následně instalován pod úrovní terénu s prostorem pro uložení použitého paliva. Životnost reaktoru je předpokládána v délce 80 let. [5; 9]



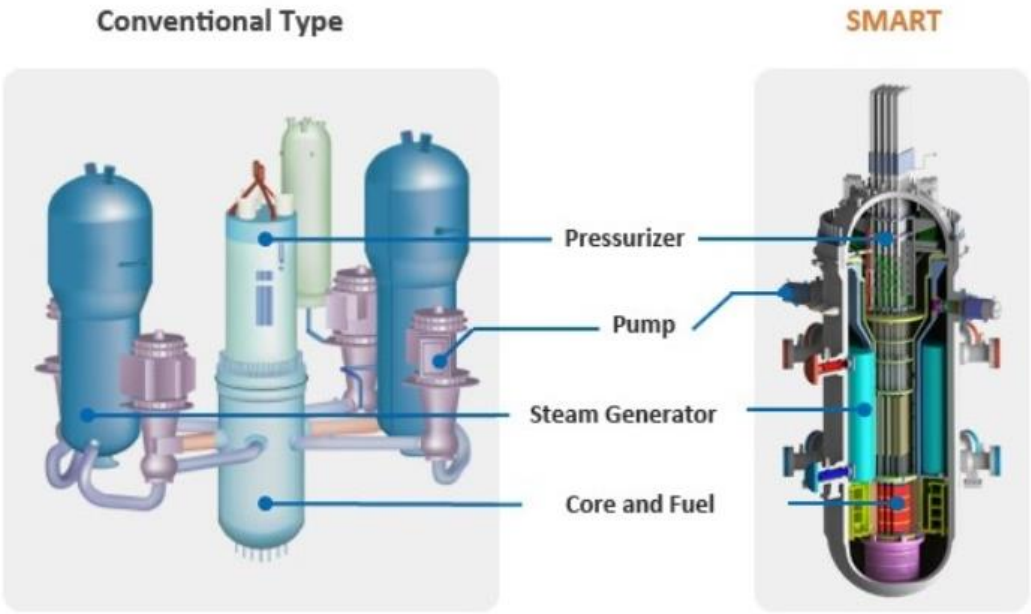
Obrázek 4: Schéma reaktoru SMR – 160 [10]

SMART

Malý modulární reaktor SMART (System-integrated Modular Advanced Reactor) od Jihokorejské firmy KAERI patří, stejně jako všechny doposud zmíněné reaktory, do skupiny tlakovodních reaktorů. Jeho jmenovitý tepelný výkon činí 365 MWt a elektrický následně 107 MWe. Konstrukce reaktoru SMART integruje parogenerátory do tlakové nádoby reaktoru a celý tento systém následně disponuje pokročilými bezpečnostními prvky. SMART je navržen převážně pro výrobu tepla a elektřiny, ale v případě nutnosti je i schopen odsolovat mořskou vodu v menších městech, ostrovech a průmyslových zónách. Pokud by měl pracovat na principu kogenerace a společně s výrovou tepla a elektřiny produkovat i odsolenou vodu, tak je schopen dosáhnout elektrického výkonu až 90 MWe s produkcí 40 mil. litrů odsolené vody za den. [4; 5; 11]

SMART je navržen jako bezpečný a spolehlivý reaktor s aktivními i pasivními bezpečnostními prvky. Jeho reaktivita je během standardního provozu regulována pomocí řídících tyčí a rozpustného bóru. [4; 5; 11]

Reaktor využívá 57 palivových souborů, které jsou podobné souborům pro standardní reaktory PWR, jen kratší. Je zde použito palivo na bázi uranu s obohacením na úrovni kolem 4,8 %. Životnost reaktoru je odhadována na více než 60 let. [4; 5; 11]



Obrázek 5: Schéma reaktoru SMART [12]

AP300™ SMR

Malý lehkovodní modulární reaktor vyvíjený americkou společností Westinghouse Electric Company, která se v programu jaderné energetiky v ČR pohybuje již od roku 1993, kdy se Westinghouse stal strategickým dodavatelem řídících a kontrolních systémů pro Jadernou elektrárnu Temelín. Reaktor dosahuje jmenovitého výkonu 300 MWe a 900 MWt. Jeho design vychází z konceptů jednoduchosti a pokročilé pasivní bezpečnosti (přirozená cirkulace teplosměnného média) demonstrovaných v dřívějších návrzích elektrárny AP1000®. Tato inspirace v elektrárně AP1000® slibuje nejvyšší úroveň bezpečnosti, odolnosti a jistoty v licencování, výstavbě a provozu. Nasazení reaktoru AP300™ SMR je následně uvažováno v podobě samostatných jednotek. [5; 13]

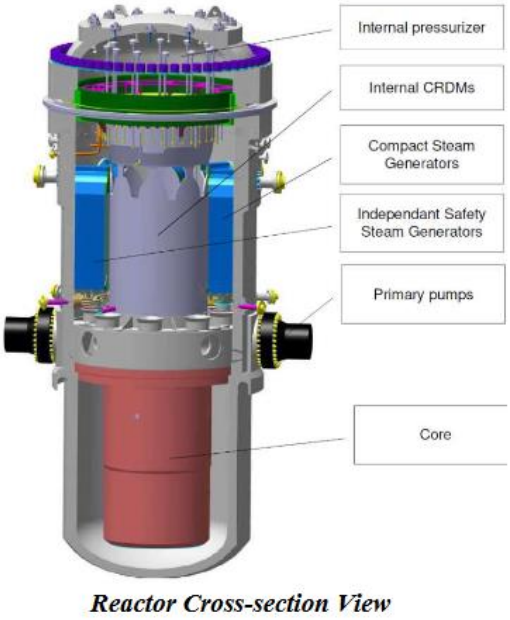
AP300™ SMR omezuje velikost hlavních komponent tak, aby umožnil snadnější přepravu (železnice, silnice, vodní cesta), což má za výsledek snížení potřeby nákladné infrastruktury a zároveň zvýšení počtu možných lokalit pro výstavbu. [5; 13]

Obrázek 6: Schéma reaktoru AP300™ SMR [5]

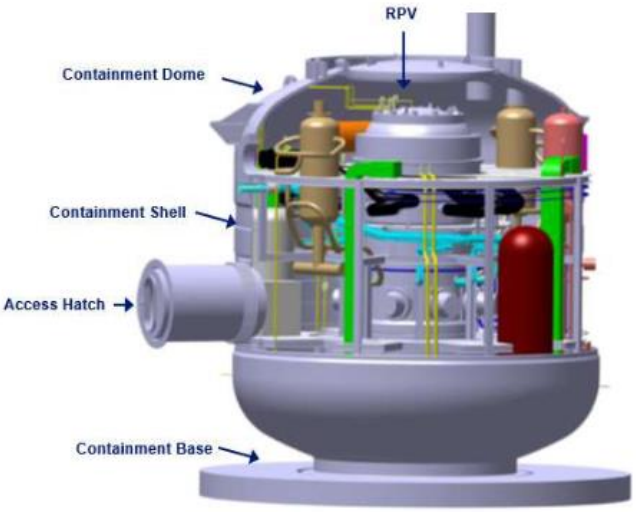
NUWARD™

NUWARD™ představuje další reaktor z řady malých lehkovodních modulárních reaktorů typu PWR. Tento návrh SMR vyvíjí francouzská společnost EDF, která si od návrhu, krom exportu do jiných zemí, slibuje i možné nahrazení většiny momentálně fungujících uhelných elektráren v zemi. Reaktor jako takový by měl disponovat jmenovitým výkonem 170 MWe a 540 MWt, přičemž se uvažuje použití vždy dvou nezávislých reaktorových jednotek, a to v provedení dvoubloku (340 MWe a 1080 MWt). [5]

Tento typ SMR je zajímavý především svojí konstrukcí, ve které integruje hlavní komponenty systému, jako jsou systém zdroje páry, mechanismus pohonu řídících tyčí či deskové parní generátory, přímo do tlakové nádoby reaktoru. Tlaková nádoba reaktoru (na obrázku označená jako RPV) je poté instalována v další vrstvě ocelové ochranné konstrukce, která je ponořena do bazénu naplněného vodou. Díky tomuto konstrukčnímu řešení je NUWARD™ schopen pomocí pasivních systémů, bez potřeby externí dodávky elektrické energie zajistit dostatečný čas 3 dnů pro zvládnutí krizové situace. [5]



Obrázek 7: Schéma tlakové nádoby reaktoru NUWARD™ [5]



Obrázek 8: Schéma containmentu NUWARD™ [5]

Rolls – Royce SMR

Poslední z řady uvedených malých lehkovodních modulárních reaktorů je reaktor Rolls – Royce SMR. Jde o koncept SMR typu PWR od společnosti Rolls – Royce SMR Ltd sídlící ve Velké Británii. Z uvedených SMR se jedná o výkonově největší reaktor. I když už by se dal řadit mezi střední jaderné reaktory, řadíme ho díky použitým moderním technologiím právě mezi SMR. Reaktor obsahuje 121 palivových sestav a má aktivní délku paliva 2,8 m, což přináší jmenovitý výkon 470 MWe a 1358 MWt. To je pro představu vyšší hodnota, než u dříve zmiňovaného dvoubloku od společnosti NUWARD^{TM} (2x76 palivových sestav). [5]

Rolls – Royce SMR disponuje navíc kromě pasivních bezpečnostních systému i aktivními bezpečnostními systémy (například systém pro regulaci tepla v reaktoru). [5]

Design může být mimo jiné konfigurován i tak, aby podporoval další aplikace vyžadující teplo nebo kogeneraci, stejně jako poskytoval nízkouhlíkový zdroj energie pro výrobu e-paliv. [5]

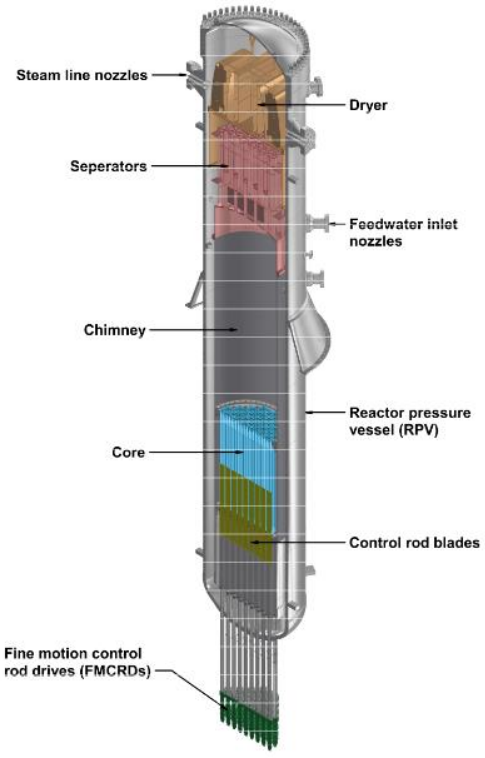
Obrázek 9: Schéma reaktoru Rolls – Royce SMR s připojenými parogenerátory [14]

BWRX – 300

Jedná se o malý modulární reaktor typu BWR (boiling water reaktor) navržený společností GE Hitachi Nuclear Energy. Jmenovitý výkon reaktoru činí 300 MWe a 870 MWt, přičemž se jeho nasazení uvažuje v podobě samostatných jednotek. Cílovými aplikacemi reaktoru BWRX-300 tak jsou generování elektrické energie, městské vytápění, výroba syntetických paliv, výroba vodíku a další aplikace tepelné energie. Reaktor se z velké míry inspiroval od novodobého ESBWR reaktoru (Economic Simplified Boiling Water Reactor) od téže firmy, jehož jmenovitý výkon činí 1520 MWe. BWRX-300 však oproti ESBWR disponuje řadou moderních technologií, jako jsou například systém pro přirozenou cirkulaci teploměrného média nebo menší suchý kontejnment. Navíc jsou zde také instalovány pasivní systémy, které zaručují jednodušší provoz. [4; 5; 15]

BWRX-300 využívá pokročilé technologie, jako je například pasivní bezpečnostní systém pro přirozenou cirkulaci teploměrného média, který umožňuje, aby se reaktor v případě havárie automaticky ochlazoval a udržoval bezpečnou teplotu bez zásahu lidského faktoru. [4; 5; 15]

Jako palivo je zde použit uran obohacený na úroveň 3,4 % (menší hodnota než u tradičních BWR), což zlepšuje hospodaření s palivem a snižuje jeho náklady. [4; 5; 15]



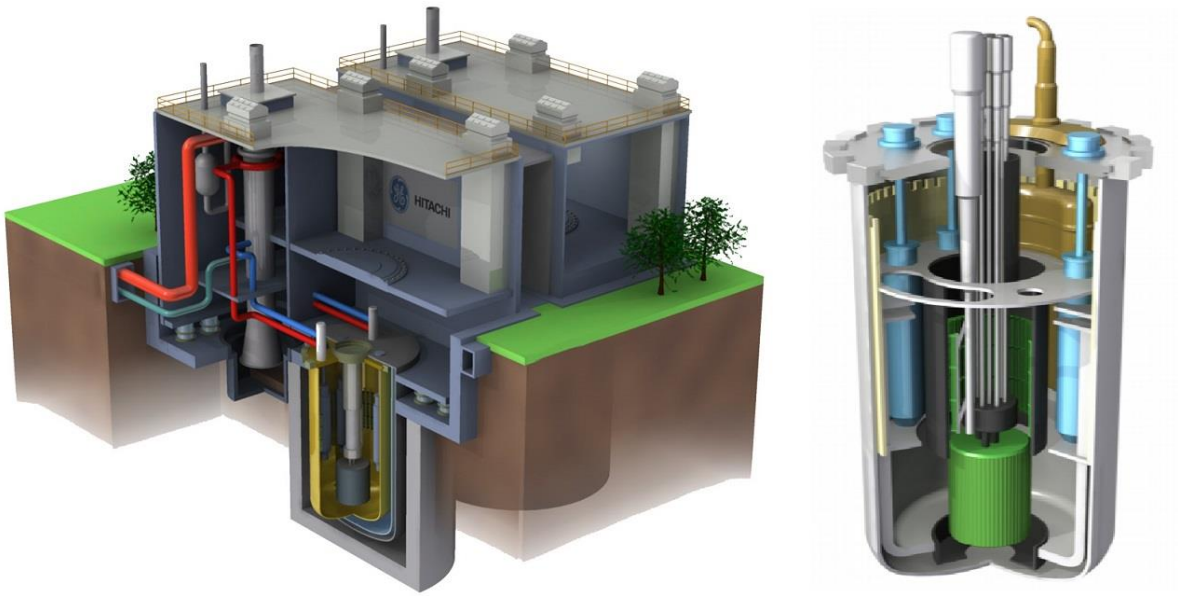
Obrázek 10: Schéma reaktoru BWRX – 300 [5]

