

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta strojního inženýrství

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2021

Denis Šebek



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

VODÍKOVÉ TECHNOLOGIE PRO AKUMULACI ELEKTRICKÉ ENERGIE Z OBNOVITELNÝCH ZDROJŮ

STORAGE SYSTEMS FOR RENEWABLE ENERGY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Denis Šebek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ján Poláčik, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Energetický ústav
Student:	Denis Šebek
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Energetika, procesy a životní prostředí
Vedoucí práce:	Ing. Ján Poláčik, Ph.D.
Akademický rok:	2020/21

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

Vodíkové technologie pro akumulaci elektrické energie z obnovitelných zdrojů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Podíl elektrické energie vyrobené z obnovitelných zdrojů se na trhu stále zvyšuje. S tím však přichází otázka efektivního využívání této energie, aby se zachovala rovnováha mezi její výrobou a spotřebou.

Tato práce pojednává o akumulaci elektrické energie dostupnými technologiemi, přičemž se zaměřuje na vodíkové technologie. Tyto technologie, stejně jako nové trendy v oblasti akumulace, budou popsány v rešeršní části práce.

V praktické části bude navrhnout systém uskladňování energetických přebytků do vodíku.

Cíle bakalářské práce:

1. Popsat problematiku akumulace elektrické energie z obnovitelných zdrojů
2. Rozebrat výhody a nevýhody jednotlivých způsobů akumulace se zaměřením na vodíkové technologie
3. Popsat samotné vodíkové technologie, bezpečnost, způsoby skladování atd.
4. Navrhnout vhodný systém využívání energetických přebytků a jejich ukládání do vodíku.

Seznam doporučené literatury:

SØRENSEN, Bent. Hydrogen and fuel cells: emerging technologies and applications. 2nd ed. Burlington, MA: Academic Press, c2012. ISBN 0123877091.

KAMEŠ, Josef. Alternativní palivo - vodík. Praha: [s.n.], 2008. ISBN 978-80-254-1686-0.

ABSTRAKT

Akumulácia energie pomocou vodíkových technológií je téma aktuálna a veľmi dôležitá z pohľadu budúceho rozvoja energetiky. Táto práca sa zaoberá rozličnými spôsobmi akumulácie energie vrátane akumulácie energie pomocou vodíkových technológií. Ďalej sú v práci opísané metódy skladovania vodíka ich výhody nevýhody a celkový princíp. V poslednej časti je navrhnutá vodíková akumulačná stanica, ktorá ako zdroj elektrickej energie využíva obnoviteľné zdroje energie.

KĽÚČOVÉ SLOVÁ

Vodík, Akumulácia, Skladovanie, Obnoviteľné zdroje energie

ABSTRACT

The accumulation of energy by hydrogen technologies is an important topic for the advancement of energetics in the future. This thesis is based around different methods of accumulation of energy including accumulation of energy by hydrogen technologies. Furthermore, the thesis describes methods of hydrogen storage, its advantages and disadvantages, and the overall principle. In the last part of the thesis, a hydrogen accumulation plant is designed, which uses electricity from renewable sources as its energy source.

KEYWORDS

Hydrogen, Accumulation, Storage, Renewable sources of energy

ŠEBEK, Denis. *Vodíkové technologie pro akumulaci elektrické energie z obnovitelných zdrojů*. Brno, 2021, 66 s. Bakalárska práca. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojího inženýrství, Ústav Energetiky. Vedúci práce: Ing. Ján Poláčik

VYHLÁSENIE

Vyhlasujem, že svoju bakalársku prácu na tému „Vodíkové technológie pro akumulaci elektrické energie z obnovitelných zdrojů“ som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho bakalárskej práce, s využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej bakalárskej práce ďalej vyhlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto bakalárskej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona Českej republiky č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníka Českej republiky č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

POĎAKOVANIE

Rád by som poďakoval môjmu vedúcemu bakalárskej práce Ing. Jánovi Poláčikovi za konzultácie, motiváciu a ochotu kedykoľvek pomôcť. Ďalej by som chcel poďakovať každému profesorovi na ústave energetiky za poskytnutie potrebných informácií pre dokončenie tejto práce.

Obsah

Úvod	13
1 Akumulácia energie	15
1.1 Metódy akumulácie energie	16
1.1.1 Olovené akumulátory	16
1.1.2 Alkalické akumulátory	17
1.1.3 Zotrvačnickové akumulátory	17
1.1.4 Tlakovzdušné akumulačné elektrárne	18
1.1.5 Prečerpávacie vodné elektrárne	19
1.1.6 Supravodivé indukčné akumulátory	20
1.1.7 Elektrolýza vody	21
1.2 Druhy elektrolyzéro	22
1.2.1 Alkalické elektrolyzéry	22
1.2.2 PEM elektrolyzéry	23
1.3 Spôsob	24
1.3.1 Štiepenie vody	24
1.3.2 Fotónová absorpcia	25
1.3.3 Termochemické štiepenie vody	25
1.3.4 Splyňovanie biomasy	26
1.4 Skladovanie vodíka	26
1.4.1 Vysokotlakové plynové nádoby	27
1.4.2 Skvapaľňovanie vodíka	28
1.4.3 Fyzikálna absorpcia vodíka	30
2 Návrh akumulačnej stanice	33
2.1 Zdroj energetických prebytkov	33
2.2 Kompresor	34
2.3 Skladovacia časť	36
2.4 Elektrolyzér	37
2.4.1 ITM Power Plc	37
2.4.2 McPhy Energy SA	37
2.4.3 Siemens AG	39
2.4.4 Nel ASA	40
2.4.5 Skladovanie Vody	41
2.5 Modelový výpočet	42
2.5.1 Energetický prebytok	44
2.5.2 Elektrolýza	44

2.6	Zásobovanie vody	46
2.7	Skladovanie	47
2.8	Spätná premena	47
	Diskusia	51
	Záver	53
	Literatúra	55
	Zoznam jednotiek	61

Úvod

Akumulácia energie

Akumulácia energie je pre nás ako ľudstvo nesmierne dôležitá, a to predovšetkým v dobe, kedy sa hľadajú alternatívy fosílnych neobnoviteľných zdrojov energie. Hlavným problémom používania obnoviteľných zdrojov energie je neschopnosť zvoliť čas ich výroby. Naopak, u elektrární produkujúcich energiu z fosílnych palív, ako je napríklad uhlie alebo zemný plyn, kde dávkuje palivo podľa dopytu po energii, v obnoviteľných zdrojoch je tento spôsob pre nás nemožný, nakoľko neovplyvníme poveternostné alebo teplotné podmienky okolia. Ak produkujeme energiu z obnoviteľných zdrojov v dobe, kedy po tejto energii nie je dopyt, musíme ju zámerne mariť. Práve preto sa hľadajú spôsoby akumulácie, ktorými by sme boli schopní túto energiu efektívne uskladniť pre neskoršie využitie. K dispozícii máme viacero možností akumulácie energie. Medzi ne patrí aj metóda akumulácie s využitím vodíkových technológií, ktorá premieňa vyprodukovanú energiu a konvertuje ju do vodíka a ďalšími procesmi späť na elektrickú energiu.

Problematika vodíka

Hlavným problémom využitia vodíka v akumulácii energie alebo aj doprave je nízka účinnosť jeho výroby. Ukážkovým príkladom je výroba vodíka pomocou elektrolýzy, ktorá dosahuje účinnosti 17 - 20%. Táto účinnosť je naďalej znižovaná stratami a formou uskladnenia vodíka či už vo vysokotlakových nádobách, alebo jeho skvapalňovaním.

Motivácia k riešeniu problému

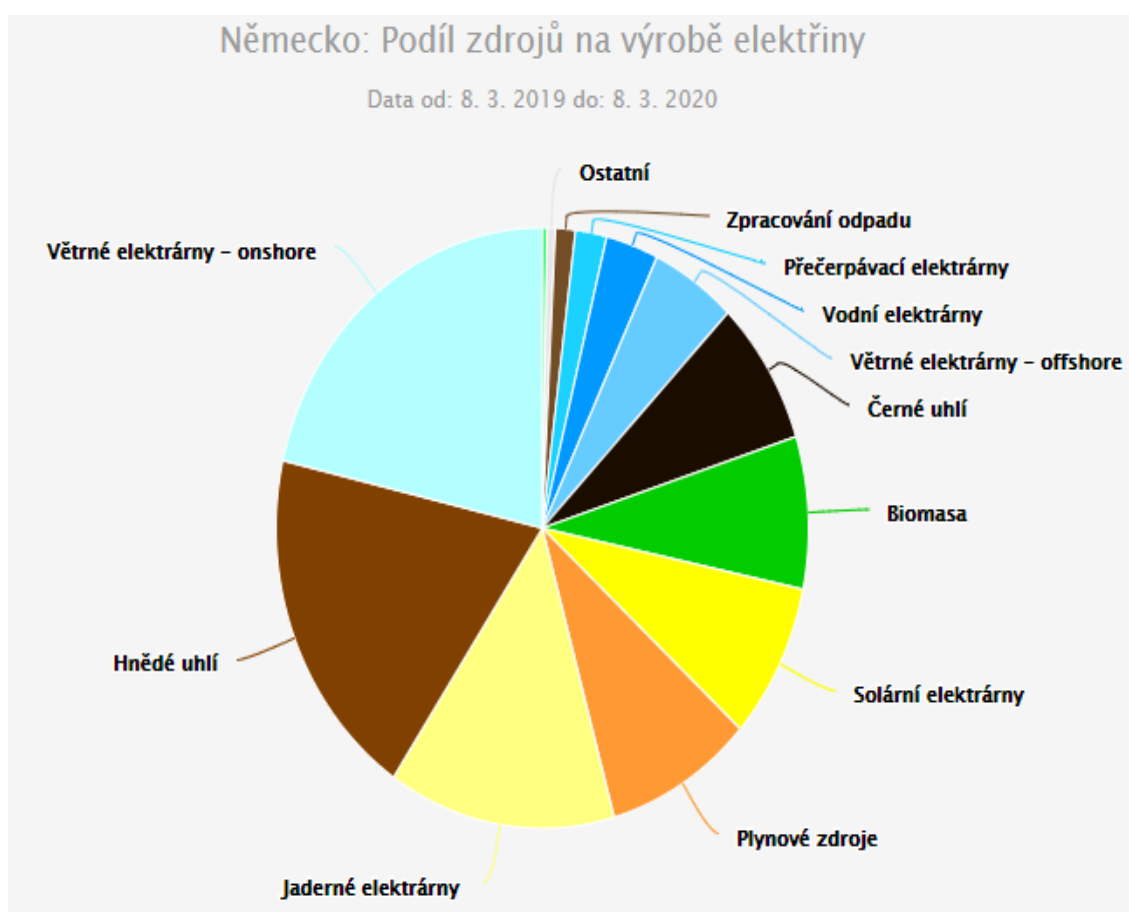
Motiváciou k riešeniu tohto problému je hlavne nevyužitý potenciál obnoviteľných zdrojov. Obnoviteľné zdroje ako vietor, slnko alebo iné majú veľmi impulzný charakter. Znamenajúc, že ich produkcia energie nie je počas dňa konštantná, ale býva ovplyvnená silou vetra alebo intenzitou solárneho žiarenia. Ak by sme v budúcnosti mohli túto energiu akumulovať, mohli by sme prispieť k zníženiu závislosti na fosílnych palivách a znížiť tak dopad ľudstva na životné prostredie.

1 Akumulácia energie

Najväčším problémom využívania elektrickej energie z obnoviteľných zdrojov je ten, že túto energiu nie sme schopní efektívne akumulovať do budúcnosti. Parametre, ktoré sledujeme pri výbere formy akumulácie sú:

- Celková účinnosť akumulácie, ktorá nám udáva pomer energii získanej akumuláciou oproti energii vložennej do samotnej akumulácie.
- Objemová energetická kapacita akumulácie. Toto kritérium stanovuje rozmery akumulácie v $J.m^{-3}$.
- Doba prepnutia. Tá stanovuje za aký dlhý časový úsek po akumulácii je možné túto energiu znova využiť.

Z grafu 1.1 je vidieť výrobu elektrickej energie z obnoviteľných zdrojov v Nemecku.