PRISM

PRISM, alias Power Reactor Innovative Small Module, je malý modulární sodíkem chlazený rychlý reaktor od společnosti GE Hitachi Nuclear Energy o jmenovitém výkonu 311 MWe a 840 MWt. Tento SMR spadá rovněž do skupiny tzv. reaktorů bazénového typu, což v tomto případě znamená, že je celý primární systém reaktoru ponořen v bazénu naplněném sodíkem o teplotě cca 500 °C. [4; 5; 16]

V případě realizace elektrárny s tímto typem SMR by jeden blok tvořily dva reaktory, přičemž by každý z nich měl svůj vlastní parogenerátor. Elektrárna by tak dosahovala výkonu 622 MWe a 1 680 MWt. [4; 5; 16]

Jednou z hlavních vlastností SMR typu PRISM je jeho schopnost recyklovat použité jaderné palivo. Použité palivo z lehkovodních reaktorů obsahuje stále asi 95 % dostupné energie, tuto energii je možné využít právě v rychlých množivých reaktorech. Tento proces se nazývá uzavřený jaderný palivový cyklus a může pomoci snížit množství radioaktivního odpadu. [4; 5; 16]



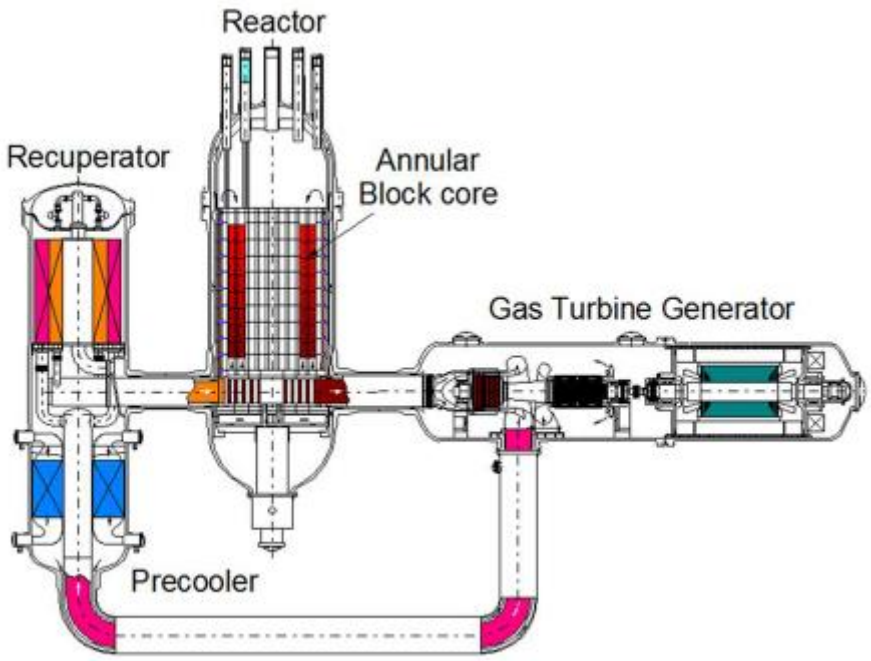
Obrázek 11: Schéma reaktoru typu PRISM [17]

GTHTR300

Gas Turbine High Temperature Reactor (GTHTR300) je víceúčelový malý modulární héliem chlazený reaktor o jmenovitém výkonu 600 MWt a 300 MWe, který je vyvíjen japonskou společností JAEA. Cílovými aplikacemi reaktoru jsou generování elektrické a tepelné energie, termochemická výrobu vodíku a desalinizace. Jakožto reaktor IV. generace nabízí GTHTR300 značné výhody oproti stávajícím reaktorům na lehkou vodu (hlavně výrazně větší bezpečnost a jednoduchost). Teplota chladiva (hélia) se zde pohybuje v rozmezí 850-950°C. [5]

Reaktorový systém kombinuje vysokoteplotní plynem chlazený reaktor s plynovou turbínou s přímým cyklem pro generování elektrické energie při oběhu chladiva v reaktoru. Systém se skládá ze tří funkcionálně orientovaných tlakových nádob, které obsahují jádro reaktoru, plynovou turbínu a výměníky tepla. Více-nádobový systém usnadňuje modulární konstrukci a nezávislý přístup k údržbě funkčních nádobových jednotek. Reaktorový systém je umístěn pod úrovní terénu v reaktorové budově. [5]

Účinnost tohoto typu reaktoru je odhadována na 45-50 %. [5]

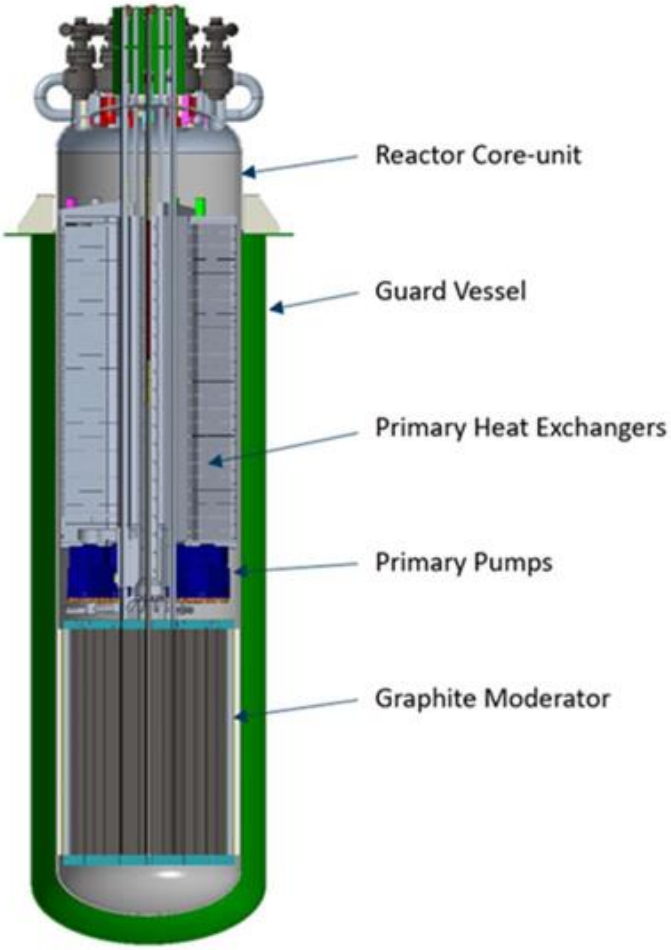


Obrázek 12: Schéma reaktoru typu GTHTR300 [18]

IMSR400

IMSR (Integral Molten Salt Reactor) je malý modulární reaktor chlazený roztavenou fluoridovou solí od společnosti Terrestrial Energy. Oproti klasické verzi MSR (Molten Salt Reactor) reaktoru integruje IMSR reaktor čerpadla a primární výměníky tepla do uzavřené tlakové nádoby reaktoru. Celá tato tlaková nádoba je následně zcela nahrazena na konci své životnosti (nominálně 7 let). Jmenovitý tepelný výkon reaktoru IMSR400 činí 440 MWt a elektrický následně 195 MWe. [4; 5; 19]

Palivo je zde využíváno v kapalném stavu při teplotě mezi 600 a 700 °C. Reaktory typu MSR a IMSR disponují navíc ještě tzv. vloženým okruhem, který předává teplo z primárního okruhu na sekundární, a tím slouží jako další bezpečnostní prvek (ochrana proti případnému úniku roztavené fluoridové soli do vody). Nouzové chlazení a odvod zbytkového tepla jsou následně řešeny pasivně. [4; 5; 19]



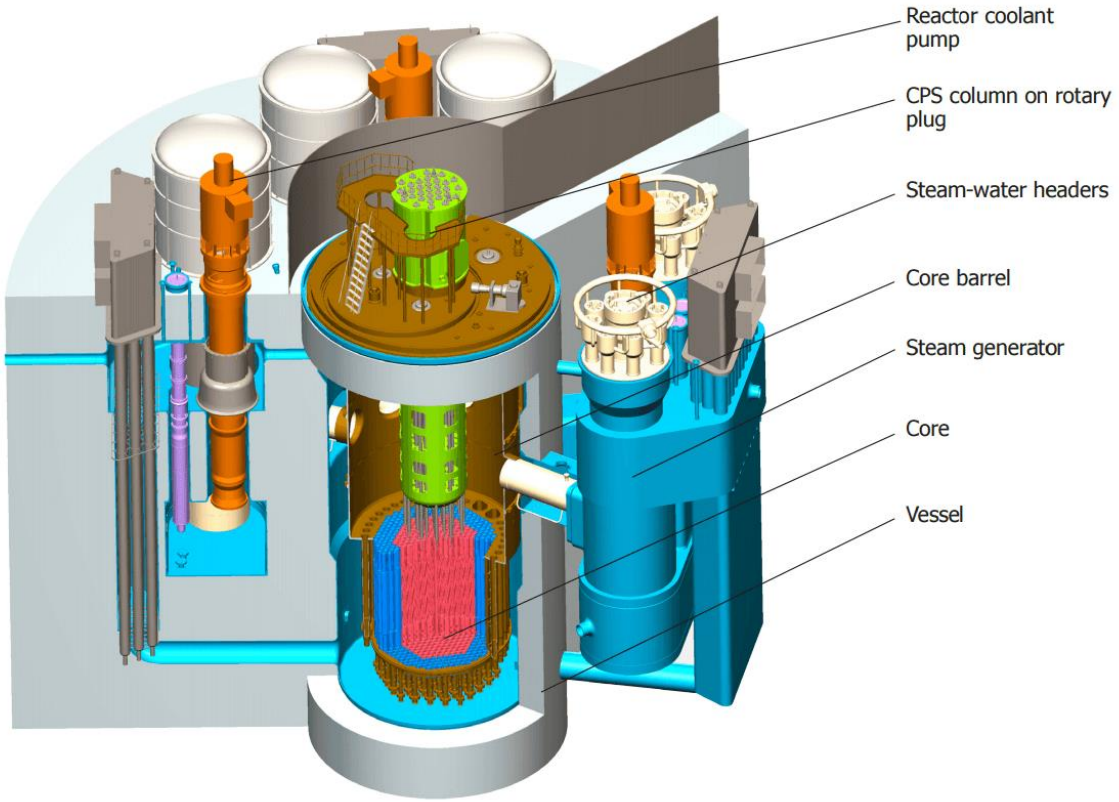
Obrázek 13: Schéma reaktoru typu IMSR [5]

BREST-OD-300

Ruský BREST je rychlý neutronový reaktor od společnosti NIKIET o jmenovitém výkonu 700 MWt a 300 MWe, u kterého je jako chladivo použito olovo. Jedná se o reaktor bazénového typu, což v tomto případě znamená, že veškeré jeho hlavní komponenty jsou ponořeny v bazénu naplněném olovem. [4; 5]

Reaktor využívá směsného paliva (U-Pu) v nitridické formě a pracuje na principu dvouokruhového systém přenosu tepla k dodávání tepla podkritické parní turbíně a generování elektřiny. Vlastnosti olověného chladiva ve spojení s vysokou tepelnou vodivostí poskytují reaktoru BREST-OD-300 podmínky pro úplné množení plutonia v aktivní zóně. Palivový cyklus je zde následně odhadován na 38 – 78 měsíců. [4; 5]

Výhoda tohoto typu reaktoru je pak možnost recyklace použitého paliva přímo na místě. [4; 5]



Obrázek 14: Schéma reaktoru typu BREST-OD-300 [20]

3. Význam kogenerace

Ve valné většině případů vznikala doposud elektrická a tepelná energie separátně. Princip kogenerace využívá teplo vznikající při výrobě elektrické energie (většinou se jedná o teplo z turbíny), které je jindy obvykle vypuštěno do ovzduší. Díky tomuto principu jsme následně schopni vyrábět elektrickou i tepelnou energii v jednom provozu, což přináší řadu benefitů. Mezi největší benefity patří například zvýšení účinnosti elektrárny a s tím zároveň související nižší množství spotřebovaného paliva než u oddělené výroby. [21]

Zatímco elektrická energie se dá přenášet víceméně bez větších ztrát, u energie tepelné to tak jednoduché není. Při vedení tepelné energie totiž dochází k obrovským tepelným ztrátám, které jsou způsobené například sáláním či netěsnostmi ve vodící soustavě. Z tohoto důvodu se tepelnou energii snažíme využít v lokálních oblastech okolo výroby. Díky technologii SMR s využitím kogenerace se však zdá, že by se tento problém mohl dát vcelku dobře vyřešit.

4. Tepelná energie – výroba a využití

Existuje mnoho způsobů, jak lze efektivně vyrobit tepelnou energii. Způsoby výroby tepelné energie dělíme do dvou základních skupin.

V první skupině mluvíme o tzv. „Konvekčních způsobech výroby“. Do této skupiny řadíme například výrobu tepelné energie pomocí spalování fosilních paliv, spalování biomasy či bioplynu a v neposlední řadě také vznik tepelné energie při štěpení jádra v jaderné energetice.

Druhou skupinu označujeme názvem „Obnovitelné způsoby výroby“. Zde mluvíme například o výrobě tepelné energie pomocí slunečního záření (fototermální elektrárny, sluneční kolektory), dále pak o výrobě za využití geotermálních energie či tepelných čerpadel.

Podle průzkumu provedeném v roce 2020 se v ČR i nadále více využívají právě konvekční způsoby výroby tepla, a to především způsob výroby s využitím spalování fosilních paliv. V tomto ohledu vede v ČR stále hnědé uhlí s podílem cca 40 %, následuje zemní plyn s 20 % a biomasa se 14 % podílem. Zbytková procenta výroby následně patří jednotlivým obnovitelným způsobům a jaderné energetice.

To při celkové výrobě 156 918 TJ (rok 2020) znamená, že pomocí hnědého uhlí se vyrobilo cca 62 400 TJ, pomocí zemního plynu asi 32 000 TJ a pomocí biomasy zhruba 22 000 TJ. O zbylé TJ se následně dělí černé uhlí a ostatní. [22]

Do budoucna je ale jasným cílem ČR a celé EU omezit výrobu tepla pomocí spalování fosilních paliv na minimum a pomalu přejít buďto na teplo získané z procesu štěpení jádra v jaderné energetice anebo na teplo vyrobené pomocí obnovitelných způsobů.

V následující části si uvedeme a rozebereme některé z hlavních a nejčastěji využívaných metod.

4.1. Spalování fosilních paliv

Zatím stále nejrozšířenější metodou výroby tepelné energie je spalování fosilních paliv. Mezi fosilní paliva řadíme uhlí, ropu a zemní plyn. Při spalování těchto paliv dochází k chemickým reakcím, při kterých se uvolňuje tepelná energie.

Uhlí

Při spalování uhlí, ať už hnědého či černého, probíhá tzv. oxidace uhlíku. To má za následek, že se společně s tepelnou energií uvolňují i produkty spalování, jako jsou oxidy uhličité a oxidy síry.

Ropa

Při spalování ropy se oxiduje uhlovodíkový řetězec obsažený v ropných produktech. Díky tomu následně s teplem vznikají oxidy uhličité, voda a další produkty.

Zemní plyn

Při spalování zemního plynu dochází k reakci methanu s kyslíkem. To zapříčiňuje, že společně s teplem vznikají i oxidy uhličité, voda a další produkty.

Hlavním problémem při spalování fosilních paliv je vznik velkého množství skleníkových plynů, které vznikají nedokonalým spalováním jednotlivých druhů paliv a které velkou částí přispívají ke globálnímu oteplování a klimatickým změnám. Navíc dochází ještě k emisím znečišťujících látek, které mohou mít škodlivý vliv na životní prostředí a lidské zdraví.

Z tohoto důvodu je v posledních letech kladen velký důraz na rozvoj a výzkum alternativních a udržitelnějších zdrojů energie.

Příkladem elektrárny na spalování fosilního paliva, v tomto případě černého uhlí, je ***Elektrárna Dětmarovice (EDĚ)***. Hlavní částí této elektrárny jsou 3 výrobní bloky o instalovaném výkonu 3x200 MW, což z EDĚ dělá největší černouhelnou elektrárnu na území České republiky. Elektrárna je schopna ročně vyrobit okolo 2 TWh elektrické energie a více než 650 TJ tepla, které je následně distribuováno do měst Orlová a Bohumín. Zajímavostí na této elektrárně je také fakt, že se jedná o jednu z vybraných elektráren, které by mohly být v budoucnu přestavěny právě na technologii SMR. [23]

4.2. Spalování biomasy a bioplynu

Spalování biomasy a bioplynu řadíme mezi výrobu tepelné a elektrické energie konvekčním, ale zároveň i obnovitelným způsobem.

Spalování bioplynu

Bioplyn je směs metanu a oxidu uhličitého, která vzniká při anaerobním rozkladu organických materiálů, jako jsou například zemědělské či organické odpady. [24]

Při spalování bioplynu dochází k podobné reakci jako v případě spalování zemního plynu, avšak v tomto případě je metan nahrazen biologicky produkovaným metanem. Proces spalování bioplynu je považován za obnovitelný, jelikož organické materiály, ze kterých bioplyn vzniká, mohou být obnovitelně získávány. [24]

Spalování biomasy

Do pojmu biomasa lze řadit organické materiály, jako jsou například energetické plodiny, dřevěné štěpky, sláma nebo odpad z lesního hospodářství. [24]

Biomasa jako taková může být použita jako palivo ve spalovnách, nebo může být přeměněna na bioplyn či biopaliva. Při spalování biomasy dochází k uvolňování energie, která byla původně pohlcena rostlinami při fotosyntéze. Proces spalování je považován za obnovitelný, jelikož rostliny, které biomasu tvoří, mohou být znovu pěstovány. Zároveň zde vzniká tzv. uzavřený uhlíkový cyklus, jelikož pěstované rostliny pohlcují stejné množství oxidu uhličitého, jaké uvolňují při jejich spalování. [24]

Obě tyto metody jsou součástí snahy o přechod k udržitelnějšímu a obnovitelnému způsobu výroby energie, který minimalizuje škodlivé dopady na životní prostředí ve srovnání s tradičními fosilními palivy. [24]

Příkladem elektrárny, která kombinuje spalování fosilních paliv se spalováním biomasy, je ***Elektrárna Poříčí II.*** Tato elektrárna dosahuje tepleného výkonu o hodnotě 294 MW. Za rok je schopna vyprodukovat 1 200 TJ tepla, které následně distribuuje pomocí své parní a horkovodní sítě o celkové délce 73 km. Elektrárna Poříčí II však pro ČR znamená mnohem více, než pouze zdroj energie a tepla. Díky svému strategickému umístění totiž pomáhá při udržování dobrých napěťových poměrů v síti. [25]

4.3. Tepelná energie z jaderných elektráren

Tento způsob výroby tepelné energie sice momentálně nepatří mezi nejvyužívanější, ale díky průkopnickému myšlení při využívání tepla ze stávajících jaderných elektráren a díky připravované technologii SMR se zdá, že bude mít tento princip výroby v budoucnu velké celosvětové zastoupení.

Tepelná energie je odebírána ze sekundárního okruhu jaderné elektrárny (jedná-li se o elektrárnu s reaktorem typu PWR nebo VVER; v případě elektrárny s reaktorem typu BWR je tepelná energie odebírána z okruhu primárního) pomocí přenosu tepla mezi párou odebranou z parních turbín a vodou přivedenou do tepelných výměníků.

Příkladem jaderné elektrárny, která umožňuje tento typ kogenerace, je ***Jaderná elektrárna Temelín (ETE).*** Tato jaderná elektrárna dodává tímto způsobem teplo krajskému městu České Budějovice a městu Týn nad Vltavou. Dodání ohřáté vody do Českých Budějovic (90–140 °C) a následné vrácení ochlazené vody (cca 70 °C) zpět na ETE zajišťuje kromě dvou předizolovaných potrubí o celkové délce 26 km a průměru 80 a 71 cm rovněž 14 čerpadel umístěných ve třech speciálních stanicích. Ročně by pak měla ETE dodávat Českým Budějovicím cca 750 TJ tepla. Horkovod vedoucí do Českých Budějovic je v provozu teprve rok, na rozdíl od něj však horkovod do Týna nad Vltavou dodává teplo tímto způsobem již 26 let. Týn nad Vltavou si tímto způsobem každoročně zajistí přibližně 170 TJ tepelné energie. [26; 27]

Do budoucna by pak tento typ kogenerace měla být schopna zvládat i ***Jaderná elektrárna Dukovany (EDU)***. Ta by takto měla zvládat ročně dodávat 2 000 TJ tepla do největšího města Moravy, Brna. Předpokládané náklady výstavby, která by měla být dokončena v roce 2030, se pohybují okolo 19 miliard korun. [28]

4.4. Tepelná energie ze slunečního záření

Poslední metodou je výroba tepelné energie pomocí slunečního záření. Jedná se o způsob výroby tepelné energie, který řadíme do skupiny „Obnovitelné způsoby výroby".

Tepelnou energii ze slunečního záření získáváme pomocí dvou níže uvedených technologií.

Tepelné kolektory

Zařízení určené k pohlcení dopadajícího slunečního záření. Tepelná energie ze slunečního záření je předávána teplonosnému médiu, které ji následně v tepelném výměníku opět předává nejčastěji užitkové vodě (ohřev vody v domácnosti). Účinnost tepelných kolektorů se pohybuje mezi 45 až 55 %. [24]

Fototermální elektrárny

Existuje sice mnoho typů fototermálních elektráren, ale všechny ve výsledku pracují na stejném principu. Sluneční záření se zde pomocí zrcadel soustředí do jednoho bodu, ve kterém se obvykle nachází tepelný výměník. Účinnost fototermálních elektráren se pohybuje mezi 20 a 25 %. [24]

Nejvíce jsou tyto elektrárny k nalezení ve Španělsku, Americe, ale aktuálně už i v Číně. [24]

Technologie tepelných kolektorů je v dnešní době hojně využívána a lze ji nalézt na mnoha rodinných domech či různých firemních budovách ve světě i v ČR. Světovým příkladem firmy, která se rozhodla nainstalovat tepelné kolektory na svoji střechu, může být výrobce piva Heineken. Ten tímto způsobem zrenovoval svůj pivovar v Amsterdamu.

V následující kapitole bude pozornost věnována jedné z nejperspektivnějších kogeneračních metod, kterou by SMR měly být schopny realizovat. Jedná se o desalinizaci slané vody.

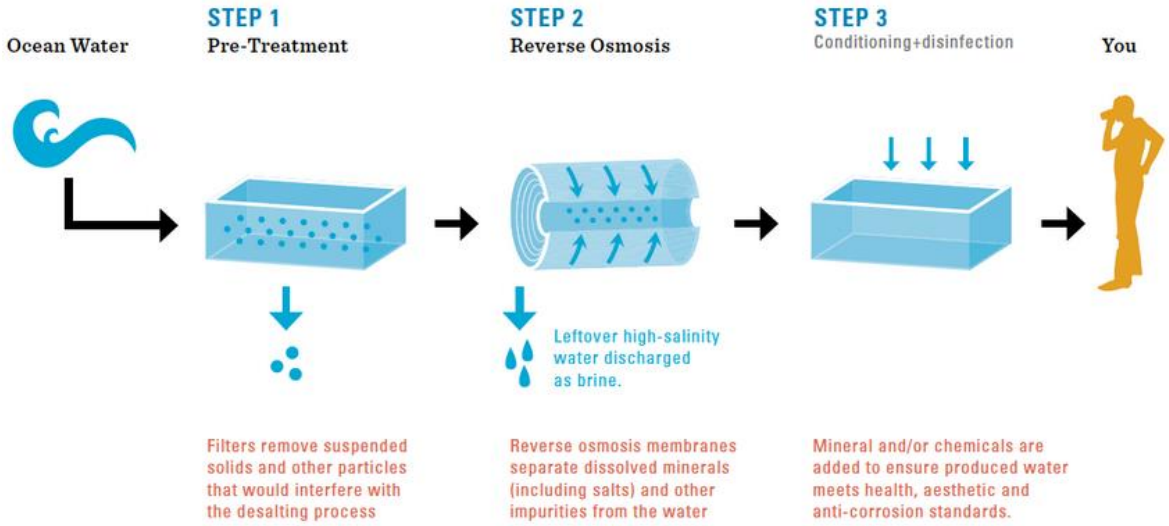
5. Desalinizace

S postupujícím růstem světové populace a zhoršováním klimatických podmínek, které zvyšují nedostatek pitné vody, se hledání udržitelných a efektivních řešení pro uspokojení rostoucí poptávky po sladké vodě stalo naléhavým globálním problémem. Desalinizace (odsolování), proces odstraňování solí a jiných nečistot ze slané či brakové vody, se objevuje jako slibné řešení tohoto problému. Jediný, avšak celkem významný problém u tohoto způsobu výroby sladké vody, je vysoká energetická náročnost a s tím dosud spojená značná produkce skleníkových plynů (využívaly se nejčastěji fosilní paliva na výrobu páry nebo elektrické energie). Řešením tohoto problému, který technologii odsolování brzdí již několik desítek let, by však mohla být technologie SMR. Ta je totiž schopna odsolovat mořskou vodu prakticky bezemisně. [29; 30]

Technologii odsolování lze rozdělit do dvou skupin – membránových a tepelných procesů.

Membránové odsolování

V tomto způsobu odsolování se využívají poloprůchodné membrány k oddělení solí a jiných nečistot od vody. Patří zde například *reverzní osmóza* nebo *nanofiltrace.* [29; 30]



Obrázek 15: Schéma postupu úpravy mořské vody [29]

Tepelné odsolování

Tato metoda zahrnuje ohřev slané vody a následné kondenzování vzniklé páry pro výrobu sladké vody. Příkladem zde mohou být *vícestupňové odpařování* nebo *vícestupňová destilace*. [29; 30]

U tohoto způsobu odsolování se uvažuje nasazení SMR k dodávání elektrické či tepelné energie. [29; 30]

Závěrem lze říci, že technologie SMR představuje slibný, nízkouhlíkový a udržitelný zdroj energie k napájení odsolovacích zařízení a řešení globální vodní krize. Očekává se totiž, že s příchodem SMR rovněž naroste i celkový zájem o technologii odsolování, která se nyní kvůli energetické náročnosti výrazným způsobem nerozšiřuje. [29; 30]

6. Vodík

Vodík je nejjednodušší a nejlehčí známý plynný chemický prvek. I když se jedná o třetí nejrozšířenější prvek na Zemi, hledali bychom jeho samostatné molekuly v přírodě jen velice obtížně. Důvodem je jeho vysoká reaktivita, díky které prakticky okamžitě tvoří sloučeniny s jinými prvky. [31]

Z hlediska využití se jedná o energeticky velmi bohaté palivo, jehož energetická hustota se pohybuje okolo 33 kWh/kg. To je pro představu cca 126x větší energetická hustota, než které dosahují elektromobilové baterie od společnosti Tesla (cca 250 – 260 Wh/kg). Tato skutečnost dělá z vodíku výborný nosič (úschovnu) energie a díky tomu i jeden z hlavních prvků, které by měly v budoucnu sloužit pro tzv. *sector coupling*. *Sector coupling* je nazýván proces, při kterém by v budoucnu mělo dojít k úplné dekarbonizaci průmyslu, dopravy a energetiky za pomoci elektrické energie vyrobené z obnovitelných a nízkoemisních zdrojů. [31]

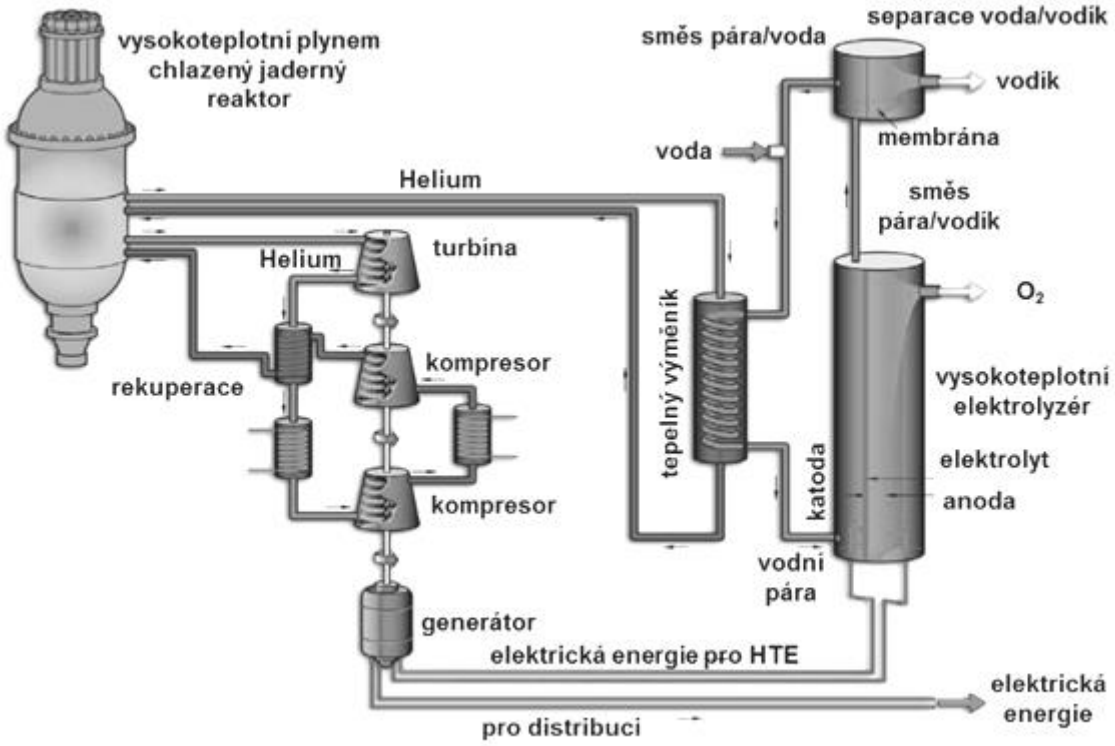
6.1. Výroba vodíku

Z nedávných průzkumů vyplívá, že 96 % veškeré světové výroby vodíku pochází z fosilních paliv, a to především ze způsobu výroby zvaným ***parní reforming zemního plynu***. Tato metoda výroby je v takto vysoké míře rozšířená proto, že se stále jedná o jeden z nejlevnějších způsobů získávání vodíku. Jde o chemický proces, při kterém se vodní pára o teplotě 750 – 950 °C mísí s metanem. Spojení těchto dvou látek má za následek reakci, při které vzniká námi žádaný vodík a dále i oxid uhličitý. Účinnost tohoto procesu se pohybuje kolem 75 %. Vodík vyrobený tímto způsobem nazýváme šedým, a to především díky velkému množství CO_2, kterého se při výrobě 1 kg vodíku vyprodukuje 11 kg. [31]