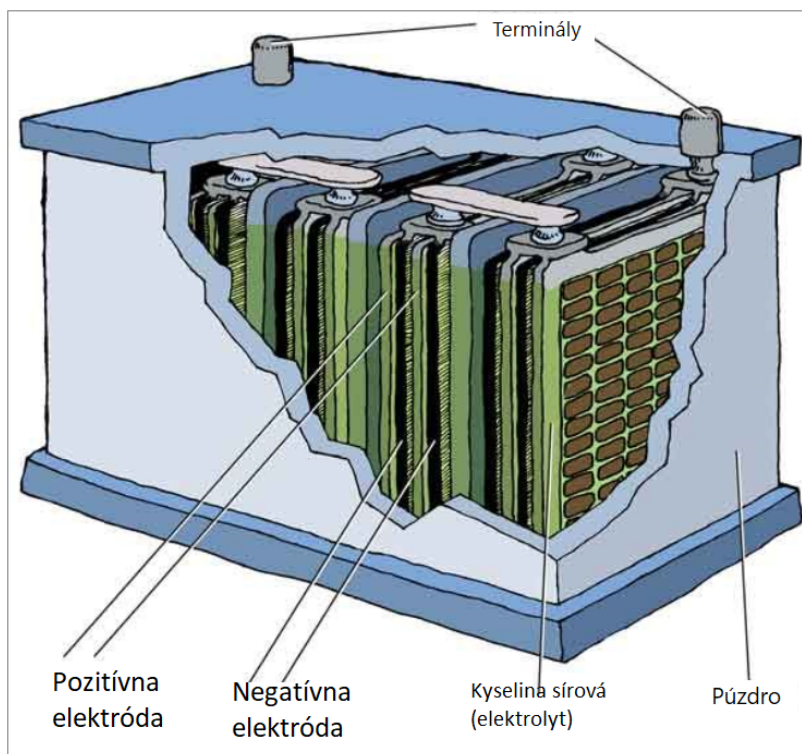


Obr. 1.1: Graf podielu výroby elektrickej energie zo všetkých zdrojov elektrickej energie. [2]

Z tohto grafu sa dá odčítať, že celková produkcia elektrickej energie z obnoviteľných zdrojov v Nemecku za rok 2019 tvorí 50,3% celkovej výroby elektrickej energie.[2]

1.1 Metódy akumulácie energie

1.1.1 Olovené akumulátory



Obr. 1.2: Olovená autobatéria [4]

Sú najpoužívaným zdrojom sekundárneho elektrochemického prúdu. Vyrábajú sa v kapacitách od 1 do 10 000 Ah. Ich výhodami sú nízka cena, dobrá spoľahlivosť a účinnosť.

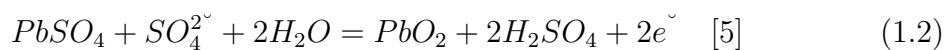
Olovnaté dosky sú ponorené do roztoku elektrolytu, v tomto prípade kyseliny sírovej (H_2SO_4). Na doskách sa pôsobením kyseliny usadí síran olovnatý ($PbSO_4$). Pripojením jednosmerného prúdu pri nabíjaní sa na kladnej elektróde vytvorí čiernehoxid olovičitý (PbO_2), kým záporná elektróda sa pokryje sivou vrstvou hubovitého olova.

Tieto akumulátory sa používajú v širokom spektre procesov. Najbežnejšie sa s nimi môžeme stretnúť v automobilovej doprave [1] [8].

Nabíjanie na katóde



Nabíjanie na anóde

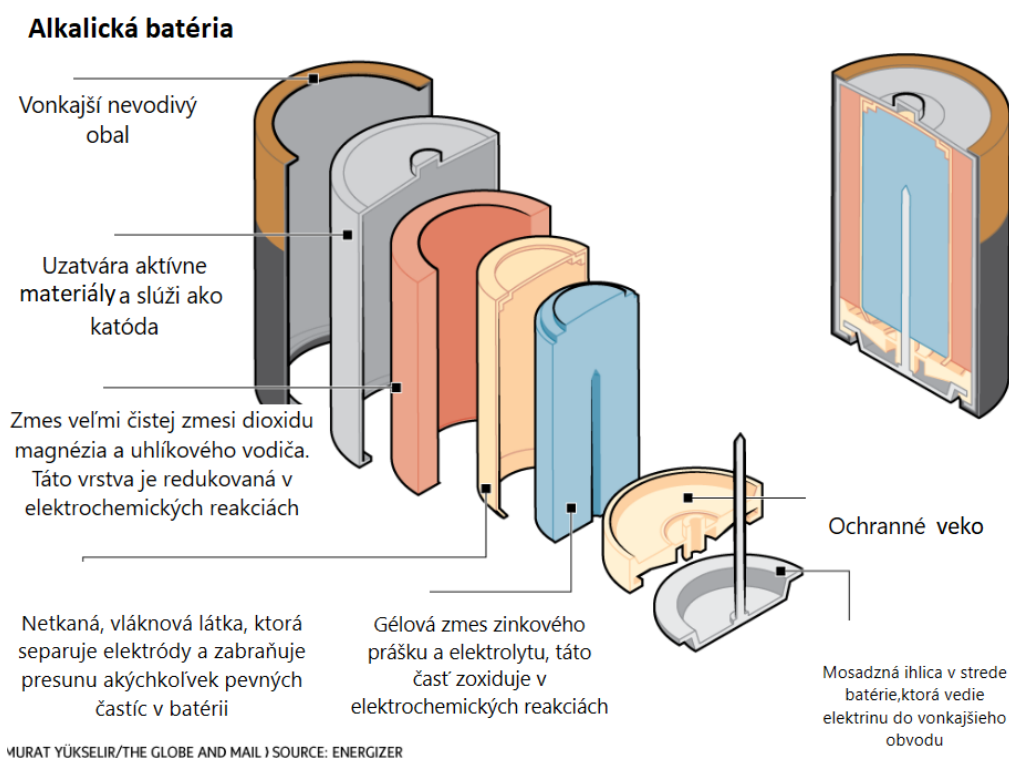


1.1.2 Alkalické akumulátory

Princíp funkcie týchto akumulačných jednotiek je taký istý ako v predošlých olovených akumulátoroch. S rozdielom, že alkalické akumulátory používajú namiesto kyseliny sírovej ako elektrolyt hydroxid draselný (KOH).

Podľa použitia materiálov na kladných a záporných elektródach delíme tieto akumulátory napríklad na Ni-Cd, Ni-Fe, Ni-Zn, Ag-Zn a iné.

Nevýhodou týchto akumulátorov je ich vyššia cena a menšia účinnosť. Medzi ich výhody patria dlhá životnosť, rýchle nabíjanie a dobrá mechanická odolnosť. [8][7].



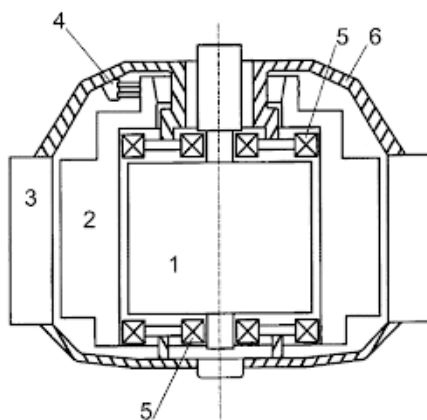
Obr. 1.3: Jednotlivé časti alkalickej batérie [6]

1.1.3 Zotrvačnickové akumulátory

Táto forma akumulátorov patrí k prvým akumulátorom energie. Pozostáva zo zotrvačníka a hriadeľa. Na hriadeľi je elektromotor poháňaný elektrickým prúdom, ktorý sa akumuluje.

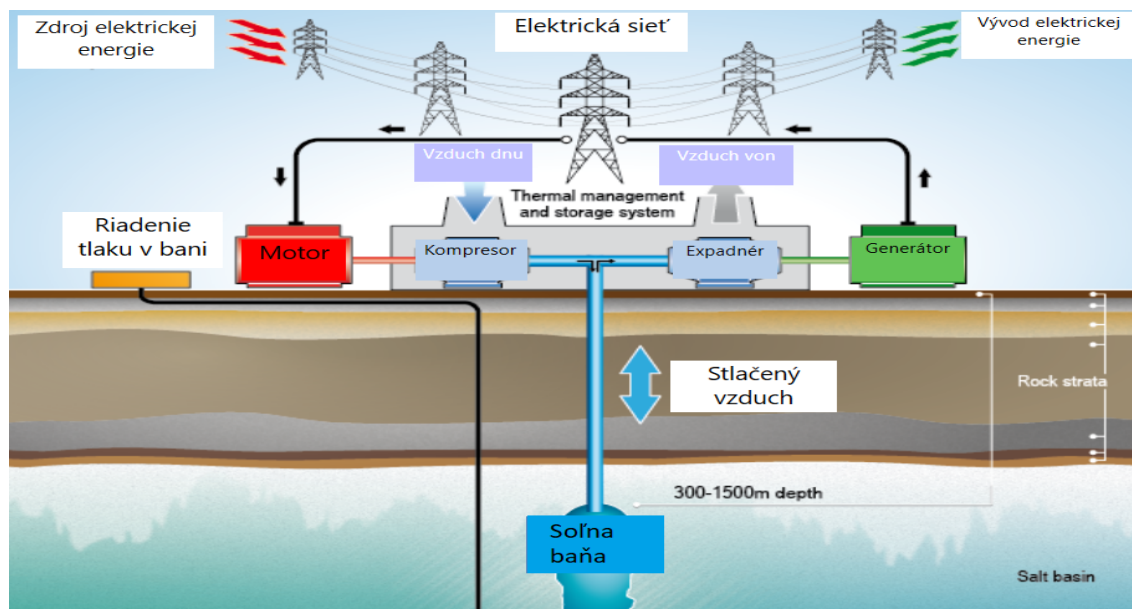
Pri odbere energie sa elektromotor správa ako dynamo alebo alternátor a akumulovanú energiu vracia späť. S postupom času a vývoja technológií sa začali využívať oveľa ľahšie a menšie zotrvačníky z vystužených plastov. Tie sa v špeciálnych ložiskách s vákuovým alebo héliovým prostredím otáčajú a dosahujú lepších parametrov. Nadobúdajú otáčky až do hodnôt $10\,000\text{ ot.min}^{-1}$. [12].

Vďaka týmto technológiám sa v priemysle používajú na prekonanie krátkodobého výpadku elektrizačnej siete. Medzi ich výhody patria relatívne veľká životnosť, zhruba 10 rokov a účinnosť v rozsahu až 90 % – 95 %. [11].



Obr. 1.4: Zotrvačnickový systém pre akumuláciu energie: (1) prvý rotor, (2) proti-bežný rotor, (3) stator, (4) zberač, (5) magnetické ložiská, (6) vonkajšie teleso [9]

1.1.4 Tlakovzdušné akumuláčnej elektrárne



Obr. 1.5: Zjednodušená ukážka tlakovzdušnej akumuláčnej elektrárne, [10]

Tieto akumuláčnej stanice sú variantou pre elektrárne s plynovými turbínami. Princíp spočíva v tom, že vo večerných hodinách, kedy je dopyt po energii menší,

tieto stanice môžu akumulovať energiu pomocou vysoko stlačeného vzduchu, ktorý je vháňaný do utesnených podzemných jaskýň alebo starých baní.

Nevýhodou tejto formy akumulácie je spotreba 2/3 energie vzduchu na pohon samotnému kompresoru a iba 1/3 sa využije na výrobu elektrickej energie.[13]

1.1.5 Prečerpávacie vodné elektrárne

Princíp prečerpávajúcich vodných elektrární je v podstate podobný tomu z tlakovzdušných akumulačných staníc. Pozostáva zo dvoch nádrží o rozdielnych výškach.

Tieto nádrže sú prepojené potrubím, v ktorom sa nachádzajú vysokovýkonné čerpadlá a vodné turbíny. Keď elektrárne majú prebytok energie, tak sa táto energia využije pre čerpadlá, ktoré prečerpajú vodu z nádrže o nižšej potenciálnej energii do nádrže s vyššou potenciálnou energiou. Následne, ak nastane špičkový dopyt po elektrickej energii, tak je z nádrže o vyššej potenciálnej energii spustená potrubím cez vodnú turbínu, ktorá generuje elektrickú energiu, do spodnej nádrže.

Tento spôsob akumulácie energie je charakteristický svojou veľkou relatívnou účinnosťou až 75%. Jeho jedinou nevýhodou je veľkosť potrebných nádrží. [14].

Prečerpávací stanica Čierny Váh



Obr. 1.6: Spodná nádrž prečerpávacej vodnej elektrárne Čierny Váh, SR, [14]

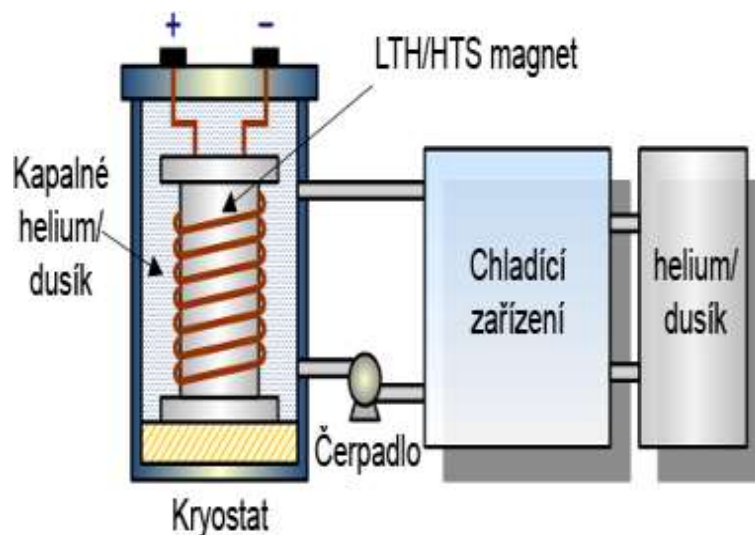
Prečerpávacia vodná elektrárň Čierny Váh je najväčšou prečerpávacou elektrárnou na Slovensku a svojim inštalovaným výkonom je zároveň aj najväčšia vodná elektrárň. Horná nádrž umiestnená v nadmorskej výške 1160 metrov nad morom neobsahuje samostatný prítok vody. Elektrárň poskytuje najmä podporné služby pre elektrizačnú sústavu, vrátane záskoku za najväčší inštalovaný blok v nej.[14]

Tab. 1.1: Parametre prečerpávacej elektrárne Čierny Váh [14]

Kategória	prečerpávacia
Inštalovaný výkon	735.16 MW
Tok	Čierny Váh
Typ turbín	$6 \times Francis + 1 \times Kaplan$
Prietok	$6 \times 30 + 1 \times 8 [m^3/s]$
Počet turbogenerátorov	7
Rok uvedenia do prevádzky	1982
Priemerná ročná výroba	200 [GWh]

1.1.6 Supravodivé indukčné akumulátory

Sú to zariadenia, ktoré umožňujú uchovať elektrickú energiu pomocou bezdrôtového prenosu elektrického prúdu po supravodivých nosičoch.