Další metodou výroby vodíku je tzv. ***přechodný způsob výroby***. Jedná se o kombinaci parního reformingu zemního plynu s technologií zvanou *Carbon Capture and Storage*, alias CCS. U tohoto způsobu výroby se vzniklé emise CO_2 zachytávají pomocí zmiňované technologie CCS (popřípadě technologie CCU – *Carbon Capture and Utilitization*), což výrazným způsobem snižuje vypouštění CO_2 do ovzduší, a to na pouhých 5 %. Takto vyrobený vodík je nazýván modrý. [31]

Do budoucna nejpodporovanější metodou je *výroby vodíku pomocí elektrolýzy vody s využitím elektřiny z udržitelných zdrojů a jaderných elektráren*. Nepříjemnou skutečností je fakt, že se produkce vodíku touto metodou pohybuje v dnešní době na hranici pouhých 4 % celkové světové výroby. Vodík vyrobený touto metodou s použitím elektřiny z obnovitelných zdrojů se nazývá zelený. Pokud je výrobcem elektrické energie jaderná elektrárna, jedná se pak o vodík růžový. V obou těchto případech se dá hovořit o prakticky bezemisní výrobě vodíku. Při elektrolýze dochází k chemickému procesu, při kterém se roztok v podobě vody štěpí na vodík a kyslík. Celková účinnost této metody se aktuálně pohybuje v rozmezí 60 až 90 % v závislosti na využité technologii elektrolyzéru. Obecně se však dá říci, že na výrobu 1 kg vodíku se spotřebuje přibližně 9 l vody a 35 až 55 kWh elektrické energie. [31]

Na následujícím schématu je vyobrazena jedna z možných variant propojení jaderného reaktoru IV. generace s vysokoteplotním elektrolyzérem.



Obrázek 16: Schéma propojení vysokoteplotní elektrolýzy vody s Jaderným reaktorem IV. generace [32]

6.2. Typy elektrolyzérů

V současné době hovoříme o třech hlavních typech elektrolyzérů. Jednotlivé typy se od sebe liší použitou elektrolytickou technologií a provozními parametry. Za hlavní typy elektrolyzérů považujeme tři níže uvedené. [33]

Alkaline water elektrolysis (AWE)

Jde o nejstarší technologii štěpení vody. Využívá se zde elektrolytického procesu v alkalickém prostředí (proces je popsán v následujícím obrázku č. 17). Jako alkalické prostředí je zde obvykle použit roztok hydroxidu draselného nebo roztok hydroxidu solného. [33]

Mezi hlavní výhody alkalického elektrolyzéru patří jeho mnoholeté osvědčení v praxi a velký rozsah požadovaných výkonů. [33]

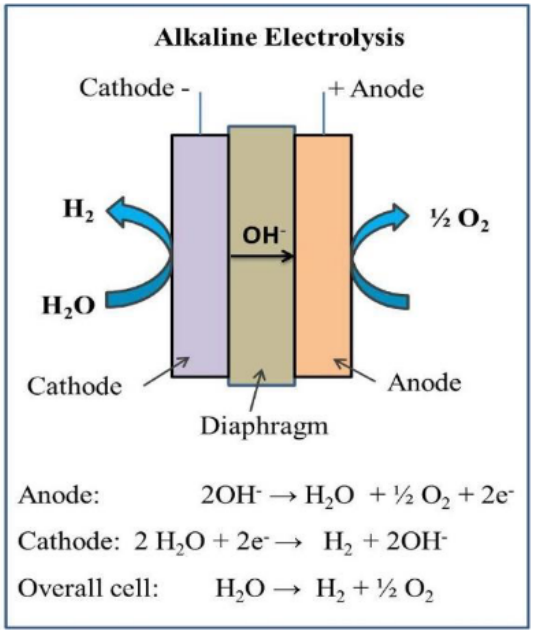
Naopak k jeho hlavním neduhům se řadí relativně nízká účinnost okolo 50 % a fakt, že metoda je značně limitovaná nízkou proudovou hustotou a nízkým tlakem. To má za důsledek velké konstrukční rozměry celého zařízení. [33]

Solid oxide elektrolysis (SOE)

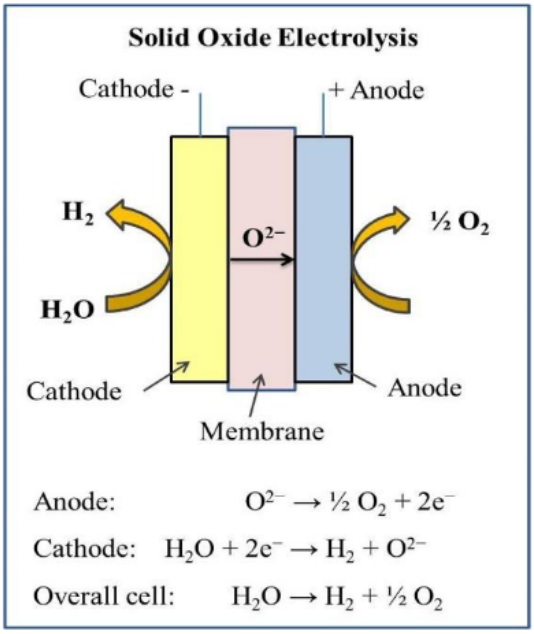
Vzhledem ke schopnosti pracovat za vyšších tlaků a teplot nachází tato metoda uplatnění v mnoha aplikacích (proces je popsán v následujícím obrázku č. 18). Oproti ostatním typům elektrolyzérů má velice cennou vlastnost v podobě produkce velice čistého vodíku. [33]

K hlavním přednostem této metody patří vysoká účinnost pohybující se mezi 85 až 90 % a schopnost produkce plynu zvaného Syngas (Syngas se produkuje při přeměně oxidu uhličitého na oxid uhelnatý), který nachází své použití ve vodíkových spalovacích motorech. [33]

Nedostatky této metody jsou v současnosti zhoršená stabilita a degradace použitých materiálů. [33]



Obrázek 17: Schéma metody AWE [33]



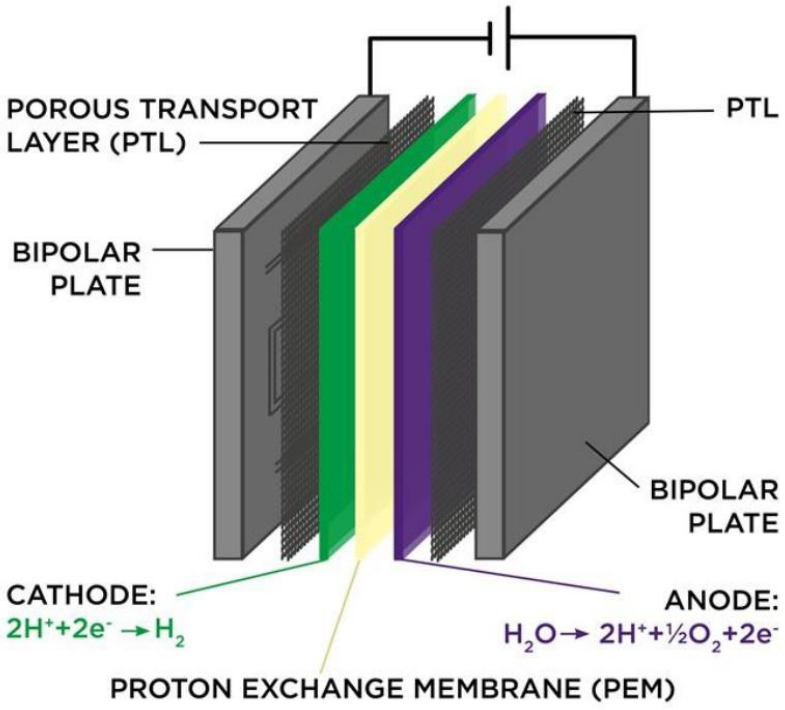
Obrázek 18: Schéma metody SOE [33]

PEM water elektrolysis

PEM metoda používá ke své funkci tzv. protonově vodivou membránu, alias PEM (proces je popsán v následujícím obrázku č. 19). Účinnost PEM elektrolyzérů se pohybuje v rozmezí 60 až 70 %. Výroba vodíku touto metodou nachází největší využití ve spojení s obnovitelnými zdroji energie, a to hlavně díky své schopnosti rychlé reakce na případné kolísání vstupního proudu, potažmo schopnosti operovat na celé škále své pracovní kapacity. [33]

K přednostem této metody patří také vyšší proudová hustota, která může dosahovat hodnot mezi 0,6 – 2 A/cm^2 (pro představu, proudová hustota metody AWE se pohybuje v rozmezí 0,2 – 0,4 A/cm^2), dále pak vyšší napěťová efektivita nebo vysoká čistota produkovaného vodíku. [33]

Mezi hlavní nevýhody zde patří vysoká cena komponent, která je z velké části způsobena použitými materiály (iridium a platina), či kyselé korozivní prostředí. [33]



Obrázek 19: Schéma metody PEM [33]

6.3. Transport vodíku

Transport vodíku sebou nese velké překážky, které výrazným způsobem ovlivňují a brzdí rozvoj možností přepravy. Mezi jednu z největších překážek patří extrémně nízká objemová hustota tohoto plynu (3,2x nižší než u zemního plynu a 2700x nižší než u benzínu). Aby mohl být vodík tedy efektivně přepravován, musí být buďto stlačen anebo zkapalněn. To s sebou ovšem nese řadu dalších komplikací a nebezpečí. Příkladem může být fakt, že aby se vodík stal kapalným, je potřeba ho zchladit na teplotu -253 °C, nebo skutečnost, že při úniku plynného vodíku do ovzduší vzniká vysoce výbušná směs. [34]

Pro distribuci vodíku se v dnešní době používají převážně tři přístupy – potrubím, vozidly s přívěsy a loděmi, přičemž se každý z nich jiným způsobem hodí pro požadovaný scénář (vzdálenost, množství, cena). [34]

Distribuce vodíku potrubím

Využití potrubí je zdaleka nákladově nejefektivnější způsob přepravy vodíku na velké vzdálenosti. Ztráty se zde pohybují okolo 1 % z celkové energie obsažené v přepravovaném palivu na 1 000 km. Vodíkové potrubí se vyrábí většinou z kovu nebo plastu, a to především kvůli jeho malým degradačním vlastnostem. [34; 35]

Stavba nových potrubí, určených výhradně pro přepravu vodíku, se sice jeví jako nejjednodušší způsob distribuce, žádá si však značné počáteční investice, a tak se velice často používá stávající infrastruktura pro přepravu zemního plynu. Využití infrastruktury zemního plynu nevyžaduje sice tak vysoké počáteční investice, na druhou stranu jsou zde ale kladeny vysoké nároky na správný podíl vodíku v přepravované směsi a navíc se u této metody musí investovat i do technologií, které jsou schopny oddělit vodík od zemního plynu po dosažení místa určení. [34]

Přeprava vodíku pomocí nákladních vozidel s přívěsy/pomocí tankerů

Tato metoda se využívá převážně k přepravě vodíku na kratší nebo středně dlouhé vzdálenosti. Vodík je zde převážen buď ve velkých nádržích, které svojí konstrukcí mohou připomínat nádrže na přepravu benzínu (díky vysokému tlaku jsou ale speciálně upraveny a dimenzovány), nebo ve středních až malých jednotkách, které konstrukcí připomínají tlakové lahve, uložených ve speciální klecích pro větší bezpečnost. [34]

6.4. Skladování vodíku

Stejně jako v případě transportu, tak se i v případě skladování vodíku objevují značné překážky, které výrazným způsobem komplikují a omezují možnosti, jakými lze vodík skladovat. Mezi dvě nejzásadnější překážky se řadí již zmiňovaná nízká objemová hustota a značně malá velikost molekul samotného vodíku. Díky těmto dvěma aspektům se v současnosti vodík uchovává převážně dvěma základními způsoby. [31]

Jako nejslibnější a komerčně nejvyspělejší se v dnešní době jeví technologie uskladnění vodíku pomocí jeho stlačení v plynném skupenství, kde pro stlačení vodíku na 350 barů je potřeba cca 15 – 20 % energie obsažené v palivu. Vodík je zde skladován ve speciálních zásobnících vyrobených z mimořádně pevných a neprodyšných materiálů, které zamezují úniku malých molekul vodíku. Díky této konstrukci se ztráty vodíku ročně pohybují pod hranicí 1 %, a to z této metody činí zdaleka nejekonomičtější způsob uchovávání vodíku v současné době. [31]

Druhou možností, jak skladovat vodík, je převádět ho do kapalného skupenství a následně ho uchovávat ve speciálních kryogenních skladovacích zásobnících, které jsou potřeba z toho důvodu, že se vodík stává kapalným až při teplotě -253 °C. Nevýhodou tohoto postupu jsou značné ztráty únikem, ke kterému nejčastěji dochází při manipulaci díky vypařování vodíku (vypařování vodíku nastává v okamžiku, kdy se jeho teplota dostane nad teplotu -253 °C). Další velkou nevýhodou je pak samotné zkapalňování vodíku, na které je potřeba 30 – 40 % celkové energie obsažené v palivu. [31]

6.5. Degradace materiálů působením vodíku

Vodíková křehkost

Jedná se o jeden z nejzásadnějších problémů degradace materiálu, který nastává při kontaktu právě zmiňovaného materiálu s vodíkem. Objevuje se při nižších a středních teplotách, přibližně mezi -50 – 100 °C. Dochází zde k difundování vodíku do povrchových vrstev materiálů, což má za následek zhoršení materiálových vlastností v podobě křehnutí a praskání. Již při koncentraci 0,0001 % vodíku v materiálu lze na zkoumaném materiálu pozorovat vznik prvotních trhlinek. [36]

Mezi materiály, které jsou velice citlivé na vodíkovou křehkost, se řadí například vysokopevnostní oceli, oceli s vysokým obsahem manganu, hořčíkové slitiny, hliníkové slitiny a slitiny titanu. [36]