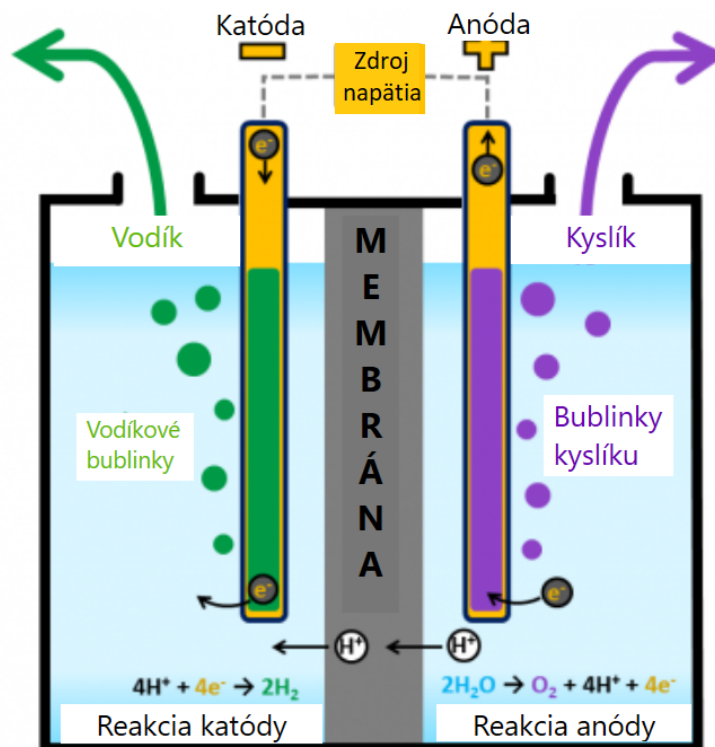
Obr. 1.7: Nákres supravodivého akumulátoru [15]

Prvé malé supravodivé akumulátory pozostávali zo supravodivej cievky ponorenej do kvapalného hélia, napojenej na usmerňovač prúdu. Tieto akumulátory boli

kapacitné do 1MW. Väčšie supravodivé akumulátory v extrémoch až 4000 MW s účinnosťou lepšou než 95% .

Výhodou týchto akumulátorov je predovšetkým ich dlhá životnosť, niektoré vydržia zhruba milióny cyklov vybitia a nabitia. Taktiež ich vysoká účinnosť a nízky čas nabitia a následného vybitia. [16]

1.1.7 Elektrolýza vody



Obr. 1.8: Elektrolýza vody,[17]

Ďalším spôsobom akumulácie energie je pomocou elektrolýzy. Elektrolýza je proces, kedy zavádzame do roztoku elektrolytu napr. vody alebo roztavenej soli, jednosmerný elektrický prúd.

V elektrolyte dochádza k rozkladným reakciám. Prúd je privádzaný na dva vodiče. Katódu, na ktorú prichádza záporný prúd a anódu, na ktorú prichádza kladný prúd. Podľa zloženia elektrolytu dostávame rozkladnými reakciami rozličné prvky. V tomto prípade nás zaujíma hlavne elektrolýza vody, ktorou dostávame vodík, kyslík a teplo z reakcie.

Uplatnenie tejto metódy sa rozvíja hlavne v obnoviteľných zdrojoch energie. Výkon týchto elektrární nie je možné dobre regulovať, preto sa prebytočný elektrický

výkon akumuluje pomocou elektrolyzy vo forme vodíka. Spätne sa z neho získa elektrická energia pomocou takzvaných palivových článkov, ktoré nám vodík pomocou elektrolytu, katódy, anódy a membrány prevádzajú na elektrický prúd.

Výhody tejto metódy spočívajú hlavne v jej čistote, kedy jedinými produktmi premeny vodíka na elektrickú energiu sú voda a teplo. Jej nevýhody sú hlavne v jej vysokej cene a nízkej celkovej účinnosti procesu. Účinnosť samotnej elektrolyzy sa pohybuje v rozmedzí 50-60%. [18] [17]

1.2 Druhy elektrolyzéro

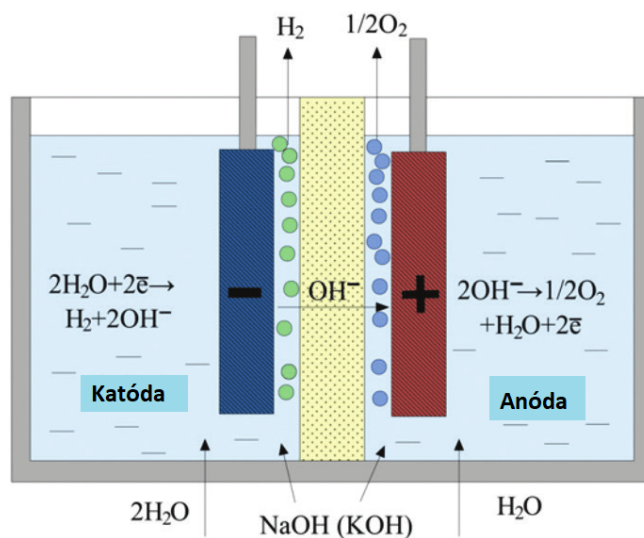
Všeobecne sa rozlišujú 3 typy elektrolyzéro. Sú to alkalické elektrolyzéry (AEL), membrána výmeny protónov (PEM) a elektrolyzéry pevných oxidov (SOEC). [17]

Tieto typy elektrolyzéro pracujú pod rozličnými operačnými parametrami ako tlak a teplota. Tieto parametre sú zobrazené v tabuľke 1.2.

Tab. 1.2: Prevádzkové parametre elektrolyzéro [19]

Typ	Operačná teplota [°C]	Operačný tlak [Bar]	Plyn na katóde	Plyn na anóde
<i>PEM</i>	40 – 80	< 30	H_2	O_2H_2O
<i>AEL</i>	65 – 220	< 30	H_2O	O_2H_2O
<i>SOEC</i>	600 – 1000	< 10	H_2H_2O	O_2

1.2.1 Alkalické elektrolyzéry

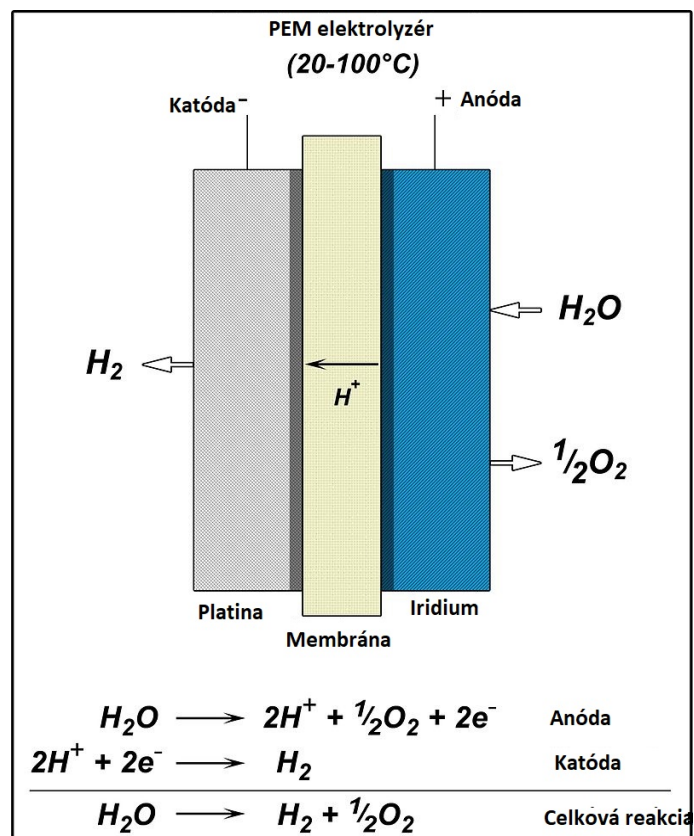


Obr. 1.9: Princíp alkalického elektrolyzéro [21]

Alkalické elektrolyzéry fungujú na princípe redukcie molekúl vody na katóde na atómy vodíka a hydroxidu prúdením jednosmerného prúdu elektrolytom zloženého z hydroxidu draselného. Atómy vodíka sa zlúčia a vytvoria vodíkový plyn, ktorý odchádza od katódy. Hydroxil (OH-) migruje od katódy vplyvom elektrického poľa k anóde, kde sa OH- vzdá svojich elektrónov a vypustí atómy kyslíka, ktoré v plynnej podobe odchádzajú od anódy.

Konverzia alkalických elektrolyzéroov je vyše 90 % a čistota plynu dosahuje 99,8 %. Tieto elektrolyzéry sú bežne používané v procesnej výrobe. K ich výhodám patrí medzi iné dlhá životnosť meraná v desaťročiach a taktiež používanie relatívne lacných materiálov pre katalyzátory, ako napríklad nikol, oproti iným elektrolyzéroom. [20]

1.2.2 PEM elektrolyzéry



Obr. 1.10: PEM elektrolyzér [22]

PEM elektrolyzéry používajú iónicky konduktívny materiál ako membránu. Pri zavedení rozdielneho napätia medzi dvomi elektródami sa záporne nabitý kyslík v molekule vody zbaví jeho elektrónu na anóde za vzniku protónov, elektrónov a O_2 na anóde.

Ióny H^+ migrujú cez membránu ku katóde, kde si vezmú elektrón a vznikne z nich neutrálny nabitý atóm H , ktorý sa spojí s ostatnými a vytvorí molekulu H_2 na katóde. [23]

Tab. 1.3: Výhody a nevýhody rozličných typov elektrolyzéroov [24] [25]

	Alkalické	PEM	SOEC
Výhody	Zaužívaná technológia Katalyzátor nie je z ušľachtilých materiálov Dlhodobá stabilita Relatívna nízka cena Výkony v MW Pomer cena Výkon	Vysoká hustota prúdu Vysoká napäťová účinnosť Rýchla odozva Kompaktný systém Vysoká čistota plynu Dynamická operácia	Účinnosť až do 100 % Nepoužíva ušľachtilé kovy Vysokotlaková prevádzka
Nevýhody	Nízka hustota prúdu Nižšia čistota plynov Nízka dynamika Nízky operačný tlak	Vysoká cena komponentov Korózne prostredie Možná nižšia účinnosť	Technológia v laboratórnom štádiu Objemný dizajn Náchylné na poškodenie

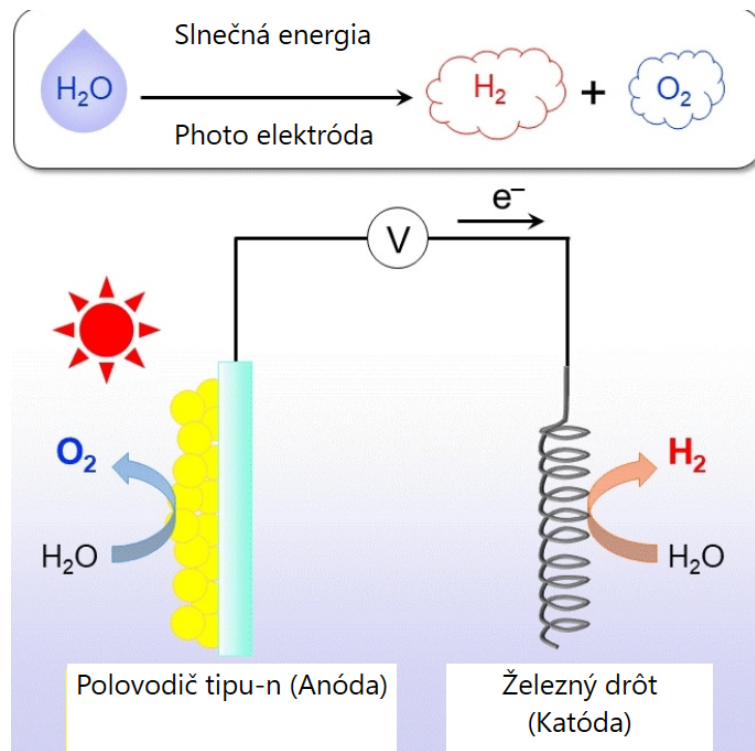
1.3 Spôsoby akumulácie energie pomocou vodíka

1.3.1 Štiepenie vody

Štiepenie vody je jednou z foriem akumulácie energie pomocou vodíka, keďže voda je prírodným nosičom vodíka.

Vodu môžeme štiepiť rozličnými spôsobmi. Pomocou solárnej energie, pričom sa tento spôsob skladá z dvoch krokov.

- 1. je konverzia slnečnej energie pomocou fotovoltaických panelov na elektrickú energiu.
- 2. krokom je konverzia tejto energie na vodík pomocou elektrolýzy a následne späť na elektrickú energiu pomocou palivových článkov. Účinnosť samotných fotovoltaických panelov je zhruba 17 % pri použití mono-kryštalických panelov, ktoré sú ťažšie na výrobu ako poly-kryštalické s účinnosťou okolo 14 %..[26]



Obr. 1.11: Štiepenie vody pomocou solárnej energie [27]

1.3.2 Fotónová absorpcia

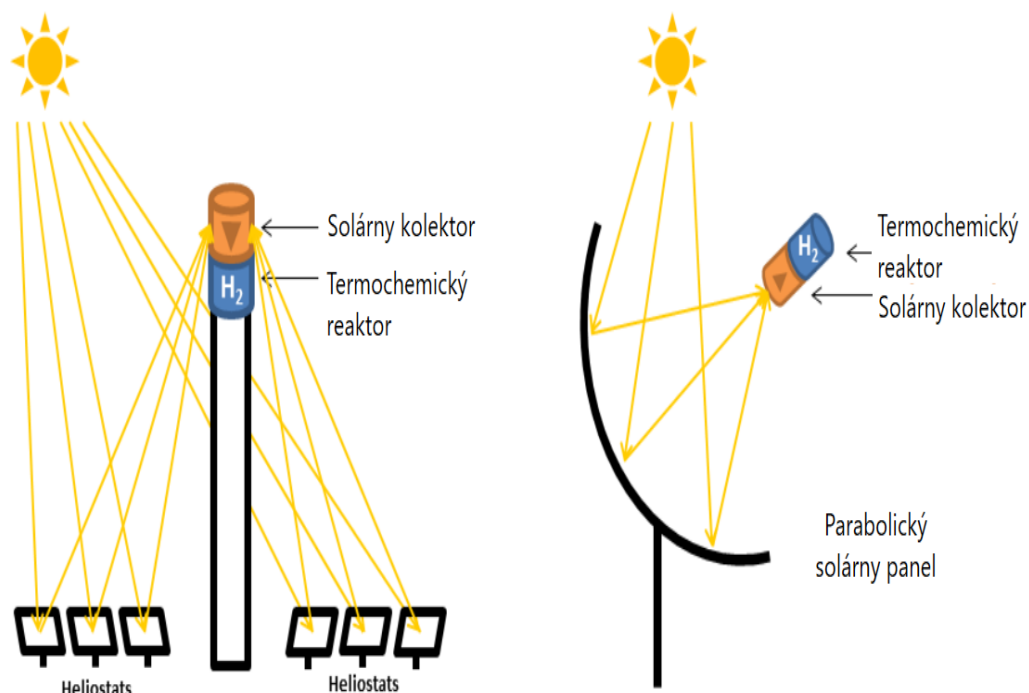
Fotónová absorpcia konvertuje fotónovú energiu slnka na chemickú energiu vodíka. Energia nesená fotónmi je proporcionálna ku frekvencii radiácie a je stanovená rovnicou 1.3. [28]

$$E_{ph} = h \times \nu \quad [28] \quad (1.3)$$

Kde h je Planckova konštanta a ν je frekvencia. Keď fotón zasiahne fotokatalyzátor vytvorí elektrónový pár a získaný elektrický náboj je využití na rozdelenie vody. [28]

1.3.3 Termochemické štiepenie vody

Termochemické štiepenie vody má výhody v tom, že nepotrebuje katalyzátory pre pochod jednotlivých chemických reakcií. Ako aj v iných metódach, tak aj v tejto je vodík produkovaný z vody. Ďalšou výhodou tejto metódy je taktiež nepotrebná membrána pre separáciu kyslíka od vodíka. Teplota, pri ktorej prebiehajú tieto reakcie je v rozmedzí 600 - 1200 K. [28]



Obr. 1.12: Termochemické štiepenie vody [30]

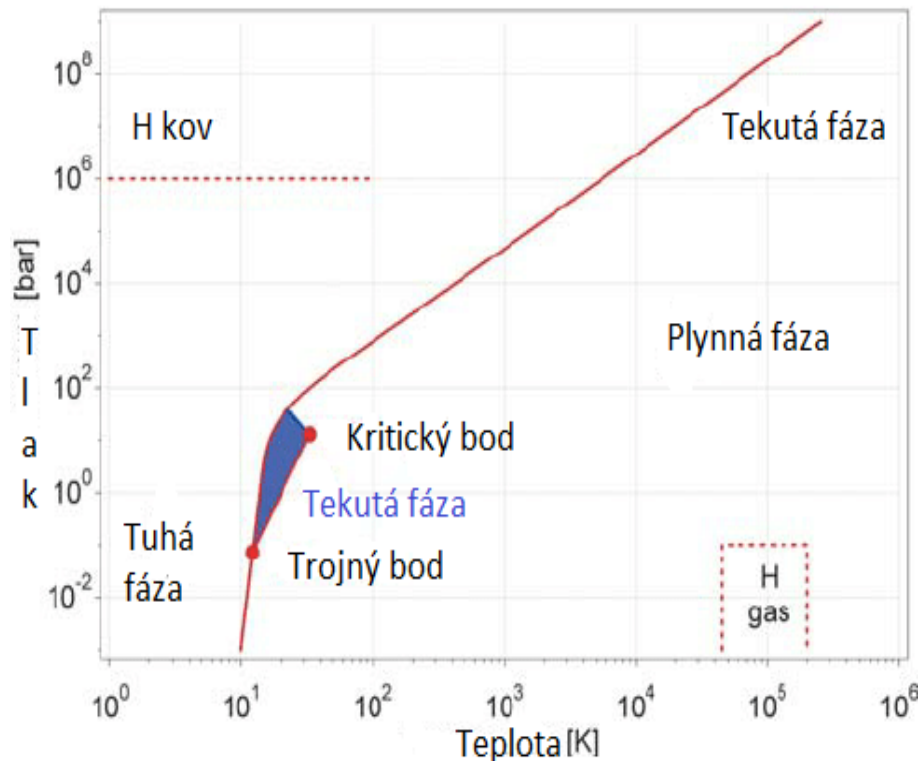
1.3.4 Splyňovanie biomasy

Pre využitie biomasy na výrobu vodíka musí byť voda obsiahnutá v biomase udržiavaná na istej úrovni, a preto je najprv vysušená. Katalyzátorom v tomto prípade je teplo dodávané do reakcie čiastočnou oxidáciou v splyňovači. [29]

1.4 Skladovanie vodíka

Molekula vodíka môže byť nájdená v rozličných stavoch v závislosti na teplote a tlaku - viac diagram 1.13. V nízkych teplotách vodík nadobúda pevné skupenstvo o hustote $70,6 \text{ kg.m}^{-3}$ pri teplote -262°C a plynné skupenstvo vo vyšších teplotách o hustote $0,089886 \text{ kg.m}^{-3}$ pri teplote 0°C a tlaku 1 bar. Zóna od trojného bodu ku kritickému bodu znázorňuje vodík v kvapalnom stave o hustote $70,8 \text{ kg.m}^{-3}$ pri teplote -253°C .

Skladovanie vodíka implementuje zníženie obrovského objemu tohto plynu, ktorý za normálnych podmienok teploty a tlaku dosahuje pre 1 kg H_2 plynu 11 m^3 . Aby sa zvýšila hustota vodíka musí sa dodať práca pre stlačenie plynu, znížiť teplota plynu pod kritický bod alebo sa musí znížiť odpudzovanie molekúl vodíka interakciou s ďalším materiálom. Ďalším dôležitým faktorom pri skladovaní vodíka je návratnosť tohto deja pri skladovaní a získavaní.[31]



Obr. 1.13: Diagram znázorňuje fázy vodíka v závislosti na teplote a tlaku [31]

Tab. 1.4: Spôsoby skladovania vodíka

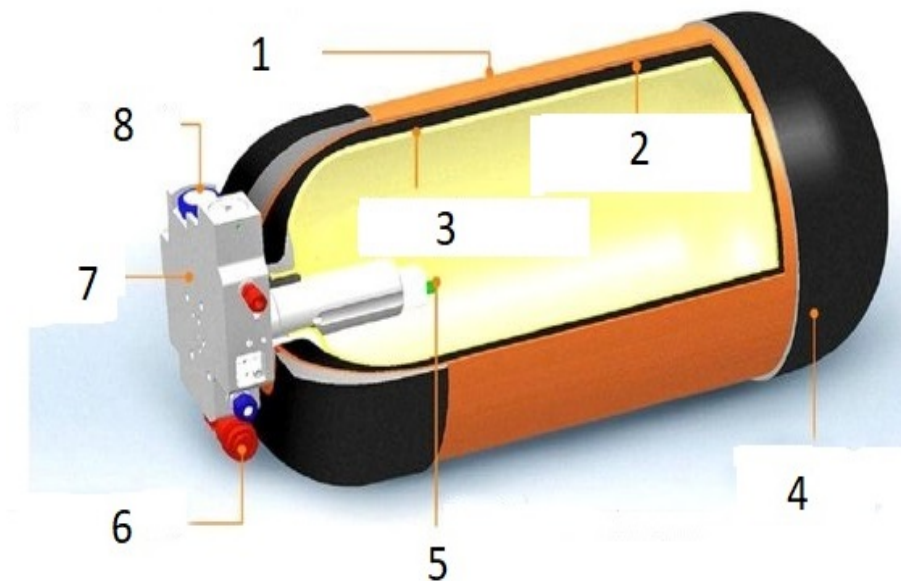
	Metódy skladovania
1	Vysokotlakové plynové nádoby
2	Skvapalňovanie vodíka
3	Fyzikálna absorpcia vodíka

1.4.1 Vysokotlakové plynové nádoby

Najbežnejšia metóda skladovania vodíka je vo vysokotlakových nádobách o maximálnom tlaku 20 MPa. Nové kompozitné materiály môžu dosiahnuť maximálneho tlaku až 80 MPa. V týchto tlakoch vodík dosiahne hustoty o hodnote 36 kg.m^{-3} , približne polovicu ako v tekutej fáze. Hustota vodíka sa v tejto metóde so zväčšujúcim tlakom znižuje, a to z dôvodu zväčšovania hrúbky stien tlakovej nádoby. Hrúbku steny popisuje rovnica 1.4. [31]

$$\frac{d_w}{d_o} = \frac{\Delta p}{2 \times \sigma + \Delta p} \quad [31] \quad (1.4)$$

Vodík môže byť stlačovaný klasickými piestovými kompresormi. Jediná úprava je modifikáciou tesnenia kompresoru pre kompenzáciu väčšej difuzivity vodíka. Teore-



Obr. 1.14: Kompozitná tlaková nádoba na skladovanie vodíka: Vonkajšia ochranná vrstva odolná voči nárazom (1), penová kupola odolná voči nárazom (4), Výstup plynu (8), integrovaný regulátor tlaku (5), uhlíková kompozitná vrstva pre mechanickú odolnosť (2), polymér s veľkou hustotou pre zabránenie difuzivity plynu (3), ventilový systém (7), bezpečnostný ventil (6) [32]

tická práca potrebná pre izotermické stlačenie vodíka je popísaná rovnicou 1.5. [31]

$$\Delta H = R \times T \times \log \frac{p}{p_0} \quad [31] \quad (1.5)$$

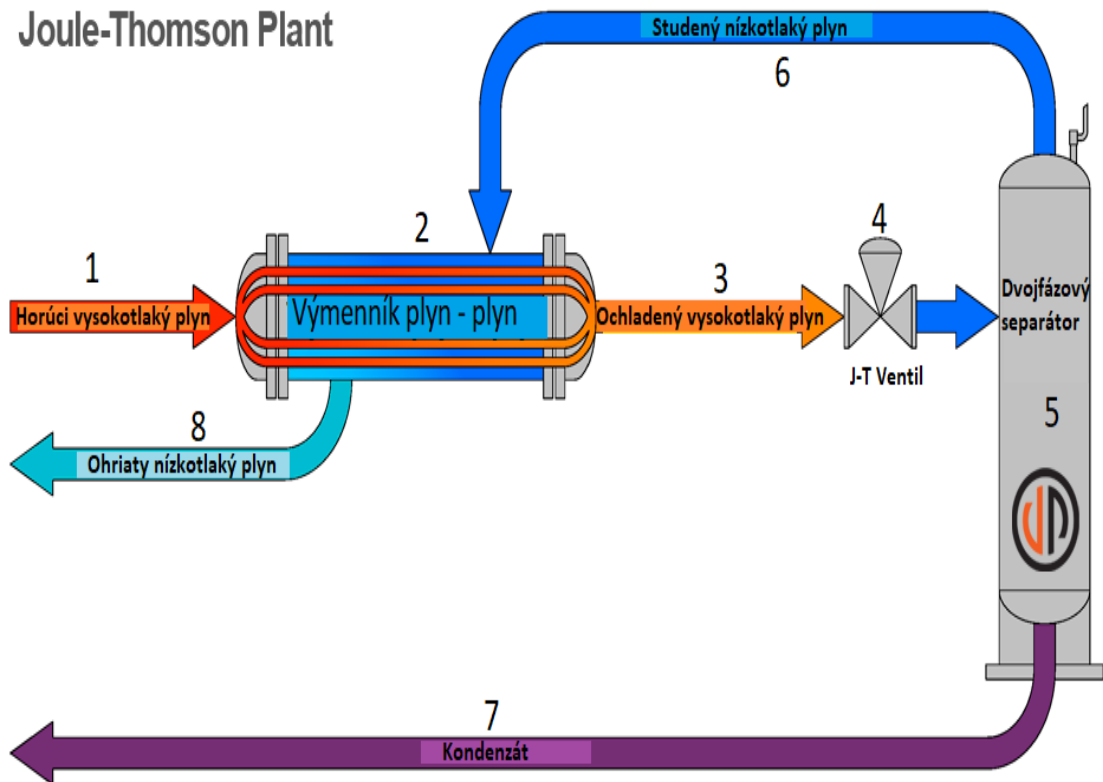
V praxi je práca vykonaná na stlačenie vodíka oveľa väčšia, pretože nemá charakter izotermického procesu.[31]

1.4.2 Skvapaľňovanie vodíka

Aby sa udržal vodík v kvapalnej fáze musí byť schladený a udržiavaný na teplote 21,2 K. Z tohto dôvodu sa kvapalný vodík skladuje v kryogénnych nádobách za atmosférického tlaku. Kvôli nízkej kritickej teplote vodíka (33 K) môže byť skladovaný iba v otvorených systémoch z dôvodu, že nad kritickým bodom neexistuje žiadna kvapalná fáza. Hustota kvapalného vodíka je 70.8 kg.m^{-3} .