Vodíková koroze

Stejně jako u předešlého případu se jedná o problém degradace materiálu, který ale na rozdíl od vodíkové křehkosti nastává při vyšších teplotách (čím vyšší teplota, tím rychlejší prostup materiálem). Vzniká při chemické reakci, v níž je pohlcen atom vodíku, který reaguje s uhlíkem v oceli za vzniku metanu. Vzniklý metan není schopen díky své velikosti difundovat do materiálu,
a tak se hromadí v místech, kde se nacházejí drobné povrchové vady. Zde způsobuje vysoké pnutí s rizikem vzniku trhlin a degradací materiálu. [36; 37]

6.6. Možnosti využití vodíku

Jak již bylo v této práci zmíněno, měl by vodík v budoucnu sehrát jednu z hlavních rolí v tzv. Sectoc Coupling procesu, při kterém by mělo dojít k úplné dekarbonizaci průmyslu, dopravy a energetiky za pomoci elektrické energie vyrobené z obnovitelných zdrojů či jaderných elektráren. [31]

Vodík a doprava

V dopravě se vodík uplatňuje jako pohonná látka. Celá myšlenka vodíkové mobility funguje na principu palivových článků, které elektrochemickou reakcí vodíku a kyslíku na vodu vyrábí elektrickou energii pro elektrický motor. Na rozdíl od normálních aut se spalovacími motory zde nevznikají žádné emise, a tak jediná odpadní látka, která u automobilů na vodík vzniká, je demineralizovaná voda a vzduch. Pokud bychom tedy do budoucna opravdu měli přejít k Sector Couplingu, pak jsou jediným konkurent automobilů na vodík bateriové elektromobily. Rozhodneme-li se tyto dva typy automobilů porovnat, zjistíme, že vodíkové automobily mají v mnoha ohledech navrch. Ať už se jedná o dojezd, čas strávený na tankovací stanici anebo lepší fungování v zimě. Velkou nevýhodou vozidel na vodík je však jejich nízká bezpečnost při případné havárii, a to především díky stlačenému vodíku, který může být v kombinaci se vzduchem výbušný. [31]

Vodík a energetika

Největší uplatnění vodíku v energetice nacházíme v jeho možnosti využití pro uložení energie. Díky své schopnosti uchovávat v sobě velké množství energie (cca 33 kWh/kg) a zároveň díky jeho snadné velkokapacitní skladnosti je vodík ideálním médiem pro sezónní akumulaci energie. Jako ideální alternativa baterií slouží vodík například ve vykrývání nedostatků elektrické energie v přenosové soustavě. Takto uskladněný vodík má navíc ještě jednu výhodu, a to tu, že může být následně pomocí technologie palivových článků opět přeměněn v kombinaci s kyslíkem na elektrickou energii. [31]

Vodík a průmysl

V průmyslu má vodík opravdu mnoho využití. Používá se například k redukci železa v ocelářství nebo k výrobě amoniaku (ten je následně využíván v zemědělství na výrobu hnojiv), polymerů, výbušnin a v neposlední řadě i v potravinářství pro ztužování tuků při výrobě margarínů. Zároveň se ve světě pomalu začínají objevovat projekty, ve kterých je vodík použit jako palivo v elektrárnách (náhrada za fosilní paliva). [31]

PRAKTICKÁ ČÁST

Praktická část bakalářské práce je zaměřena na výpočet přenosu energie z léta do zimy. Přesněji řečeno se z údajů z Energetického regulačního ústavu zjistí, jaké byly v průběhu roku přebytky vyrobené elektrické energie. Z těchto přebytků se poté pomocí dvou různých typů elektrolyzérů (PEM elektrolyzér, SOEC elektrolyzér) vyrobí vodík, který projde procesem uskladnění. Po ukončení skladovacího cyklu se tento vodík smíchá se zemním plynem. Směs vodíku a zemního plynu se následně spálí v paroplynové elektrárně a přetvoří se zpět na elektrickou energii.

I přestože se praktická část zaměřuje hlavně na přenos energie z léta do zimy, bude se kalkulovat se všemi měsíci. Energie uschovaná ve vodíku totiž nebude využívaná Českou republikou (ČR si stále drží tzv. negativní saldo – export energie převažuje nad importem). Předpokládá se, že hlavním odběratelem této „vodíkové energie“ bude sousední Německo. Predikce ukazují, že přechod Německa na zcela zelenou výrobu elektrické energie povede v roce 2040 k nedostatkům elektrické energie v zimních měsících. [38]

Těmto výpočtům a celkové problematice bude věnována pozornost především proto, že se doposud nikdo takto detailně tímto problémem nezabýval. Existují pouze spekulace a teoretické odhady, které se však jeví jako značně nedostačující.

7. Sběr dat

Hodnoty vypovídající o výrobě a spotřebě elektrické energie jsou čerpány z dokumentu ***Roční zpráva o provozu elektrizační soustavy ČR pro rok 2022***, který lze dohledat přímo na stránkách Energetického regulačního ústavu České republiky. [39]

Hodnoty v následující tabulce ukazují množství vyrobené elektrické energie v roce 2022, a to všemi dostupnými způsoby (fosilní i obnovitelné zdroje).

Tabulka 1: Výroba elektřiny v ČR [39]

	Leden	Únor	Březen	Duben	Květen	Červen	
Výroba elektřiny brutto [GWh]	8 249,3	7 241,4	7 495,1	6 442,6	5 860,1	5 965,2	
Výroba elektřiny netto [GWh]	7 728,9	6 782,2	7 027,7	6 037,4	5 475,4	5 569,7	
	Červenec	**Srpen**	**Září**	**Říjen**	**Listopad**	**Prosinec**	**Celkem**
	6 171,0	6 141,3	6 785,1	8 004,2	8 278,3	8 273,8	84 907,3
	5 741,7	5 704,1	6 317,5	7 461,6	7 725,5	7 730,4	79 302,3

V dalších krocích jsou brány v potaz už jen hodnoty ,,*netto*“, které v sobě již zahrnují odečty spojené s vlastní energetickou spotřebou elektráren.

Ke zjištění přebytku je nutno znát ještě spotřebu elektřiny v ČR a celkové ztráty tvořené v přenosových a distribučních soustavách.

Tabulka 2: Spotřeba elektřiny v ČR [39]

	Leden	Únor	Březen	Duben	Květen	Červen	
Spotřeba elektřiny ČR [GWh]	5 931,5	5 517,4	5 717,4	5 116,0	4 972,8	4 650,9	
	Červenec	**Srpen**	**Září**	**Říjen**	**Listopad**	**Prosinec**	**Celkem**
	4 513,5	4 530,7	4 636,7	5 088,1	5 441,6	5 682,9	61 799,5

Tabulka 3: Celkové ztráty [39]

	Leden	Únor	Březen	Duben	Květen	Červen	
Celkové ztráty [GWh]	356,3	324,9	335,9	291,0	263,1	260,0	
	Červenec	**Srpen**	**Září**	**Říjen**	**Listopad**	**Prosinec**	**Celkem**
	262,2	257,4	279,6	325,3	336,0	359,0	3 650,9

8. Výpočet přebytku elektrické energie

V této části bude využito dat z předchozí kapitoly k výpočtu přebytku elektrické energie.

K výpočtu přebytku elektrické energie je použit následující vzorec:

$$Přebytek\ el.energie\ = \ Výroba\ elektřiny\ netto - Spotřeba\ elektřiny\ v\ ČR - \\ - Celkové\ ztráty \quad (1)$$

Názorná ukázka výpočtu pro měsíc květen:

$$5\,475{,}4\ - 4\,972{,}8 - 263{,}1 = 239{,}5\ [\mathrm{GWh}]$$

Tabulka 4: Přebytek el. energie v ČR

	Leden	Únor	Březen	Duben	Květen	Červen
Přebytek elektrické energie [GWh]	1 441,1	939,8	974,3	630,4	239,5	658,8
	Červenec	**Srpen**	**Září**	**Říjen**	**Listopad**	**Prosinec**
	966,0	916,0	1 401,3	2 048,1	1 947,9	1 688,6
						Celkem
						13 851,9

9. Převod přebytku elektrické energie na vodík

K převodu elektrické energie na vodík bude použit elektrolyzér pracující na principu PEM, jehož účinnost se pohybuje v rozmezí 60 – 70 % [40; 41]. V práci bude tedy dále pro výpočty použita účinnost PEM elektrolyzéru jakožto 65 %.

Z dostupných zdrojů je zřejmé, že na výrobu 1 kg vodíku metodou PEM je potřeba 51 kWh elektrické energie a 9 l pitné vody. S těmito hodnotami lze následně vypočítat množství vyprodukovaného vodíku a množství vody, které bude k výrobě potřeba. [40; 42]

K výpočtu množství vyprodukovaného vodíku a spotřebované vody jsou použity následující vzorce:

$$Množství\ vyprod.vodíku = \frac{Přebytek\ el.energie}{kW\ spojené\ s\ výrobou\ elektrolyzérem\ PEM} \quad (2)$$

$$Množství\ spotřeb.vody = Přebytek\ el.energie * l\ vody\ potřebné\ k\ výrobě\ 1\ kg\ vodíku \quad (3)$$

Názorná ukázka výpočtů pro měsíc květen:

- Přebytek el. energie = 239,5 [GWh] = 239 525 816 [kWh]

$$\frac{239\ 525\ 816}{51} = 4\ 696\ 584{,}6\ [\mathrm{kg}] = 4\ 696{,}6\ [\mathrm{t}]$$

$$4\ 696\ 584{,}6 * 9 = 42\ 269\ 261{,}6\ [\mathrm{l}] = 42\ 269{,}3\ [\mathrm{m^3}]$$

Z rovnic vyplývá, že z přebytku 239,5 GWh se vyrobí 4 696,6 tun vodíku při spotřebě 42 269,3 m^3 pitné vody.

Tabulka 5: Množství vyprodukovaného vodíku ku množství spotřebované vody

	Leden	Únor	Březen	Duben	Květen	Červen
Množství vyprodukovaného vodíku [t]	28 257,5	18 428,3	19 103,7	12 361,1	4 696,6	12 917,6
Množství spotřebované vody [m3]	254 317,3	165 855,0	171 933,0	111 249,9	42 269,3	116 258,8
	Červenec	**Srpen**	**Září**	**Říjen**	**Listopad**	**Prosinec**
	18 941,0	17 960,2	27 475,9	40 159,0	38 195,0	33 109,9
	170 469,1	161 641,4	247 283,2	361 431,3	343 755,4	297 989,3
						Celkem
						271 605,9
						2 444 452,9

10. Uskladnění vodíku

Pro uskladnění vodíku budou použity tzv. zásobníky lll. typu (podzemní velkoobjemové tlakové nádoby z hliníkových vložek obalené kompozitem z vláknité pryskyřice), ve kterých bude vodík v plynném skupenství při tlaku 350 barů. Jedna tlaková nádoba bude disponovat objemem 100 m^3. Z dostupných zdrojů je patrné, že při stlačení vodíku na hodnotu 350 barů se hustota vodíku bude rovnat hodnotě 23,351 kg/m^3 [43]. S těmito informacemi lze nyní přejít k výpočtu potřebného počtu tlakových nádob.

Výpočet celkového počtu tlakových nádob pro uskladnění vodíku:

$$Počet\ tlakových\ nádob = \frac{Množství\ vyprod.\ vodíku}{Hustota\ vodíku\ při\ 350\ barech} \tag{4}$$

$$23{,}351 * 100 = 2\ 335{,}1\ \left[\frac{\mathrm{kg}}{100 * \mathrm{m}^3}\right]$$

$$271\ 605{,}9\ [\mathrm{t}] = 271\ 605\ 900\ [\mathrm{kg}]$$

$$\frac{271\ 605\ 900}{2\ 335{,}1} = 116\ 314{,}46 \doteq 116\ 315$$

Z výpočtů je zřejmé, že k uskladnění 271 605,9 tun vodíku bude zapotřebí 116 315 zásobníků o objemu 100 m^3.

Tento typ uskladnění byl zvolen díky své vysoké účinnosti (ztráty uloženého vodíku – do 1 % ročně). [44]

K dosažení požadovaného tlaku 350 barů, bude nutné vždy využít přibližně 20 % energie obsažené v palivu. Aby bylo možné tuto energii vypočítat, je zapotřebí nejprve převést tuny vodíku (Tabulka 5) na GWh. K výpočtu bude použit fakt, že energetická hodnota vodíku je rovna **33 kWh/kg**. [31]

K výpočtu energie obsažené ve vyprodukovaném vodíku je použit vzorec:

$$Energie\ obsažená\ ve\ vyprod.vodíku = Množství\ vyprod.vodíku * Energetická\ hodnota\ vodíku \quad (5)$$

Názorná ukázka výpočtu pro měsíc květen:

$$4\,696{,}6 * 1\,000 * 33 = 154\,987\,000\ [\mathrm{kWh}] \doteq 155\ [\mathrm{GWh}]$$

Z rovnice vyplývá, že energetická hodnota 4 696,6 tun vodíku vyprodukovaných za měsíc květen odpovídá 155 GWh.

Tabulka 6: Energie obsažená ve vyprodukovaném vodíku

	Leden	Únor	Březen	Duben	Květen	Červen
Energie obsažená ve vyprodukovaném vodíku [GWh]	932,5	608,1	630,4	407,9	155,0	426,3
	Červenec	**Srpen**	**Září**	**Říjen**	**Listopad**	**Prosinec**
	625,1	592,7	906,7	1 325,2	1 260,4	1 092,6
						Celkem
						8 963,0

Nyní lze spočítat, kolik energie bude potřeba ke stlačení vyprodukovaného vodíku na hodnotu 350 barů.

K výpočtu energie potřebné ke stlačení vyprodukovaného vodíku je použit vzorec:

$$Energie\ potřebná\ ke\ stlačení\ vodíku = Energie\ obsažená\ ve\ vyprod.vodíku * 20\ \% \quad (6)$$

Názorná ukázka výpočtu pro měsíc květen:

$$155 * 0{,}2 = 31\ [\mathrm{GWh}]$$

Z rovnice vyplývá, že ke stlačení 4 696,6 tun vodíku na hodnotu 350 barů bude zapotřebí 31 GWh elektrické energie.

Tabulka 7: Energie potřebná ke stlačení vyprodukovaného vodíku

	Leden	Únor	Březen	Duben	Květen	Červen
Energie potřebná ke stlačení vyprodukovaného vodíku [GWh]	186,5	121,6	126,1	81,6	31,0	85,3
	Červenec	**Srpen**	**Září**	**Říjen**	**Listopad**	**Prosinec**
	125,0	118,5	181,3	265,0	252,1	218,5
						Celkem
						1 792,6

Nyní je jasné, že ke stlačení 271 605,9 tun vodíku bude celkem potřeba 1 792,6 GWh. Jelikož je ale celá úvaha „přenosu přebytečné energie“ brána jako uzavřený cyklus, musí se tato energie odebrat z počáteční hodnoty přebytečné energie. To však povede k situaci, že na výrobu vodíku již nebude určen celkový přebytek 13 851,9 GWh, ale pouze přebytek o hodnotě **12 059,3 GWh**.