Najväčšie nevýhody tejto metódy skladovania sú skvapaľnenie samotného vodíka bez použitia veľkého množstva energie a taktiež termálna izolácia kryogénnych nádob na zredukovanie prchania plynu.

Najjednoduchší spôsob skvapaľňovania vodíka je pomocou Joule-Thompsonovho cyklu.[31]



Obr. 1.15: Joule - Thomson cyklus [33]

Plyn je najprv stlačený a potom ochladený v tepelnom výmenníku, po ktorom prejde Joule-Thomsonovov izoentalpickou expanziou, ktorá produkuje časť tekutiny. Ochladený plyn je následne od tekutiny separovaný a vrátený späť do kompresoru. Teoretická práca potrebná na skvapalnenie vodíka z plynnej fázy na kvapalnú z izbovej teploty je $3,23 \text{ kWh.kg}^{-1}$, kým technická práca potrebná je $15,2 \text{ kWh.kg}^{-1}$, čo predstavuje skoro polovicu výhrevnosti získanej spaľovaním vodíka.[31]

Ďalším problémom je výparnosť, ktorá vyjadruje mieru kvapaliny, ktorá sa vyparí a unikne zo skladovacej nádoby. Samotná výparnosť je funkciou veľkosti, tvaru a izolácie. Straty sú proporcionálne ku pomeru objemu a povrchu, so zväčšujúcou sa nádobou sa straty zmenšujú. Pre dvojstenné, vákuovo izolované nádoby so sférickým dnom sú výparné straty typicky 0,4 % za deň s kapacitou 50 m^3 , 0,2 % pre 100 m^3 a 0,06 % pre $20\,000 \text{ m}^3$ nádrže.[31]



Obr. 1.16: Nádrž na skvapalnený vodík v NASA KSC [34]

1.4.3 Fyzikálna absorpcia vodíka

Metóda fyzikálnej absorpcie vodíka spočíva v absorpcii plynu na povrchu tuhého alebo kvapalného telesa (absorbér) pôsobením Van der Waalsovými interakciami, ktoré priťahujú molekuly plynu (absorbát). Plynová molekula tu reaguje s niekoľkými atómami absorbéru.

Táto interakcia pozostáva z dvoch častí. Prvou je priťahujúca interakcia, ktorá sa znižuje spolu s narastajúcou vzdialenosťou medzi molekulami a povrchom o koeficient 10^{-6} .

Druhou časťou je odpudzujúca interakcia, ktorá sa znižuje so vzdialenosťou o koeficient 10^{-12} . Z dôvodu malých interakcií medzi molekulami významná fyzikálna absorpcia môže byť sledovaná za nízkych teplôt (menej ako 273 K). Keď vznikne mono-vrstva molekúl absorbátu, molekuly plynu začnú interagovať s molekulami povrchu absorbéru.[31]

Aby sa mohlo odhadnúť množstvo absorbentu v mono-vrstve musí sa poznať hustota absorbovanej tekutiny a objem molekúl. Minimálny povrch pre jeden mól absorbentu v mono-vrstve môže byť kalkulovaný z rovnice 1.6.[31]

$$S_{ml} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times (\sqrt{2 \times N_A} \times \frac{M_{ads}}{\rho_{liq}}) \sqrt{\frac{2}{3}} \quad [31] \quad (1.6)$$

Povrch mono-vrstvy pre vodík je rovný $85\,917 \text{ m}^2 \times \text{mol}^{-1}$. Ďalej množstvo absorbátu na povrchu absorbéru so špecifickou plochou je daný rovnicou 1.7. [31]

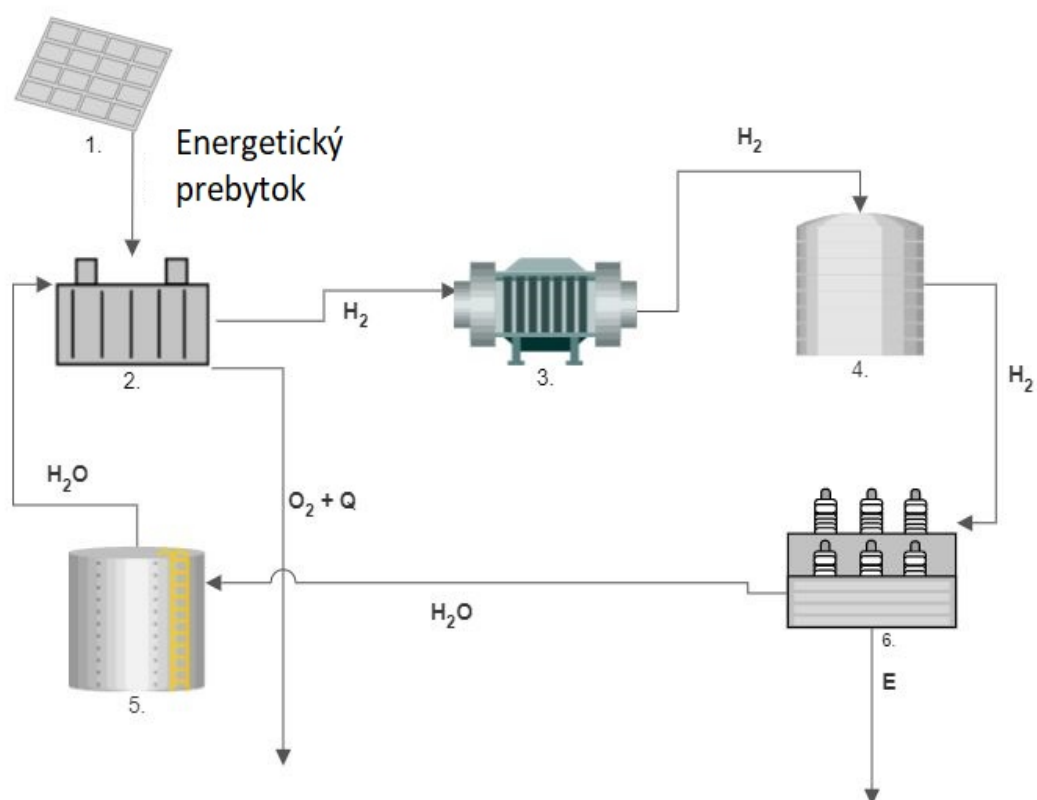
$$m_{ads} = M_{ads} \times \frac{S_{spec}}{S_{ml}} \quad [31] \quad (1.7)$$

Ako absorbéry sa používajú mnohé materiály. Príkladom sú grafitové pásy, nanoštruktúrované trubice, taktiež komplexné a feritické hybridy, ktoré sú schopné absorbovať omnoho viac vodíka ako grafitové pásy. [31]

2 Návrh akumuláčnej stanice

Akumuláčná stanica sa skladá z piatich komponentov:

1. Zdroj energetických prebytkov
2. Elektrolyzér
3. Kompresor/Chladič
4. Skladovacia časť pre H_2
5. Zdroj vody pre elektrolyzér
6. Spätná premena H_2 na požadovanú formu energie



Obr. 2.1: Blokové schéma akumuláčnej stanice

2.1 Zdroj energetických prebytkov

Ako zdroj energetických prebytkov sa môže považovať akýkoľvek zdroj energie. Táto práca je sústredená na obnoviteľné zdroje a ich energetické prebytky na území ČR.

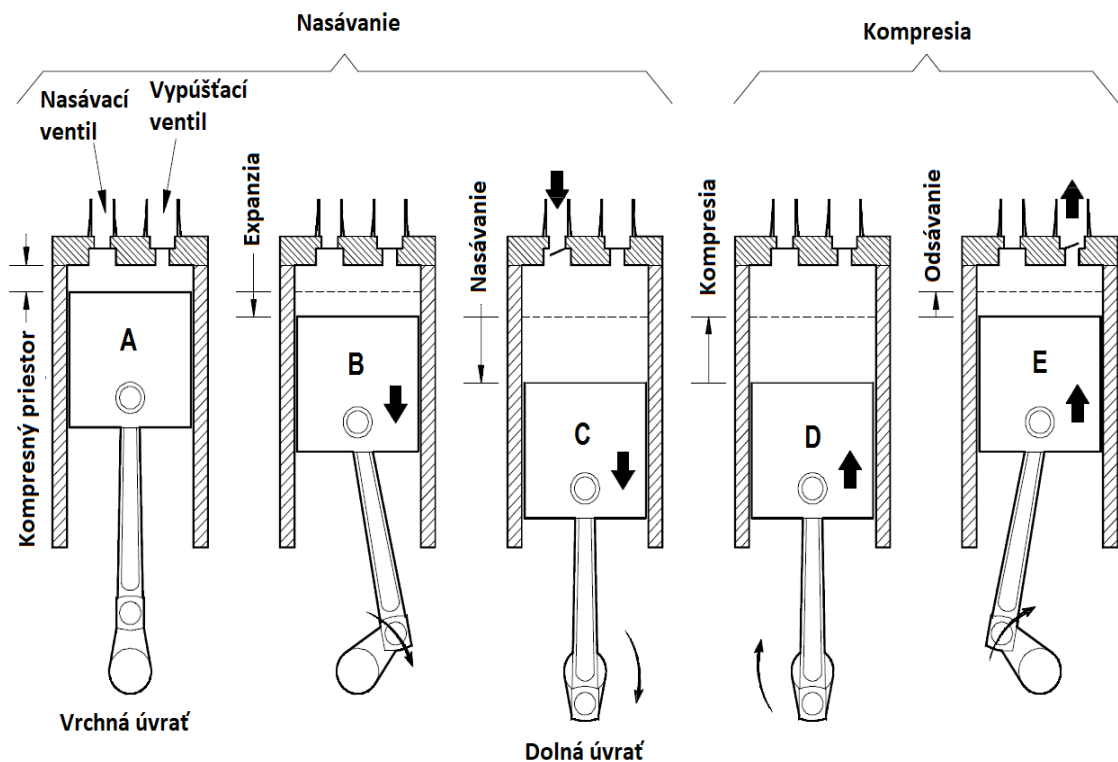
2.2 Kompresor

V danom návrhu akumuláčnej stanice je kompresor potrebný za prípadu, že tlak vodíka z elektrolyzéra nespĺňa požiadavky pre jeho tlakové skladovanie. Pri výbere skladovania vodíka v skvapalnenom stave by bol kompresor doplnený o chladenie. Typickým prevádzkovým tlakom pre tlakové skladovanie vodíka je 350 bar.[35]

Pre udržanie, čo najmenšej spotreby energie na skladovanie vodíka je vhodnejšia práve metóda skladovania vodíka pod tlakom, nakoľko sa vyhneme spotrebe energie pre jeho skvapalnenie a chladenie.

Ak tlak vodíka na výstupe z elektrolyzéra je nedostačujúci pre jeho skladovanie, je potrebné ho priviesť na prevádzkový tlak ideálny pre skladovanie. Tento účel spĺňajú vodíkové kompresory. V komerčnom prostredí existuje niekoľko typov kompresorov pre stlačovanie vodíka. Medzi ne patria piestové, kovovo membránové a taktiež rotorové kompresory. [36]

Piestové kompresory Tieto typy kompresorov patria medzi piestové stroje, ktoré fungujú na princípe zachytávania malého objemu plynu v uzatvorenej komore, následnom zmenšení objemu premiestnením plynu do druhej komory a posledne jeho uvoľnením do skladovacej nádoby. K výhodám tohto typu kompresora patria jednoduchá konštrukcia, ktorá znamená menšie náklady na opravy. Nie je potrebná žiadna komplikovaná inštalácia, a tak isto je ich možno okamžite uviesť do prevádzky a spätne ich zastaviť. Medzi ich nevýhody patrí vysoká hlučnosť spôsobená opakovaným pohybom stlačovacieho piesta, ktorý spôsobuje vibrácie a znižuje životnosť stroja.[37] [38]



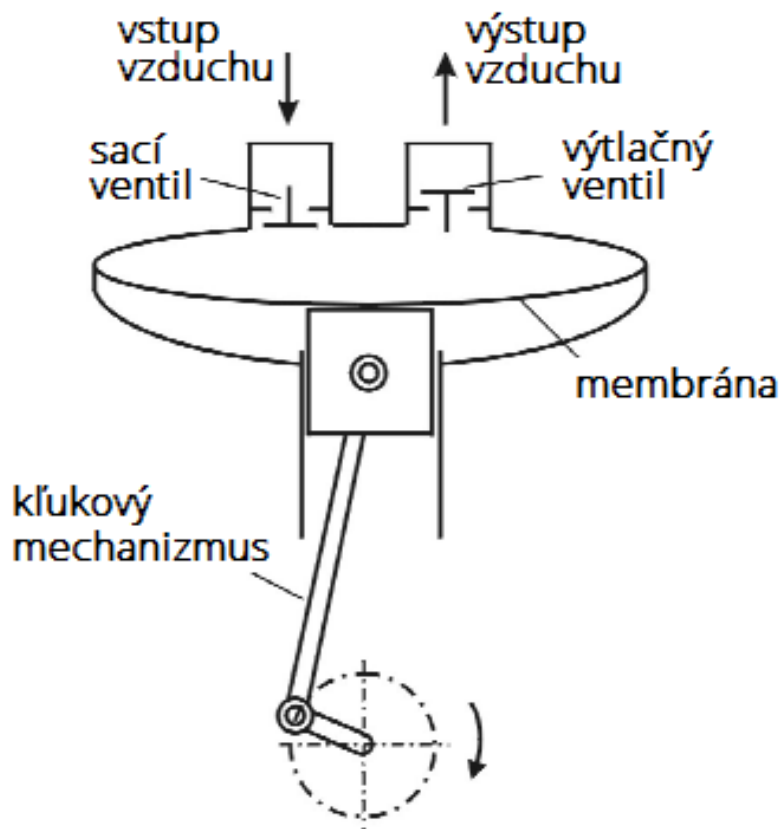
Obr. 2.2: Piestový kompresor [39]

Membránové kompresory Tento typ kompresoru využíva rotujúcu membránu pre nasávanie plynu, ktorý je následne premiestnený do stlačujúcej časti, v ktorej je mu dodaný dostatočný tlak pre jeho skladovanie. Medzi výhody týchto kompresorov patrí bezupchávková konštrukcia, pracovný priestor nie je znečisťovaný olejom a malý mŕtvý priestor, ktorý umožňuje dosiahnutie väčšieho kompresného pomeru. [41]

$$\epsilon_k = \frac{V_k + V_z}{V_k} \quad [42] \quad (2.1)$$

Rovnica 2.1 ukazuje vzorec na výpočet kompresného pomeru. Kde V_k je objem kompresného priestoru a V_z je zdvihový objem. Čím je kompresný pomer väčší tým dôjde k väčšiemu stlačeniu plynu. [42]

Nevýhodou týchto kompresorov je hlavne ich veľká hmotnosť. Používajú sa primárne pre stlačovanie vzácnych plynov a plynov, ktorých únik do okolia je nežiadúci. Voda môže byť použitá ako stlačovacia kvapalina pre zamedzenie požiarov. [41]



Obr. 2.3: Prierez membránovým kompresorom [40]

Rotorové kompresory Pracovný pohyb v tomto prípade je rotačný. Medzi výhody týchto kompresorov patria vyššie otáčky, priame spojenie s pohonom a zníženie hmotnosti. Rotačné kompresory sa stavajú ako jednostupňové s celkovým kompresným pomerom 3:4 a dvojstupňové s kompresným pomerom 8:10 alebo trojstupňové. [41]

Medzi ich nevýhody patria neschopnosť prispôbiť sa protitlaku v sieti, tak isto aj hluk o vysokej frekvencii. [41]

Rozlišujeme tieto typy rotorových kompresorov.

1. Krídlové
2. Vodokrúžne
3. Zubovo dvojrotorové
4. Šróbové

2.3 Skladovacia časť

Rozličné spôsoby skladovania vodíka boli už zmienené v predošlých kapitolách, základné spôsoby a ich operačné parametre môžeme vidieť v tabulke 2.1.

Tab. 2.1: Skladovacie spôsoby [31]

Metóda skladovania	ρ_m (%)	ρ_m ($kg.H_2.m^{-3}$)	T (C)	p (bar)
Vysokotlakové skladovanie	13	<40	RT	800
Tekuté skladovanie	Závislé na veľkosti	70,8	-252	1
Absorpčná metóda	2	20	-80	100
Komplexné zložky	<18	150	>100	1

Každá z týchto metód ponúka svoje výhody a nevýhody. Najpriaznivejšími a najpoužívanejšími metódami sú vysokotlakové skladovanie a skvapalňovanie. Porovnaním týchto dvoch metód sa rozhodne či sa plyn bude stlačovať kompresorom alebo chladiť na požadovanú teplotu. V tom prípade zamieňame kompresor za chladiaci komponent. Pri výbere akumuláčného spôsobu sa musí uvažovať o následnom využívaní skladovaného vodíka, a to či sa bude premieňať na elektrickú energiu alebo spaľovať za vzniku tepelnej energie.

2.4 Elektrolyzér

Pri výbere elektrolyzéra je potrebné sa zamerať na zariadenie, ktoré poskytne, čo najväčší rozsah prevádzkových parametrov ako napájacie napätie, maximálnu účinnosť, vysokú čistotu vodíka. Z týchto dôvodov sa táto práca zameria na niekoľkých producentov elektrolyzéro. Následne budú elektrolyzéry porovnané. Medzi tieto firmy patria:

- ITM Power Plc
- McPhy Energy SA
- Siemens AG
- Nel ASA

2.4.1 ITM Power Plc

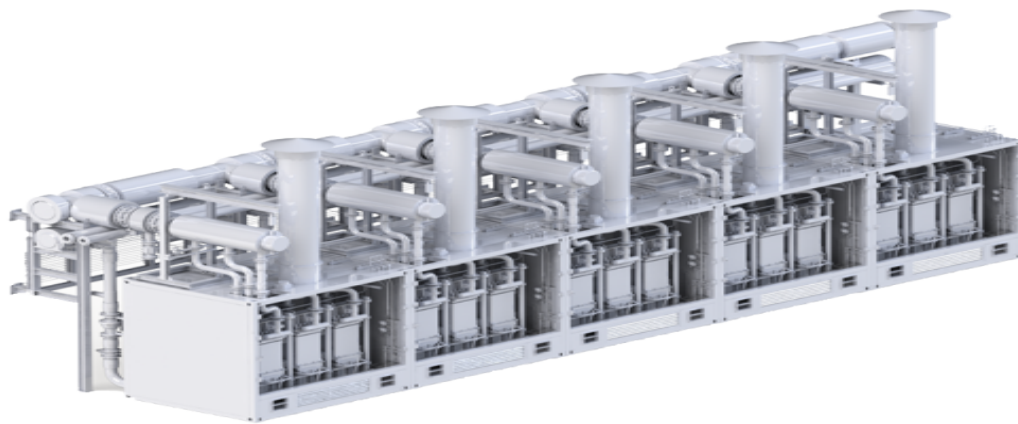
ITM Power Plc ponúka široké spektrum elektrolyzéro od stoviek kW po desiatky MW. Medzi ich výhody patrí modulárna konštrukcia, kedy môžeme elektrolyzér skladať z jednotlivých modulov, aby sme dosiahli požadovaný výkon. Taktiež tieto moduly dokážu fungovať samostatne, umožňujú pracovať v širšom spektre vstupných parametrov. [43]

2.4.2 McPhy Energy SA

McPhy Energy SA ponúka sortiment alkalických elektrolyzéro. Tak isto, ako v predošlom prípade, aj táto spoločnosť ponúka modulový systém zapojenia elektro-

Tab. 2.2: Ponuka elektrolyzérov ITM Power [43]

model	Typ	pracovný tlak (bar)	Čistota H_2	výroba H_2 (%) (kg/24h)	vstupný výkon (kW)
HGAS1SP	PEM	20	99.999	11	700
HGAS3SP	PEM	30	99.999	36	2350
HGAS2SP	PEM	20	99.999	22	1390
HGASXMW	PEM	20	99.999	4050	10070



Obr. 2.4: HGasXMW [43]

lyzérov, kde jeden modul ponúka výkon 4 MW. Do ich výhod patrí vyšší tlak plynu pri výstupe z elektrolyzéro, a to 30 bar. Tento vyšší tlak znižuje ďalšie náklady na stlačovanie plynu. Firma McPhy ponúka 2 základné kategórie elektrolyzéro, a to malé a veľké. [44]

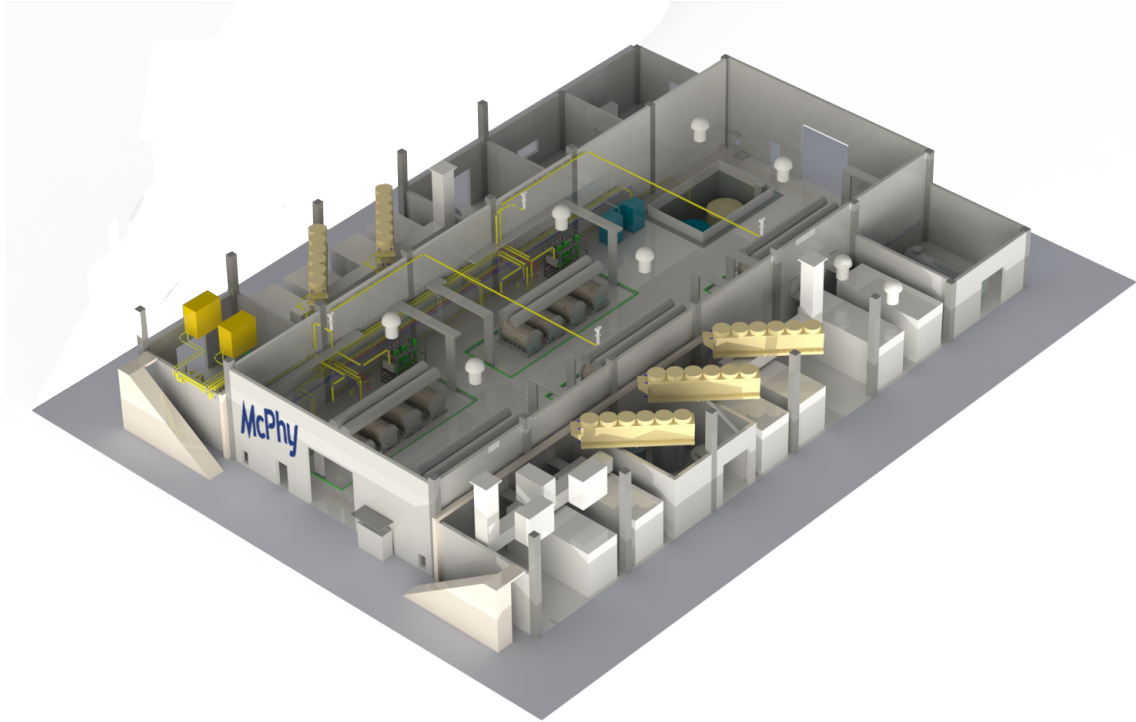
Tab. 2.3: Elektrolyzéry Mcphy Energy SA [44]

Model	Tlak(bar)	H_2 výstup(Nm ³ /h)	výstup O_2 (Nm ³ /h)	ele. spotreba(kW)
Baby	1	0.4	0.2	3
P	1 - 2.5	1 - 1.6	0.5 - 0.8	6 - 9
M	4 - 8	3 - 10	1.5 - 5	18 - 60

Na obrázku 2.5 môžeme vidieť ponuku firmy McPhy z jej rady augmentovaných elektrolyzných staníc, ktorej parametre nájdeme v tabulke 2.5. Výhodou týchto elek-

Tab. 2.4: McLyzer 100 - 30 [44]

Model	Tlak(bar)	H_2 výstup(Nm ³ /h)
McLyzer 100-30	30	100



Obr. 2.5: McLyzer 800-30 [44]

Tab. 2.5: Parametre McLyzer 800-30 [44]

Model	Tlak(bar)	Produkcia H_2 (Nm ³ /h)	Výkon(MW)
MvLyzer 800 - 30	30	800	4

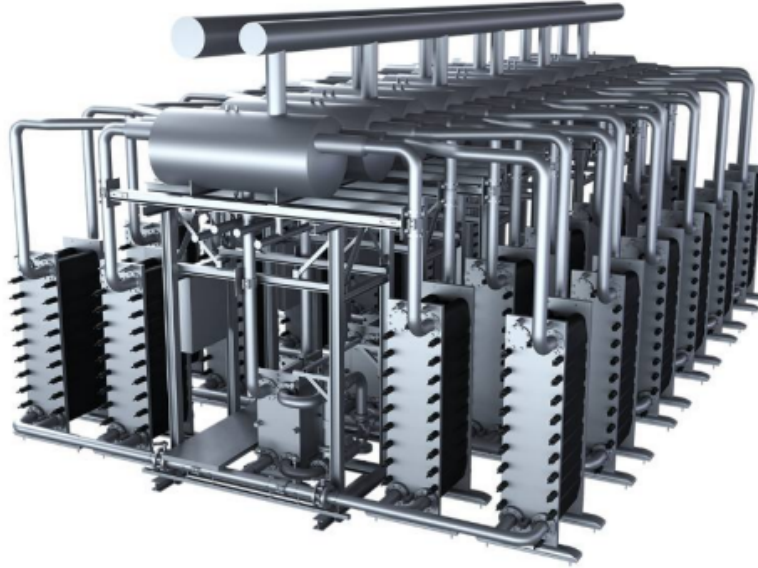
trolyzérov je ich dlhodobá spoľahlivosť a relatívne nízke investičné náklady z dôvodu nevyužívania ušľachtilých kovov na katóde a anóde.[44]

2.4.3 Siemens AG

Siemens AG ponúka ich najnovší model PEM elektrolyzéroov Sylizer 300. Tento nový model ponúka vysokú efektívnosť a výkon v desiatkach MW. Ako ostatné spoločnosti ani Siemens nie je výnimkou v tom, že ponúka modulový systém zapojenia elektrolyzéroov pre zníženie investičných nákladov. [45]