V následující tabulce budou tímto způsobem přepočteny hodnoty u jednotlivých měsíců.

Tabulka 8: Přebytek elektrické energie v ČR (přepočet)

	Leden	Únor	Březen	Duben	Květen	Červen
Přebytek elektrické energie (přepočet) [GWh]	1 254,6	818,2	848,2	548,8	208,5	573,5
	Červenec	**Srpen**	**Září**	**Říjen**	**Listopad**	**Prosinec**
	841,0	797,4	1 219,9	1 783,1	1 695,9	1 470,1
						Celkem
						12 059,3

Jak již bylo naznačeno, snížením hodnoty přebytečné elektrické energie se razantním způsobem sníží i hodnota vyprodukovaného vodíku, což ale zároveň ovlivní i množství energie, která bude potřebná k stlačení této nové hodnoty vodíku.

Aby se v práci zabránilo použití zdlouhavého iteračního cyklu, bude se i nadále brát hodnota energie potřebné ke stlačení vyprodukovaného vodíku jakožto 1 792,6 GWh. To ve výsledku znamená, že bude potřeba přepočítat množství vyprodukovaného vodíku a spotřebované vody a následně i počet nádob potřebných k uložení vodíku.

K přepočtu množství vyprodukovaného vodíku a spotřebované vody budou použity stejné vzorce jako v předchozím případě. Tedy vzorce (2) a (3).

Názorná ukázka přepočtů pro měsíc květen:

- Přebytek el. energie = 208,5 [GWh] = 208 528 357 [kWh]

$$\frac{208\,528\,357}{51} = 4\,088\,791{,}3\ [\mathrm{kg}] = 4\,088{,}8\ [\mathrm{t}]$$

$$4\,088\,791{,}3 * 9 = 36\,799\,121{,}9\ [\mathrm{l}] = 36\,799{,}1\ [\mathrm{m^3}]$$

Z rovnic vyplývá, že z přebytku 208,5 GWh se vyrobí 4 088,8 tun vodíku při spotřebě 36 799,1 m^3 pitné vody.

Tabulka 9: Množství vyprodukovaného vodíku ku množství spotřebované vody (přepočet)

	Leden	Únor	Březen	Duben	Květen	Červen
Množství vyprodukovaného vodíku (přepočet) [t]	24 600,6	16 043,5	16 631,4	10 761,4	4 088,8	11 246,0
Množství spotřebované vody (přepočet) [m3]	221 405,7	144 391,4	149 682,9	96 852,8	36 799,1	101 213,6
	Červenec	**Srpen**	**Září**	**Říjen**	**Listopad**	**Prosinec**
	16 489,8	15 635,9	23 920,2	34 962,0	33 252,2	28 825,1
	148 408,4	140 723,1	215 281,8	314 657,9	299 269,4	259 426,0
						Celkem
						236 456,9
						2 128 111,9

K přepočtu celkového počtu tlakových nádob pro uskladnění vodíku bude použit stejný vzorec jako v předchozím případě. Tedy vzorec (4).

$$23{,}351 * 100 = 2\,335{,}1 \left[\frac{\mathrm{kg}}{100 * \mathrm{m}^3}\right]$$

$$236\,456{,}9\ [\mathrm{t}] = 236\,456\,900\ [\mathrm{kg}]$$

$$\frac{236\,456\,900}{2\,335{,}1} = 101\,262{,}001 => 101\,263$$

Z výpočtů je zřejmé, že k uskladnění 236 456,9 tun vodíku bude zapotřebí 101 263 zásobníků o objemu 100 m^3.

Dalším krokem v uskladňovacím procesu je nutnost výpočtu ztrát vodíku způsobených netěsnostmi nádoby. V následující tabulce jsou tedy rozepsány procentuální ztráty v závislosti na době uskladnění (12 měsíců = 1 % ztráta vodíku [44]). Spalovací proces bude probíhat v měsíci únoru, jelikož největší nedostatky energií jsou v Německu předpokládány právě v tomto období. [45]

Tabulka 10: Ztráty vodíku způsobené uskladněním

	Leden	**Únor**	**Březen**	**Duben**	**Květen**	**Červen**
Ztráty vodíku způsobené uskladnění [%]	0,17	0,09	1,00	0,92	0,83	0,75
	Červenec	**Srpen**	**Září**	**Říjen**	**Listopad**	**Prosinec**
	0,67	0,59	0,50	0,42	0,34	0,25

Další fází bude přepočet těchto procent na skutečné tuny uniklého vodíku. Přepočet bude proveden tak, že se mezi sebou vynásobí přepočtené množství vyprodukovaného vodíku za určitý měsíc z Tabulky 9 s procentem u téhož měsíce z Tabulky 10.

Názorná ukázka výpočtu pro měsíc květen:

$$4\ 088{,}8 * 0{,}0083 = 33{,}9\ [\mathrm{t}]$$

Z výpočtu vyplývá, že při uskladnění 4 088,8 tun vodíku v časovém rozmezí květen – únor unikne netěsnostmi nádob 33,9 tun vodíku.

Tabulka 11: Ztráty vodíku způsobené uskladněním – t

	Leden	Únor	Březen	Duben	Květen	Červen
Ztráty vodíku způsobené uskladněním [t]	41,8	14,4	166,3	99,0	33,9	84,3
	Červenec	**Srpen**	**Září**	**Říjen**	**Listopad**	**Prosinec**
	110,5	92,3	119,6	146,8	113,1	72,1
						Celkem
						1 094,2

Posledním krokem v uskladňovací fázi je výpočet finálního množství uskladněného vodíku, který bude v únoru možno z tlakových nádob dostat. Výpočet bude proveden tím způsobem, že se od množství vyprodukovaného vodíku za určitý měsíc z Tabulky 9 odečtou k tomu patřící ztráty způsobené uskladněním z Tabulky 11.

Názorná ukázka výpočtu pro měsíc květen:

$$4\ 088{,}8\ -\ 33{,}9 = 4\ 054{,}9\ [\mathrm{t}]$$

Z názorného výpočtu je zřejmé, že v únoru bude možno využít 4 054,9 z původních 4 088,8 tun vodíku, které byly uskladněny na konci května.

Tabulka 12: Výsledné množství vodíku v měsíci únor

	Leden	Únor	Březen	Duben	Květen	Červen
Výsledné množství vodíku v měsíci únor [t]	24 558,8	16 029,0	16 465,1	10 662,4	4 054,9	11 161,6
	Červenec	**Srpen**	**Září**	**Říjen**	**Listopad**	**Prosinec**
	16 379,3	15 543,6	23 800,6	34 815,1	33 139,1	28 753,0
						Celkem
						235 362,7

V následujících částech se bude kalkulovat už jen s celkovým množstvím dostupného vodíku, které momentálně činí 235 362,7 tun.

11. Transport vodíku

Přeprava vodíku z podzemních zásobníků bude řešena pomocí potrubí na zemní plyn. Potrubím bude proudit plyn o složení 20 % vodík a 80 % zemní plyn. Důvodem využití tohoto způsobu přepravy je skutečnost, že i přes nutnost důkladného přezkoumání, přetěsnění a výměny některých důležitých komponent, které by mohly být náchylnější k degradaci spojené s vodíkem, za komponenty z odolnějších materiálů, se stále jedná o nejefektivnější způsob, jak na delší vzdálenosti přepravit velké množství plynného vodíku. Mísením těchto dvou plynů ve výše avizovaném procentuálním poměru bude zároveň rovnou připravována směs, která bude moci být ihned spalována v paroplynových elektrárnách [46].

I v tomto případě se musí kalkulovat se ztrátami, které při transportu vznikají. Tyto ztráty se na 1 000 km dlouhém potrubí pohybují okolo 1 % z celkové energie obsažené v přepravovaném palivu [35]. Bude-li se vycházet z předpokladu, že pro transport bude využito potrubí o délce 200 km, budou se tyto ztráty pohybovat kolem hodnoty 0,2 % z celkové energie obsažené v přepravovaném palivu.

Aby bylo možné vypočítat již zmíněné ztráty, je zapotřebí převést celkové množství dostupného vodíku na potenciální energetickou hodnotu (GWh), kterou by bylo možno získat dokonalým spálením (100 % účinnost). K tomu je potřeba znát energetickou hodnotu vodíku, která je rovna 33 kWh/kg [31].

Výpočet potenciální energie obsažené v dostupném vodíku:

$$Potenciální\ energie\ dostup.vodíku = Celkové\ množství\ dostup.vodíku * 1\ 000 * Energetická\ hodnota\ vodíku \quad (7)$$

$$235\ 362{,}7 * 1\ 000 * 33 = 7\ 766\ 969\ 992\ [\text{kWh}] \doteq 7\ 767{,}0\ [\text{GWh}]$$

Výpočet ztrát způsobených transportem z hlediska energie:

$$Ztráty\ způsobené\ transportem\ [\text{GWh}] = Potenciální\ energie\ dostup.vodíku * 0{,}2\ \% \quad (8)$$

$$7\ 766\ 969\ 992 * 0{,}002 = \ 15\ 533\ 940\ [\text{kWh}] \ \doteq 15{,}5\ [\text{GWh}]$$

Výpočet ztrát způsobených transportem z hlediska množství vodíku:

$$Ztráty\ způsobené\ transportem\ [\text{t}] = \frac{Ztráty\ způsobené\ transportem\ [\text{GWh}]}{Energetická\ hodnota\ vodíku} \quad (9)$$

$$\frac{15\ 533\ 940}{33} = \ 470\ 725{,}5\ [\text{kg}] \doteq 470{,}7\ [\text{t}]$$

Z výpočtu vyplývá, že ztráty způsobené transportem budou činit 15,5 GWh, což ve výsledku znamená 470,7 tun vodíku.

V následujícím výpočtu bude dostupné množství vodíku přepočteno a poníženo o ztráty způsobené transportem.

Přepočet dostupného množství vodíku:

$$Dostupné\ množství\ vodíku = Celkové\ množství\ dostup.vodíku - Ztráty\ způsobené\ transportem\ [\text{t}] \quad (10)$$

$$235\ 362{,}7 - 470{,}7 = 224\ 892\ [\text{t}]$$

Z výpočtu je patrné, že po přepravě bude k dispozici 224 892 tun vodíku.

12. Přeměna vodíku zpět na elektrickou energii

K přeměně vodíku zpět na elektrickou energii bude využito paroplynové elektrárny s použitím palivové směsi zemního plynu a vodíku (zemní plyn/vodík = 80/20). Účinnost takovéto paroplynové elektrárny se pohybuje kolem 55 % [47]. K výpočtu bude opět zapotřebí energetická hodnota vodíku, která je rovna 33 kWh/kg [31].

Přepočet dostupného vodíku na elektrickou energii s využitím účinnosti paroplynové elektrárny:

$$\begin{aligned} Dostupné\ množství\ vodíku = {} & Dostupné\ množství\ vodíku * 1\ 000 \\ & * Energetická\ hodnota\ vodíku \\ & * Účinnost\ paroplynové\ elektrárny \end{aligned} \quad (11)$$

$$224\ 892\ * 1\ 000 * 33 * 0{,}55 = 4\ 081\ 789\ 800\ [\text{kWh}] \doteq 4\ 081{,}8\ [\text{GWh}]$$

Z výpočtu plyne, že v případě nedostatku elektrické energie v Německu bude ČR schopna ze svých vodíkových zásob vyrobit a poskytnout pomoc v celkové výši 4 081,8 GWh.

13. Shrnutí (PEM elektrolyzér)

Z finálního výsledku je zřejmé, že se z původních 13 851,9 GWh elektrické energie podařilo pomocí dostupných technologií přenést pouhých 4 081,8 GWh. Výsledně má tedy celý výše popsaný proces účinnost pouze 29,5 %.

Největší ztráty jsou zde pozorovatelné především u přeměny elektrické energie na vodík a u následné přeměny vodíku zpět na elektrickou energii. Účinnost elektrolyzéru PEM, která činí 65 %, a účinnost paroplynové elektrárny, která je rovna 55 %, významným způsobem snižují možnost vyšší efektivity celého procesu.

V následující kapitole bude tedy vyzkoušeno nahrazení PEM elektrolyzéru elektrolyzérem vysokoteplotním.

14. Nahrazení PEM elektrolyzéru vysokoteplotním elektrolyzérem

V této kapitole praktické části bude ve výpočtech PEM elektrolyzér nahrazen elektrolyzérem vysokoteplotním (SOEC), a to za účelem zvýšení celkové účinnosti procesu. Vysokoteplotní elektrolyzéry totiž dosahují účinnosti v rozmezí 85 – 90 % [48; 49] (v práci bude dále použita účinnost vysokoteplotního elektrolyzéru 88 %). Vše ostatní, tedy způsob uskladnění, transportu a spalování, však zůstane stejné.

Důležitým aspektem u vysokoteplotního elektrolyzéru je nutnost práce při teplotě cca 850 °C [41]. Vysoká teplota zajišťuje, že celý proces nebude probíhat s využitím vody, jako tomu bylo v případě PEM elektrolyzéru, ale s využitím vodní páry. Tuto vodní páru bude pro elektrolyzér v této práci generovat jeden z výše uvedených malých modulárních reaktorů.

Účinnost vysokoteplotního elektrolyzéru je sice značně vyšší než u elektrolyzéru PEM, na druhou stranu se zde ale musí kalkulovat i s energetickou ztrátou způsobenou přihříváním páry z 280 °C (předpokládaná teplota páry dodávané ze sekundárního okruhu SMR) na teplotu 850 °C. [50]

Z dostupných zdrojů je zřejmé, že na výrobu 1 kg vodíku vysokoteplotním elektrolyzérem je potřeba 37,5 kWh elektrické energie. Hodnota potřebného množství vody, která u elektrolyzéru PEM činila 9 l, se následně nemění, jen je potřeba ji přepočítat na páru (1 l vody = 1 700 l páry). Na výrobu 1 kg vodíku pomocí elektrolyzéru SOEC bude tedy potřeba 37,5 kWh a 15 300 l páry. [48; 51]

Výpočet bude proveden pouze pro celkové roční hodnoty (nikoliv pro hodnoty jednotlivých měsíců).