Tab. 2.6: Modul elektrolyzéra Sylezer 300 [45]

Model	Účinnosť	Produkcia H_2 (kg/h)	Spotreba H_2O (l/kg)
Sylizer 300	75.5	100 – 2000	10



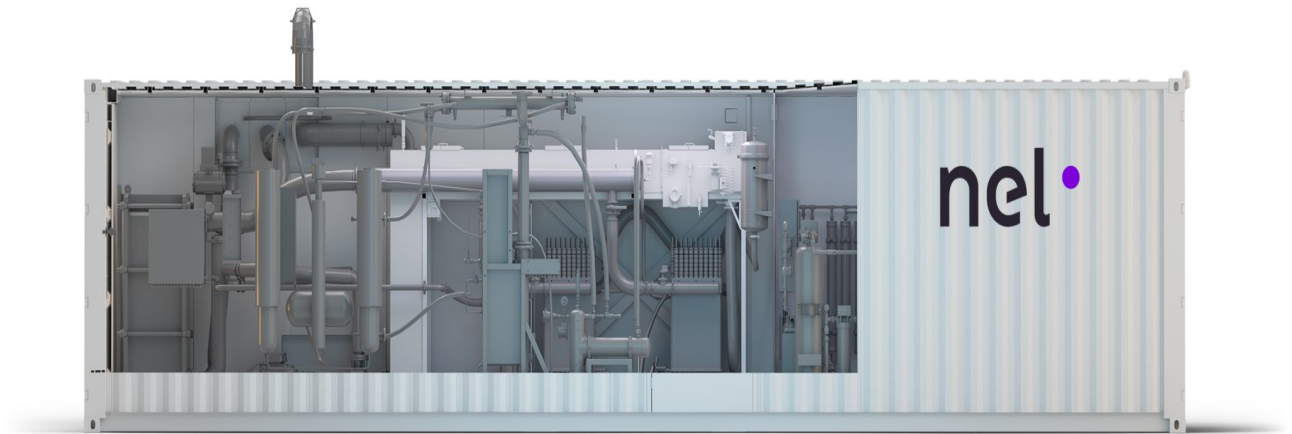
Obr. 2.6: sylizer300 [45]

2.4.4 Nel ASA

Spoločnosť Nel ASA ponúka PEM a alkalické elektrolyzéry v 5 variantách, a to série A, M, C, H a S, ktoré sa od seba líšia hlavne veľkosťou a celkovým výkonom. Konkrétna Série M (PEM) je výrobcami smerovaná pre akumuláciu energie z obnoviteľných zdrojov. Táto séria, ako aj iné, je taktiež modulárna, líši sa v tom, že celý systém elektrolyzy je uzavretý v kontajnerovom púzdre pre možné zapojenie vo vonkajšom prostredí. Jeden kontajner pre procesnú jednotku a jeden pre transformátor.[46]

Tab. 2.7: M séria elektrolyzérovo [46]

Model	H_2 (Nm ³ /h)	Spotreba el.energie(kWh/Nm ³)	Výstupný tlak (bar)
MC 250	246	4.5	30
MC500	492	4.5	30



Obr. 2.7: Elektrolyzér serie M (12.2 m x 2.5 m x 3 m) [46]

2.4.5 Skladovanie Vody

Voda do elektrolyzéroov musí byť deionizovaná. Čo sa týka parametrov skladovacej nádrže, závisí na vstupných parametroch elektrolyzéra, konkrétne jeho spotrebe vody za časový úsek. Voda môže byť zásobovaná z prírodných zdrojov, ale bude musieť byť odstránená od nečistôt, ktoré by mohli spôsobiť zanášanie povrchu elektród, upchanie obehových čerpadiel a tvorenie sedimentu v elektrolyzéroch. Deionizácia vody prebieha pomocou filtrácie vody. Voda sa ohrieva, odparuje, kondenzuje sa na stenách druhej nádoby a ďalej filtruje. Takto deionizovaná voda musí byť skladovaná v sterilných nádobách. [47]

2.5 Modelový výpočet

V modelovom výpočte bude porovnaný inštalovaný výkon solárnych a veterných elektrární, taktiež ich brutto a netto produkcia energie. Za energetický prebytok bude považovaný 5 % celkovej vyprodukovanej elektrickej energie. Toto množstvo energie bude následne použité ako vstup do akumuláčnej stanice.

V tabuľke 2.8 a 2.9 je vidieť celkový inštalovaný výkon solárnych (FVE) a veterných (VTE) elektrární v ČR v roku 2020.

Tab. 2.8: Inštalovaný výkon FVE elektrární [48]

Velkosť elektrární	Inštalovaný výkon (MW)
$\leq 10kW$	88,8
$> 10 \leq 30kW$	144,7
$> 30 \leq 100kW$	56,5
$> 100kW \leq 1MW$	453,9
$1 \leq 5MW$	977,9
5 MW	332,2
celková produkcia	2054

Tab. 2.9: Inštalovaný výkon VTE elektrární [48]

Velkosť elektrární	Inštalovaný výkon (MW)
$\leq 0,5MW$	2,8
$> 0,5a \leq 1MW$	5,8
$> 1a \leq 2MW$	57,9
$> 2 MW$	273
celkový inštalovaný výkon	339,5

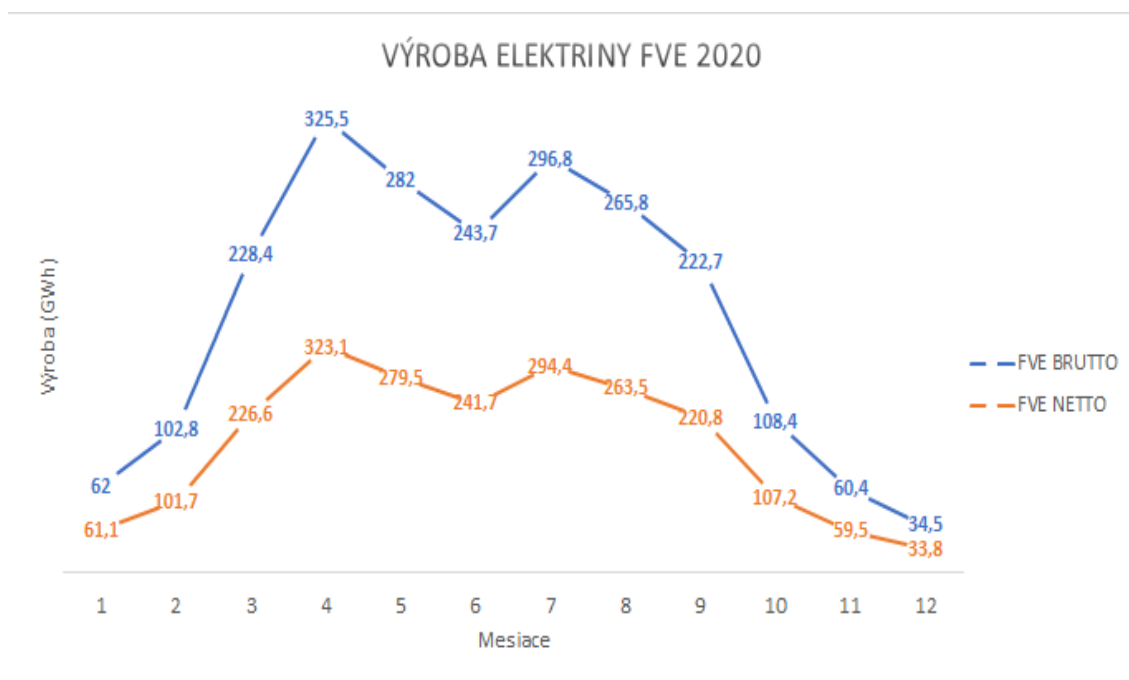
Celkový inštalovaný výkon z FVE a VTE elektrární sa rovná

$$C_{výkon} = FVE_{výkon} + VTE_{výkon} = 2054 + 339,4 = 2393,4 \text{ MW} \quad (2.2)$$

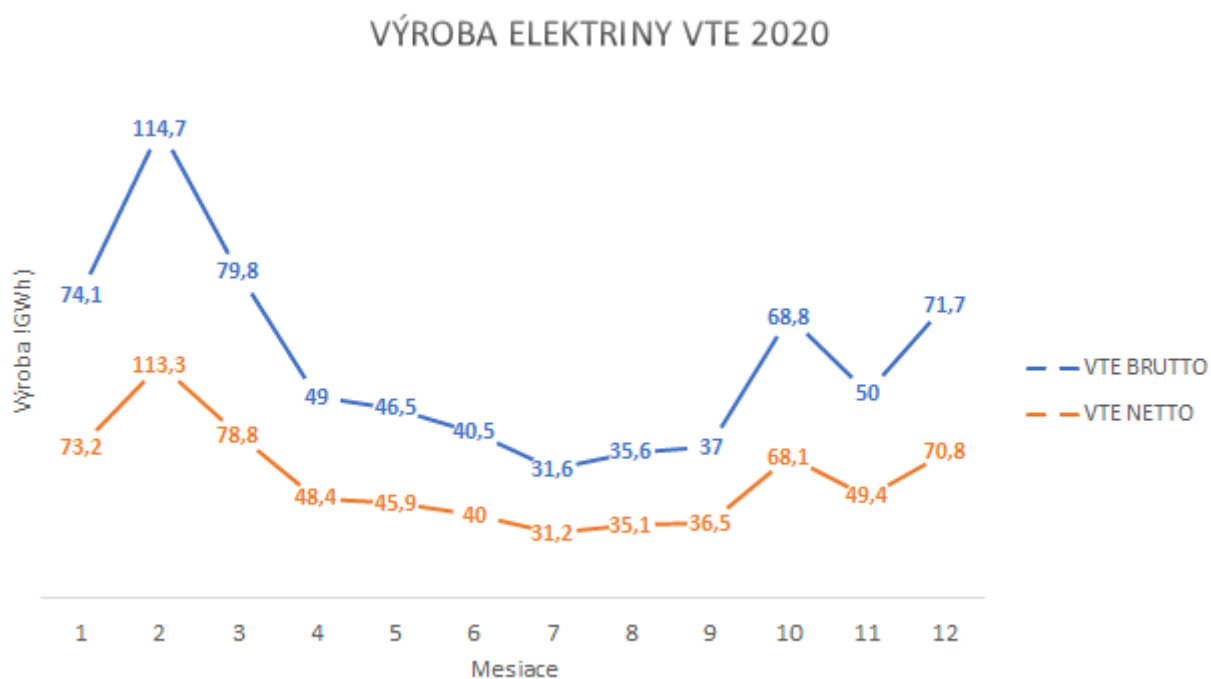
je možné vidieť že celkový inštalovaný výkon v ČR v roku 2020 bol vyše 2 GW.

V grafoch 2.8 a 2.9 je vidieť brutto a netto produkcia elektrickej energie. Rozdiel medzi brutto a netto je taký, že brutto sa rovná celkovej vyprodukovanej energii z elektrárne, kým netto sa rovná brutto zmenšené o vlastnú spotrebu energie elektrárňou.[50]

Celková vyprodukovaná energia z FVE a VTE (P_{real}) za daný rok sa rovná 388710,2 MWh. Teoretický výkon s maximálnym využitím inštalovaného výkonu je vypočítaný v rovnici 2.3.



Obr. 2.8: Brutto a Netto produkcia energie FVE [48]



Obr. 2.9: Brutto a Netto produkcia energie VTE [48]

$$P_{teo} = C_{výkon} \times 8760 = 20966184 \text{ MWh} \quad (2.3)$$

2.5.1 Energetický prebytok

Ako energetický prebytok bude použitá NETTO produkcia energie zo súčtu VTE a FVE elektrární v ČR. Konkrétne 5 % z tejto hodnoty.

$$P_{CEL} = P_{real} \times 0,05 = 19435,51 \text{ MWh} \quad (2.4)$$

$$\frac{19435,51}{8760} = 2,2 \text{ MW} \quad (2.5)$$

Rovnica 2.4 ukazuje teoretický energetický prebytok za rok, nasledovne bola hodnota prepočítaná na prebytok za hodinu v rovnici 2.5. Dôvod pre tento spôsob stanovenia energetického prebytku je charakter FVE a VTE dovoľujúci okamžité vypnutie produkcie energie, ak po nej v aktuálnom čase nie je dopyt.

Toto sa líši od iných neobnoviteľných zdrojov, kde vypnutie prevádzky je oveľa náročnejšie a nie úplne okamžité. Tak isto elektrárne, ktoré používajú fosílnu palivá väčšinou slúžia pre pokrytie väčšiny dopytu po elektrickej energii, a preto ich prevádzka sa zastavuje iba z vážnych technických príčin alebo z dôvodu opráv.

2.5.2 Elektrolýza

Energetický prebytok z rovnice 2.5 teraz využijeme ako vstup do elektrolyzérovo zmienených v predošlej kapitole.

$$J_e = \frac{P_{CEL}}{P_{maxelektrolyzér}} \quad (2.6)$$

$$V_{H_2} = J_e \times H_{2jednotky} \quad (2.7)$$

V rovniciach 2.6 a 2.7 je možné vidieť vzorce, ktoré budú použité pre výpočet použitých jednotiek a maximálnej produkcie vodíka. Pre prehľadnosť budú všetky výsledky zapísané v nasledujúcich tabuľkách.