Výpočet množství vyprodukovaného vodíku (vzorec č. 2) a spotřebované páry:

- Přebytek el. energie = 13 851,9 [GWh] = 13 851 900 000 [kWh]

$$\frac{13\,851\,900\,000}{37{,}5} = 369\,384\,000\ [\mathrm{kg}] = 369\,384\ [\mathrm{t}]$$

$$Množství\ spotřeb.páry = Přebytek\ el.energie \\ * l\ páry\ potřebné\ k\ výrobě\ 1\ kg\ vodíku \quad (12)$$

$$369\ 384\ 000\ * 15\ 300 = 5\ 651\ 575\ 200\ 000\ [\mathrm{l}] = 5\ 651\ 575\ 200\ [\mathrm{m}^3]$$

Z množství spotřebované páry, které činí 5 651 575 200 m^3, se vypočte energie potřebná k jejímu příhřevu z 280 °C na 850 °C (příhřev = 570 °C). K výpočtu bude použit fakt, že k ohřevu 1 kg páry o 1 °C je potřeba 1,9 kJ (0,0005278 kWh), a také skutečnost, že hustota páry je podle modelu ideálního plynu přibližně 0,588 kg/m^3. [52; 53]

Výpočet energie potřebné k příhřevu páry:

$$Celková\ hmotnost\ spotř.páry = Množství\ spotřeb.páry * Hustota\ páry \quad (13)$$

$$5\ 651\ 575\ 200 * 0{,}588 = 3\ 323\ 126\ 217{,}6\ [\mathrm{kg}]$$

$$Energie\ k\ příhřevu\ 1\ kg\ páry\ o\ 570\ °C = 570 * 0{,}0005278 \quad (14)$$

$$570 * 0{,}0005278 = 0{,}300846\ [\mathrm{kWh}] \doteq 0{,}3\ [\mathrm{kWh}]$$

$$Energie\ k\ příhřevu\ spotř.páry = Energie\ k\ příhřevu\ 1\ kg\ páry\ o\ 570\ °C \\ * Celková\ hmotnost\ spotř.páry \quad (15)$$

$$0{,}3 * 3\ 323\ 126\ 217{,}6 = 996\ 937\ 865{,}28\ [\mathrm{kWh}] \doteq 996{,}9\ [\mathrm{GWh}]$$

Z výpočtu vychází, že k příhřevu celkového objemu spotřebované páry z 280 °C na 850 °C bude zapotřebí 996,9 GWh elektrické energie. Tuto hodnotu je nyní nutno odečíst od počáteční hodnoty přebytku elektrické energie. To však opět povede k situaci, že na výrobu vodíku již nebude určen celkový přebytek 13 851,9 GWh, ale pouze přebytek o hodnotě **12 855 GWh**.

Snížením hodnoty přebytečné elektrické energie se sníží i hodnota vyprodukovaného vodíku, což ale zároveň opět ovlivní i množství energie, která bude potřebná k příhřevu páry spotřebované při výrobě vodíku.

Pro odvrácení použití iteračního cyklu bude pro výpočet i nadále použita hodnota energie potřebné k příhřevu páry, která odpovídá 996,9 GWh. Bude tedy nutné přepočítat pouze množství vyprodukovaného vodíku a spotřebované páry.

K přepočtu množství vyprodukovaného vodíku a spotřebované páry budou použity stejné vzorce jako v předchozím případě. Tedy vzorce (2) a (12).

Přepočet množství vyprodukovaného vodíku a spotřebované páry:

- Přebytek el. energie = 12 855 [GWh] = 12 855 000 000 [kWh]

$$\frac{12\,855\,000\,000}{37{,}5} = 342\,800\,000\ [\mathrm{kg}] = 342\,800\ [\mathrm{t}]$$

$$342\,800\,000 * 15\,300 = 5\,244\,840\,000\,000\ [\mathrm{l}] = 5\,244\,840\,000\ [\mathrm{m^3}]$$

Z výsledků vyplývá, že z přebytku 12 855 GWh je možno vyrobit 342 800 tun vodíku při spotřebě 5 244 840 000 m^3 vodní páry.

Dalším krokem je výpočet energie potřebné ke stlačení vodíku do zásobníků (20 % z energie obsažené v palivu). Aby bylo možno tento výpočet provést, je zapotřebí zjistit hodnotu energie obsažené v právě vyprodukovaném vodíku [GWh]. K výpočtu bude použit fakt, že energetická hodnota vodíku je rovna 33 kWh/kg. [31]

Výpočet energie obsažené ve vyprodukovaném vodíku (vzorec č. 5):

$$342\,800 * 1\,000 * 33 = 11\,312\,400\,000\ [\mathrm{kWh}] \doteq 11\,312{,}4\ [\mathrm{GWh}]$$

Výpočet energie potřebné ke stlačení vodíku do zásobníků (vzorec č. 6):

$$11\,312{,}4 * 0{,}2 = 2\,262{,}5\ [\mathrm{GWh}]$$

Nyní je patrné, že na stlačení 342 800 tun vodíku bude celkem potřeba 2 262,5 GWh. Stejně jako v případě použití PEM elektrolyzéru, tak i zde se musí tato hodnota odečíst od přebytku elektrické energie použitého na výrobu vodíku. Hodnota přebytku elektrické energie tedy nebude již 12 855 GWh, ale pouze **10 592,5 GWh**.

Snížením této hodnoty bude opět ovlivněna i hodnota vyprodukovaného vodíku, což ale znovu povede ke změně množství energie, která bude potřebná k stlačení této nové hodnoty. Pro odvrácení použití iteračního cyklu bude i nadále použita hodnota energie potřebné ke stlačení vyprodukovaného vodíku jakožto 2 262,5 GWh. Přepočet tedy proběhne u množství vyprodukovaného vodíku a spotřebované páry.

K přepočtu množství vyprodukovaného vodíku a spotřebované páry budou vzorce (2) a (12).

Přepočet množství vyprodukovaného vodíku a spotřebované páry:

- Přebytek el. energie = 10 592,5 [GWh] = 10 592 500 000 [kWh]

$$\frac{10\,592\,500\,000}{37{,}5} = 282\,466\,666{,}7\ [\mathrm{kg}] = 282\,466{,}7\ [\mathrm{t}]$$

$$282\,466\,666{,}7 * 15\,300 = 4\,321\,740\,000\,510\ [\mathrm{l}] = 4\,321\,740\,000{,}5\ [\mathrm{m}^3]$$

Z rovnic vyplývá, že z přebytku 10 592,5 GWh se s použitím SOEC elektrolyzéru vyrobí 301 664 tun vodíku při spotřebě 4 321 740 000,5 m^3 vodní páry.

Dalším výpočtem bude množství ztráty vodíku způsobené uskladněním. Vycházet se zde bude ze skutečnosti, že v případě uskladnění vodíku vyrobeného metodou PEM šlo o 0,46 % z celkového množství vyrobeného vodíku.

Výpočet ztráty vodíku způsobený uskladněním:

$$282\ 466{,}7 * 0{,}0046 = 1\ 299{,}3\ [\mathrm{t}]$$

Z výpočtu vyplývá, že při uskladnění 301 664 tun vodíku unikne netěsnostmi nádob v průběhu roku 1 299,3 tun vodíku.

Stejně jako v případě výpočtu s PEM elektrolyzérem, tak i v tomto případě bude dalším krokem výpočet výsledného množství vodíku, který bude na konci uskladňovacího cyklu možno z tlakových nádob získat. Výpočet bude proveden tak, že se od množství vyprodukovaného vodíku za celý rok odečtou ztráty způsobené uskladněním.

Výpočet výsledného množství vodíku, který lze na konci uskladňovacího cyklu dostat z nádob:

$$282\ 466{,}7 - 1\ 299{,}3 = \ 281\ 167{,}4\ [\mathrm{t}]$$

Následující kroky jsou identické jako u metody s použitím PEM elektrolyzéru. Rovnice tedy nebudou výrazným způsobem vysvětlovány a komentovány.

Výpočet potenciální energie obsažené v dostupném vodíku (vzorec č. 7):

$$281\ 167{,}4 * 1\ 000 * 33 = 9\ 278\ 524\ 200\ [\mathrm{kWh}] \doteq 9\ 278{,}5\ [\mathrm{GWh}]$$

Výpočet ztráty způsobené transportem z hlediska energie (vzorec č. 8):

$$9\ 278\ 524\ 200 * 0{,}002 = \ 18\ 557\ 048{,}4\ \ [\mathrm{kWh}] \doteq \ 18{,}6\ [\mathrm{GWh}]$$

Výpočet ztráty způsobené transportem z hlediska množství vodíku (vzorec č. 9):

$$\frac{18\ 557\ 048{,}4}{33} = \ 562\ 334{,}8\ [\mathrm{kg}] \doteq 562{,}3\ [\mathrm{t}]$$

Z výpočtu vyplývá, že ztráty způsobené transportem budou činit 18,6 GWh, což ve výsledku znamená 562,3 tun vodíku.

Dalším krokem bude přepočet dostupného množství vodíku s kalkulací ztrát způsobených transportem.

Přepočet dostupného množství vodíku (vzorec č. 10):

$$281\ 167{,}4\ - 562{,}3 = 280\ 605{,}1\ [\mathrm{t}]$$

Z výpočtu je patrné, že po přepravě bude k dispozici 280 605,1 tun vodíku.

Přepočet dostupného vodíku na elektrickou energii s využitím účinnosti paroplynové elektrárny (vzorec č. 11):

$$280\ 605{,}1 * 1\ 000 * 33 * 0{,}55 = 5\ 092\ 982\ 565\ [\mathrm{kWh}] \doteq 5\ 093{,}0\ [\mathrm{GWh}]$$

Z výpočtu plyne, že pokud by byl k výrobě vodíku použit vysokoteplotní elektrolyzér (SOEC), vyšplhá se výsledná hodnota vyrobené elektrické energie na hranici 5 093 GWh.

15. Shrnutí (SOEC elektrolyzér)

Z finálního výsledku je zřejmé, že pokud bude místo PEM elektrolyzéru použit elektrolyzér vysokoteplotní (SOEC elektrolyzér), tak se z původních 13 851,9 GWh elektrické energie podaří pomocí dostupných technologií přenést 5 093 GWh. Celý popsaný proces bude mít v tomto případě účinnost okolo 36,8 %, což je o 7,3 % vyšší účinnost než u metody s PEM elektrolyzérem.

Největší ztráty se zde případně opět objevují u přeměny vodíku zpět na elektrickou energii, což je způsobeno nízkou účinností paroplynové elektrárny. Výrazné ztráty jsou pak vidět i při stlačování samotného vodíku do uskladňovacích nádob.

Závěr a zhodnocení

Cílem této bakalářské práce bylo seznámení s technologií malých modulárních reaktorů a jejími kogeneračními možnostmi a následný návrh a výpočet přenosu přebytečné elektrické energie z léta do zimy.

V teoretické části byla zprvu věnována pozornost především samotným malým modulárním reaktorům, a to od úplného seznámení s technologií SMR až po následnou rešerši a popis některých vybraných projektů SMR. Následující část pak byla věnována kogeneraci a různým kogeneračním možnostem – od výroby tepelné energie, přes desalinizaci, až k produkci vodíku. Každá z těchto kogeneračních možností byla vždy představena, vysvětlena a následně popsána na několika stránkách.

Jak bylo avizováno, úkolem praktické části bakalářské práce bylo navrhnout a výpočítat přenos přebytku elektrické energie vyrobené v letě do zimních měsíců. I přes mírné komplikace s nalezením některých stěžejních dat se nakonec podařilo toto zadání splnit a úspěšně dokončit praktickou část. Překvapivě ne příliš optimistické jsou výsledky, které z praktické části plynou. Ukazuje se totiž, že z relativně velkého přebytku elektrické energie, který lze za letní měsíce nastřádat, se do zimních měsíců povede přenést jen zlomek. Přesněji řečeno se jedná zhruba o 1/3 těchto přebytků. Vysvětlení, proč tomu tak ale je, je vcelku prosté. Důvodem je, samozřejmě kromě různých ztrát způsobených netěsnostmi, účinnost přeměny vodíku zpět na elektrickou energii. Paroplynové elektrárny s účinností 55 % totiž značným způsobem snižují potenciál vodíku jakožto úschovny elektrické energie. Rovněž se ukázalo, že k převodu přebytku elektrické energie na vodík je výhodnější použít vysokoteplotní elektrolyzér (SOEC). I přes nutnost příhřevu páry je totiž výsledná účinnost celého cyklu při použití SOEC elektrolyzéru o 7,3 % vyšší, než v případě cyklu s použitím elektrolyzéru PEM. Detailní srovnání obou metod lze vidět v Tabulce 13 na následující stránce.

Závěrem je však nutno říct, že pokud se do budoucna nepodaří nalézt způsob, který by zaručoval vyšší účinnost přeměny vodíku zpět na energii, je podle dosažených výsledků tento způsob přenosu energie značně neefektivní. Spíše než v energetice by tedy vodík mohl nalézt větší uplatnění v již zmiňované dopravě, kde má ve srovnání s bateriemi v mnoha aspektech navrch.

Tabulka 13: Srovnání obou metod

	PEM elektrolyzér	SOEC elektrolyzér
Výroba elektřiny netto [GWh]	79 302,3	
Spotřeba elektřiny ČR [GWh]	61 799,5	
Celkové ztráty [GWh]	3 650,9	
Přebytek elektrické energie [GWh]	**13 851,9**	
Energie potřebná k příhřevu páry [GWh]	-	996,9
Energie potřebná ke stlačení vyprodukovaného vodíku [GWh]	1 792,6	2 262,5
Přebytek elektrické energie (přepočet) [GWh]	**12 059,3**	**10 592,5**
Množství vyprodukovaného vodíku [t]	**236 456,9**	**282 466,7**
Množství spotřebované vody/páry [m3]	**2 128 111,9**	**4 321 740 000,5**
Ztráty vodíku způsobené uskladněním [t]	1 094,2	1 299,3
Výsledné množství vodíku v měsíci únor [t]	**235 362,7**	**281 167,4**
Ztráty vodíku způsobené transportem [t]	470,0	562,3
Přepočet dostupného množství vodíku [t]	**224 892,0**	**280 605,1**
Přepočet dostupného vodí ku na elektrickou energii s využitím účinnosti paroplynové elektrárny [GWh]	**4 081,8**	**5 093,0**
Celková účinnost cyklu [%]	**29,5**	**36,8**

Seznam použité literatury

[1] Jaderné reaktory IV. generace a malé modulární reaktory. *ÚJV Řež, a. s.* [online]. 2024 [cit. 2024-04-05]. Dostupné z: https://www.ujv.cz/cs/produkty-a-sluzby/veda-a-vyzkum/jaderne-reaktory-iv-generace-plazma

[2] Další zpoždění pro JE Flamanville, jaderný regulátor dokončuje posouzení bezpečnosti. *O ENERGETICE.CZ* [online]. 2024 [cit. 2024-05-07]. Dostupné z: https://oenergetice.cz/jaderne-elektrarny/dalsi-zpozdeni-pro-je-flamanville-jaderny-regulator-dokoncuje-posouzeni-bezpecnosti

[3] What are Small Modular Reactors (SMRs)? In: *International Atomic Energy Agency* [online]. 2023 [cit. 2024-04-05]. Dostupné z: https://www.iaea.org/newscenter/news/what-are-small-modular-reactors-smrs

[4] Infografika: Malé modulární reaktory (SMR) v pokročilé fázi vývoje. *O ENERGETICE.CZ* [online]. 2020 [cit. 2024-04-05]. Dostupné z: https://oenergetice.cz/jaderne-elektrarny/infografika-male-modularni-reaktory-smr-pokrocile-fazi-vyvoje

[5] *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments: A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS)*. 2022. Dostupné také z: https://aris.iaea.org/Publications/SMR_booklet_2022.pdf

[6] Diagram_of_NuScale_reactor. In: *O ENERGETICE.CZ* [online]. 2016 [cit. 2024-04-05]. Dostupné z: https://oenergetice.cz/wp-content/uploads/2016/08/Diagram_of_a_NuScale_reactor.jpg

[7] *VBER-300*. 2020. Dostupné také z: https://aris.iaea.org/PDF/VBER-300.pdf

[8] 1_VBER-300. In: *O ENERGETICE.CZ* [online]. 2020 [cit. 2024-04-05]. Dostupné z: https://oenergetice.cz/wp-content/uploads/2020/02/1_VBER-300.png

[9] SMR-160 Project Advances In Czech Republic. *European Nuclear Society* [online]. 2021 [cit. 2024-04-05]. Dostupné z: https://www.euronuclear.org/news/smr-160-project-advances-in-czech-republic/

[10] A Key Topical Report on SMR-160 Submitted to the USNRC. In: *Holtec International* [online]. 2020 [cit. 2024-04-05]. Dostupné z: https://i0.wp.com/holtecinternational.com/wp-content/uploads/2020/12/Photo-1edit2.jpg?resize=1200%2C1413&ssl=1

[11] Malé modulární reaktory jako vhodné řešení pro budoucnost energetiky. Co český průmysl čeká? *Technický týdeník* [online]. 2020 [cit. 2024-04-05]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/denni-zpravodajstvi/male-modularni-reaktory-jako-vhodne-reseni-pro-budoucnost-energetiky-co-cesky-prumysl-ceka_49711.html

[12] SMART. In: *O ENERGETICE.CZ* [online]. 2020 [cit. 2024-04-05]. Dostupné z: https://oenergetice.cz/wp-content/uploads/2020/02/SMART.jpg

[13] AP300™ SMR. *Westinghouse* [online]. 2023 [cit. 2024-04-05]. Dostupné z: https://www.westinghousenuclear.com/czech-republic/ap300-smr

[14] Nuclear AMRC to support Rolls-Royce SMR development. In: *Nuclear AMRC* [online]. 2017 [cit. 2024-04-05]. Dostupné z: https://energyamrc.co.uk/centre/rolls-royce-smr-support/

[15] First U.S. Small Modular Boiling Water Reactor Under Development. *Office of Nuclear Energy* [online]. 2020 [cit. 2024-04-05]. Dostupné z: https://www.energy.gov/ne/articles/first-us-small-modular-boiling-water-reactor-under-development

[16] Malý reaktor PRISM má předpoklady ke komercializaci. *Proelektrotechniky.cz* [online]. 2016 [cit. 2024-04-05]. Dostupné z: https://www.proelektrotechniky.cz/vyroba-a-prenos/110.php

[17] PRISM_Cutaway-2011. In: *O ENERGETICE.CZ* [online]. 2011 [cit. 2024-04-05]. Dostupné z: https://oenergetice.cz/wp-content/uploads/2020/02/PRISM_Cutaway-2011.jpg

[18] JAEA's Larger Commercial Cogeneration System Design: GTHTR300C. In: *ResearchGate* [online]. 2013 [cit. 2024-04-05]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/JAEAs-Larger-Commercial-Cogeneration-System-Design-GTHTR300C_fig8_264171890

[19] Terrestrial Energy a ORNL: Projekt solí chlazeného reaktoru IMSR v přípravě. *Proelektrotechniky.cz* [online]. 2015 [cit. 2024-04-05]. Dostupné z: https://www.proelektrotechniky.cz/vyroba-a-prenos/69.php

[20] BREST-300. In: *O ENERGETICE.CZ* [online]. 2016 [cit. 2024-04-05]. Dostupné z: https://oenergetice.cz/wp-content/uploads/2016/08/BREST-300.png

[21] Jak funguje kogenerační jednotka. *ČEZ Energo* [online]. 2024 [cit. 2024-05-08]. Dostupné z: https://www.cezenergo.cz/cs/o-kogeneraci/jak-funguje-kogeneracni-jednotka

[22] ERÚ: Za čtyři roky klesla výroba tepla z hnědého uhlí v ČR o více než desetinu. *O ENERGETICE.CZ* [online]. 2021 [cit. 2024-04-07]. Dostupné z: https://oenergetice.cz/teplarenstvi/eru-za-ctyri-roky-klesla-vyroba-tepla-z-hnedeho-uhli-v-cr-o-vice-nez-desetinu

[23] Elektrárna Dětmarovice. *Skupina ČEZ* [online]. 2024 [cit. 2024-04-05]. Dostupné z: https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobni-zdroje/uhelne-elektrarny-a-teplarny/uhelne-elektrarny-a-teplarny-cez-v-cr/elektrarna-detmarovice-58185#detmarovice

[24] *Energie z biomasy*. ČVUT; kurz B231-2151705 - Obnovitelné zdroje energie, 2023. Prezentace. ČVUT.

[25] Elektrárny Poříčí. *Skupina ČEZ* [online]. 2024 [cit. 2024-04-05]. Dostupné z: https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobni-zdroje/uhelne-elektrarny-a-teplarny/uhelne-elektrarny-a-teplarny-cez-v-cr/elektrarny-porici-58181

[26] Bezemisní teplo už proudí z Temelína do Českých Budějovic. *Skupina ČEZ* [online]. 2024 [cit. 2024-04-05]. Dostupné z: https://www.cez.cz/cs/pro-media/tiskove-zpravy/bezemisni-teplo-uz-proudi-z-temelina-do-ceskych-budejovic-183168

[27] Temelín vytápí Týn nad Vltavou už 19 let. *Technický týdeník* [online]. 2017 [cit. 2024-05-09]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/temelin-vytapi-tyn-nad-vltavou-uz-19-let_41195.html

[28] Příprava stavby horkovodu z Dukovan do Brna má skončit v roce 2027. *O ENERGETICE.CZ* [online]. 2024 [cit. 2024-05-09]. Dostupné z: https://oenergetice.cz/teplarenstvi/priprava-stavby-horkovodu-z-dukovan-do-brna-ma-skoncit-v-roce-2027

[29] Odsolování mořské vody pomocí jaderných elektráren. *O ENERGETICE.CZ* [online]. 2017 [cit. 2024-04-05]. Dostupné z: https://oenergetice.cz/elektrina/odsolovani-morske-vody-pomoci-jadernych-elektraren

[30] SMR desalination. *Small Modular Reactors* [online]. 2024 [cit. 2024-04-05]. Dostupné z: https://small-modular-reactors.org/smr-desalination/

[31] Základní informace k vodíku. *Česká vodíková technologická platforma* [online]. 2024 [cit. 2024-04-05]. Dostupné z: https://www.hytep.cz/o-vodiku/ve-zkratce

[32] *CENTRÁLNÍ VÝROBA VODÍKU*. 2017. Dostupné také z: http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2017_02_121-128.pdf

[33] *Konstrukční návrh a deformační analýza vodíkového elektrolyzéru*. 2022. Dostupné také z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/103746/F2-DP-2022-Marek-Lukas-DP%20Lukas%20Marek.pdf?sequence=-1&isAllowed=y

[34] Skladování, přeprava a distribuce vodíku. *TÜV SÜD CZECH* [online]. 2024 [cit. 2024-04-05]. Dostupné z: https://www.tuvsud.com/cs-cz/odvetvi/energetika/konvencni-energie/vodikova-energie/skladovani-preprava-a-distribuce-vodiku?__cf_chl_tk=2x5tYMiMBLtgpvw3OIg5Ci7CMB5HqpACfjJ4HUS5b9M-1711062030-0.0.1.1-1877

[35] *Hydrogen pipelines vs. HVDC lines: Should we transfer green molecules or electrons?* 2023. Dostupné také z: https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2023/11/ET27-Hydrogen-pipelines-vs.-HVDC-lines_HG_AP_2.pdf

[36] *Problematika vodíkové křehkosti v materiálu*. 2019. Dostupné také z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/84803/F2-BP-2019-Machalinek-Martin-Problematika%20vodikove%20krehkosti%20v%20materialu.pdf?sequence=-1&isAllowed=y

[37] Vodíková koroze. *CoJeCo* [online]. 2000, 2016 [cit. 2024-04-05]. Dostupné z: https://www.cojeco.cz/vodikova-koroze

[38] *Netzentwicklungsplan Strom 2037 mit Ausblick 2045, Version 2023*. 2023. Dostupné také z: https://www.netzentwicklungsplan.de/sites/default/files/2023-03/NEP_2037_2045_V2023_1_Entwurf_Teil1_7.pdf

[39] Roční zpráva o provozu elektrizační soustavy ČR pro rok 2022. *Energetický regulační úřad* [online]. 2023 [cit. 2024-04-10]. Dostupné z: https://eru.gov.cz/rocni-zprava-o-provozu-elektrizacni-soustavy-cr-pro-rok-2022

[40] Technical Targets for Proton Exchange Membrane Electrolysis. *Office of Energy Efficiency & Renewable Energy* [online]. 2022 [cit. 2024-04-23]. Dostupné z: https://www.energy.gov/eere/fuelcells/technical-targets-proton-exchange-membrane-electrolysis

[41] Největší vysokoteplotní elektrolyzér na světě dosáhl rekordní účinnosti 84 %. *Česká vodíková technologická platforma* [online]. 2022 [cit. 2024-04-25]. Dostupné z: https://www.hytep.cz/o-vodiku/aktuality/novinky/nejvetsi-vysokoteplotni-elektrolyzer-na-svete-dosahl-rekordni-ucinnosti

[42] Water treatment for green hydrogen: what you need to know. *Hydrogen Tech World* [online]. 2022 [cit. 2024-04-23]. Dostupné z: https://hydrogentechworld.com/water-treatment-for-green-hydrogen-what-you-need-to-know

[43] Vodík: Nejlehčí prvek je největší výzva. *O ENERGETICE.CZ* [online]. 2021 [cit. 2024-04-24]. Dostupné z: https://oenergetice.cz/vodik/vodik-nejlehci-prvek-nejvetsi-vyzva

[44] Přednáška 3 Skladování vodíku ÚROVEŇ IV. *HyResponder* [online]. 2021 [cit. 2024-04-24]. Dostupné z: https://hyresponder.eu/wp-content/uploads/2023/03/L3_HyResponder_Level4_CZ.pdf

[45] Increases in European electricity markets prices in the third quarter of 2021 in the midst of the energy crisis. *AleaSoft* [online]. 2021 [cit. 2024-05-04]. Dostupné z: https://aleasoft.com/increases-european-electricity-markets-prices-third-quarter-2021-energy-crisis/

[46] Vídeňská plynová elektrárna už vyrábí energii i z vodíku. *Obnovitelně.cz* [online]. 2023 [cit. 2024-04-24]. Dostupné z: https://www.obnovitelne.cz/clanek/2693/videnska-plynova-elektrarna-uz-vyrabi-energii-i-z-vodiku

[47] Paroplynová elektrárna. *SVĚT ENERGIE* [online]. 2024 [cit. 2024-04-24]. Dostupné z: https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/plynove-a-paroplynove-elektrarny/paroplynova-elektrarna

[48] The World's Largest and Most Efficient Solid Oxide Electrolyzer. *Bloom Energy* [online]. 2024 [cit. 2024-04-25]. Dostupné z: https://www.bloomenergy.com/bloomelectrolyzer/

[49] Solid Oxide Electrolysis. *FuelCell Energy* [online]. 2024 [cit. 2024-05-05]. Dostupné z: https://www.fuelcellenergy.com/platform/solid-oxide-electrolysis

[50] Parametry parních turbín v jaderných elektrárnách. *SVĚT ENERGIE* [online]. 2024 [cit. 2024-05-05]. Dostupné z: https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/jaderne-elektrarny/jaderna-elektrarna-podrobne/parni-turbina/parametry

[51] 9) Objem 1 kg páry. *FyzWeb* [online]. 2011 [cit. 2024-05-05]. Dostupné z: http://fyzweb.cz/odpovedna/index.php?limit_od=8&hledat=tlak&obor=

[52] Energy needed to produce steam: enthalpy and entropy data? *Thunder Said Energy* [online]. 2019 [cit. 2024-05-05]. Dostupné z: https://thundersaidenergy.com/downloads/energy-needed-to-produce-steam-enthalpy-and-entropy-data/

[53] Hustota vodní páry podle modelu ideálního plynu. *Reseneulohy.cz* [online]. 2016 [cit. 2024-05-05]. Dostupné z: http://reseneulohy.cz/466/hustota-vodni-pary-podle-modelu-idealniho-plynu

Seznam obrázků

Obrázek 1: Schéma porovnání SMR vůči tradiční jaderné elektrárně [3] 11
Obrázek 2: Schéma SMR od společnosti NuScale [6] 13
Obrázek 3: Schéma SMR typu VBER – 300 [8] 14
Obrázek 4: Schéma reaktoru SMR – 160 [10] 15
Obrázek 5: Schéma reaktoru SMART [12] 16
Obrázek 6: Schéma reaktoru AP300™ SMR [5] 17
Obrázek 7: Schéma tlakové nádoby reaktoru NUWARD™ [5]..... 18
Obrázek 8: Schéma containmentu NUWARD™ [5].....18
Obrázek 9: Schéma reaktoru Rolls – Royce SMR s připojenými parogenerátory [14].....19
Obrázek 10: Schéma reaktoru BWRX – 300 [5] 20
Obrázek 11: Schéma reaktoru typu PRISM [17].....21
Obrázek 12: Schéma reaktoru typu GTHTR300 [18] 22
Obrázek 13: Schéma reaktoru typu IMSR [5].....23
Obrázek 14: Schéma reaktoru typu BREST-OD-300 [20] 24
Obrázek 15: Schéma postupu úpravy mořské vody [29].....30
Obrázek 16: Schéma propojení vysokoteplotní elektrolýzy vody s Jaderným reaktorem IV. generace [32] 33
Obrázek 17: Schéma metody AWE [33]..... 34
Obrázek 18: Schéma metody SOE [33] 34
Obrázek 19: Schéma metody PEM [33] 35

Seznam tabulek

Tabulka 1: Výroba elektřiny v ČR [39] 41
Tabulka 2: Spotřeba elektřiny v ČR [39] 41
Tabulka 3: Celkové ztráty [39]....41
Tabulka 4: Přebytek el. energie v ČR 42
Tabulka 5: Množství vyprodukovaného vodíku ku množství spotřebované vody....43
Tabulka 6: Energie obsažená ve vyprodukovaném vodíku....45
Tabulka 7: Energie potřebná ke stlačení vyprodukovaného vodíku 46
Tabulka 8: Přebytek elektrické energie v ČR (přepočet) 46
Tabulka 9: Množství vyprodukovaného vodíku ku množství spotřebované vody (přepočet) .47
Tabulka 10: Ztráty vodíku způsobené uskladněním....48
Tabulka 11: Ztráty vodíku způsobené uskladněním – t....49
Tabulka 12: Výsledné množství vodíku v měsíci únor 50
Tabulka 13: Srovnání obou metod 60