Tab. 2.10: ITM Power produkčné parametre [43]

Model	Počet jednotiek	Produkcia H_2 ($Nm^3.h^{-1}$)
HGAS1SP	3,1	16,2
HGAS3SP	0,9	15,8
HGAS2SP	1,6	16,3
HGASXMW	0,2	414,5

Tab. 2.11: McPhy Energy SA produkčné parametre [44]

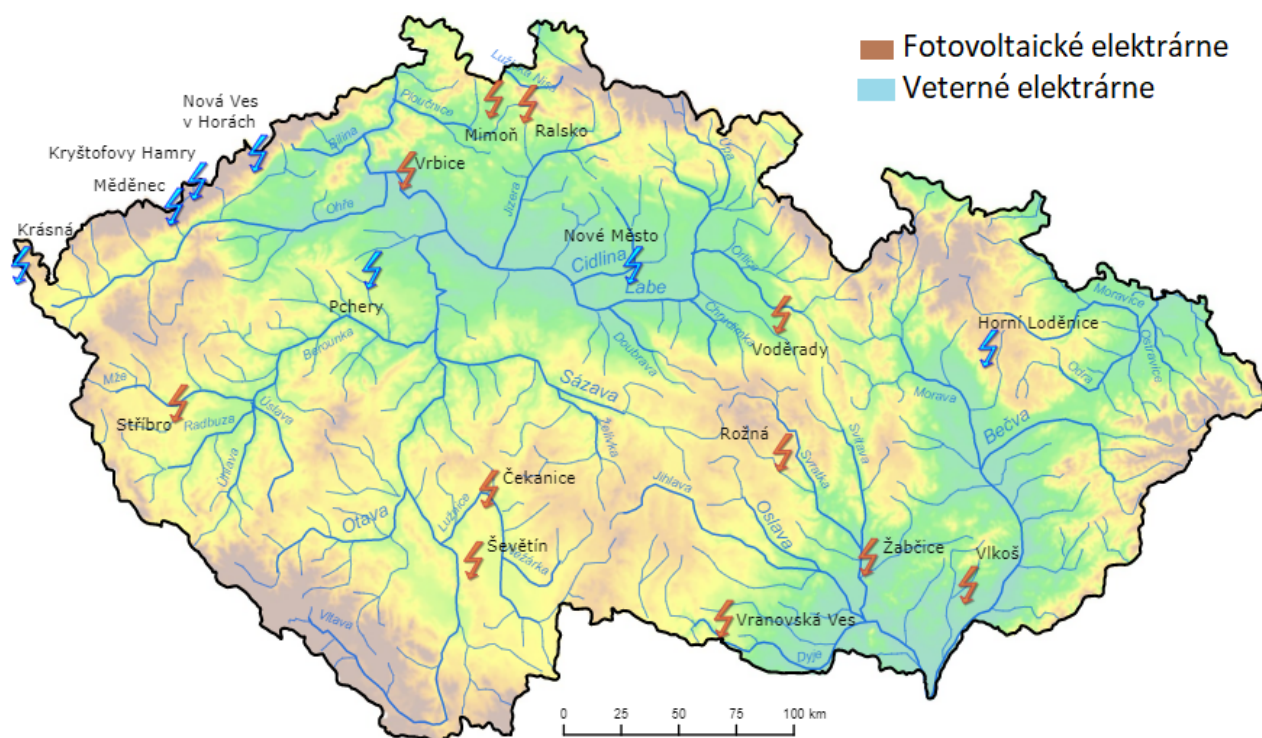
Model	počet jednotiek	produkcia H_2 ($Nm^3 \cdot h^{-1}$)
Baby	733,3	293,3
P	244,4-366,7	366,7-589,7
M	36,7-122,2	366,7-1222,2
McLyzer 800 - 30	0,6	440,0

Tab. 2.12: Siemens AG produkčné parametre [45]

Model	počet jednotiek	produkcia H_2 ($Nm^3 \cdot h^{-1}$)
Sylizer 300	$\leq 0,2$	224,8 - 4496,9

Tab. 2.13: Nel ASA produkčné parametre[46]

Model	počet jednotiek	produkcia H_2 ($Nm^3 \cdot h^{-1}$)
MC 250	1,8	432,9
MC 500	0,9	432,9



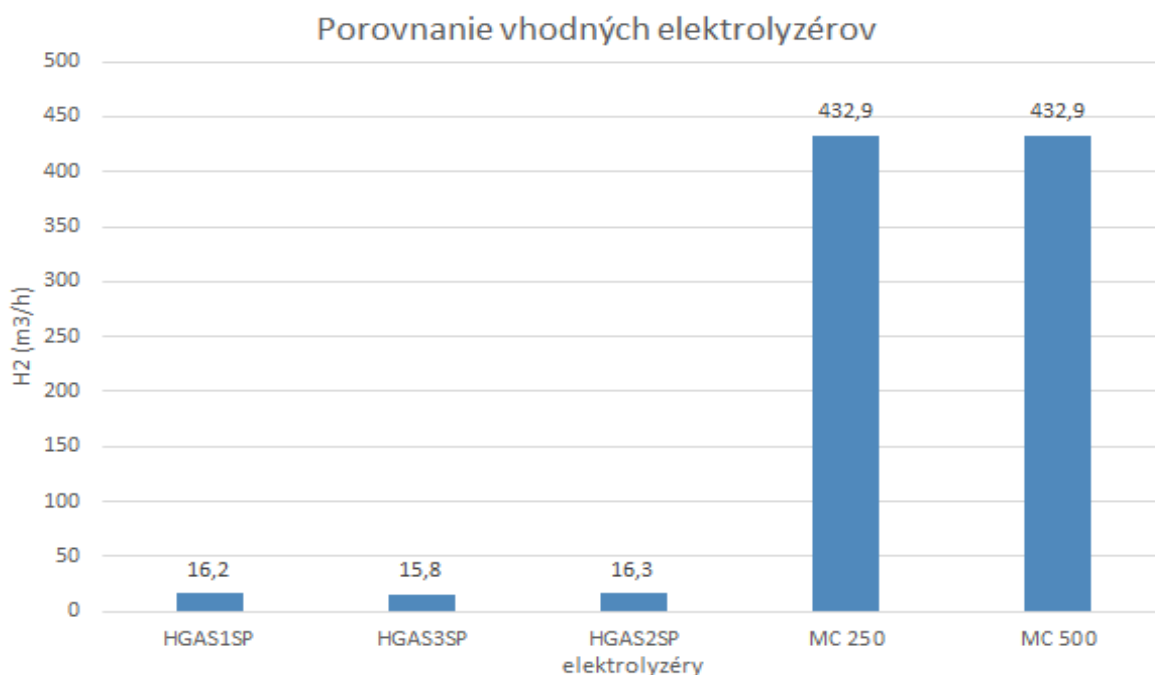
Obr. 2.10: Mapa FVE a VTE elektrární v ČR [49]

Z tabuliek 2.10 - 2.13 je zreteľné, že mnohé z daných elektrolyzéroov sú až prehnane výkonné na daný modelový príklad. Na druhej strane, elektrolyzéry ako Baby, P a

M od ITM Power nedisponujú dostatočným výkonom a počet jednotiek potrebný na plné využitie energetického prebytku je príliš početný.

Z tabuliek je možné vidieť, že elektrolyzéry s vyhovujúcim počtom jednotiek sú elektrolyzéry HGAS1SP, HGAS3SP, HGAS2SP od firmy ITM Power a elektrolyzéry MC 250 a MC 500 od firmy Nel ASA.

Z grafu 2.11 je možné odčítať, že elektrolyzéry od firmy Nel ASA ponúkajú väčšiu produkciu vodíka ako ostatné porovnávané elektrolyzéry. Najoptimálnejší elektrolyzér pre dané účely je MC 250, a to z dôvodu rozloženia obnoviteľných zdrojov na území Českej republiky, ako je možné vidieť v obrázku 2.10. Optimálnym riešením je možnosť dvoch alebo viacerých elektrolyzérnych staníc lokalizovaných v, čo najmenšej vzdialenosti od týchto zdrojov. Pri zvolení elektrolyzéra MC 250 by sa produkcia



Obr. 2.11: Porovnanie vhodných elektrolyzérov

H_2 pohybovala okolo $3792204 Nm^3$ za rok bez ohľadu na poveternostné a meteorologické podmienky na území ČR. Produkcia by bola taktiež znížená o straty v sieti.

2.6 Zásobovanie vody

Z dát od výrobcu elektrolyzéra je známa spotreba modelu MC 250 $221 l.h^{-1}$ deionizovanej vody pri maximálnej produkcii. To by sa rovnalo 3871920 litrov alebo približne $3871,92 m^3$ deionizovanej vody pri stálej prevádzke. Skutočná spotreba vody by bola nižšia z dôvodu nestálej prevádzky, keď energia nie je dodávaná.

2.7 Skladovanie

Pre skladovaciú časť je optimálne skladovanie v tlakových nádobách, keďže výstupný tlak je 30 bar. Ak by bolo požadované skladovať pomocou skvapalňovania je nutné schladenie na teplotu 21,2 K, tak isto ako izolácia skladovacích nádrží. Ďalej pri kvapalnom skladovaní by sa museli zobrať do úvahy straty spôsobené odparom vodíka. Tieto straty sú približne 0,4 % za deň pre skladovacie nádoby o objeme 50 m^3 , 0,2 % pre skladovacie nádoby o objeme 100 m^3 a 0,06 % pre nádoby o objeme 20000 m^3 .

Materiály, ktoré sú vhodné pre vysokotlakové skladovanie musia spĺňať niekoľko kritérií.

- Vysoká pevnosť v ťahu
- Nízka hustota
- Nesmie reagovať s vodíkom
- Vodík do materiálu nedifuzuje

Používajú sa prevažne austenitycké nerezové ocele, medené a hliníkové zliatiny. [31]

Z dôvodu udržania, čo najväčšej účinnosti celej stanice je táto metóda neideálna. Pre dosiahnutie vyšších tlakov pre skladovanie môže byť použitý kompresor.

2.8 Spätná premena

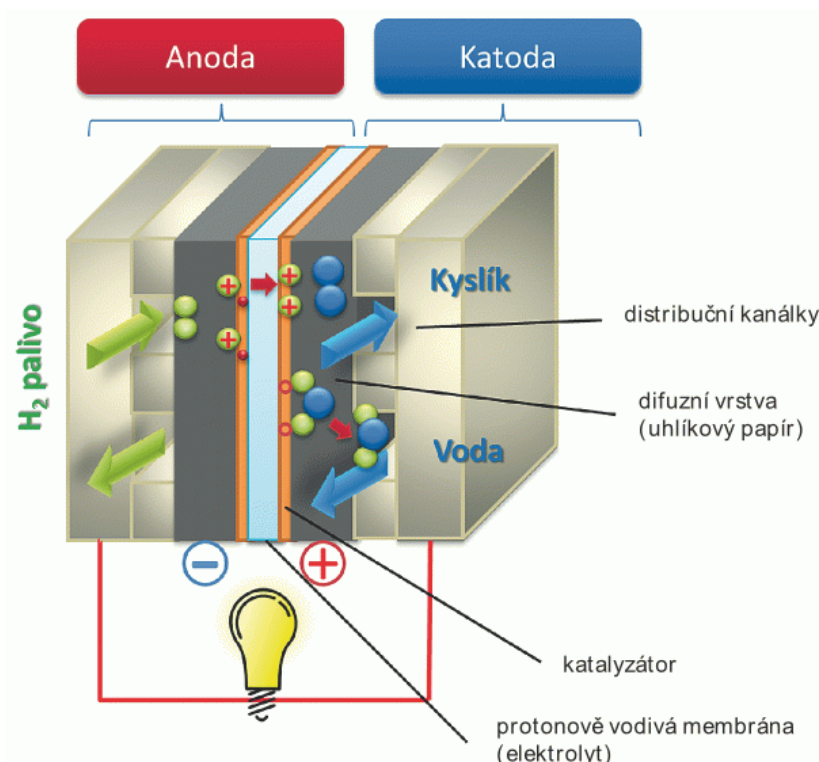
Po uskladnení vodíka je dôležité jeho spätné použitie. Vodík môže byť skladovaný a v jeho plynnej podobe zásobovaný pre dopravné účely v automobilovom priemysle, leteckej alebo vlakovej doprave.

Taktiež sa uvažuje aj o spaľovaní vodíka v motoroch za účelom premeny chemickej energie na mechanickú. Palivové články slúžia pre premenu chemickej energie paliva na energiu elektrickú. Účinnosť palivových článkov sa typicky pohybuje okolo päťdesiatich percent, ale nové technológie a materiály túto účinnosť zvyšujú. [52]

PEM elektrolyzéry spotrebujú zhruba $0,8 \text{ Nm}^3$ vodíku na produkciu 1kW energie. [53]



Obr. 2.12: vodíkové lietadlo Airbus [51]



Obr. 2.13: Palivový článok [54]

Dôvody pre použitie PEM elektrolyzéra namiesto SOEC alebo alkalických elektrolyzérov sú kompaktnosť, jeho zapoužívanosť a rýchla odozva, ktorá je potrebná

pre rýchle spustenie vybíjania akumuláčnej stanice.

Prevod vodíka na elektrickú energiu sa získa vydelením vyprodukovaného množstva vodíka spotrebou elektrolyzéra. Týmto sa vypočíta vyprodukovaný elektrický výkon. Viac rovnica 2.8.

$$E_{H_2} = \frac{H_2}{0,8} = \frac{1149662,7}{0,8} = 4,74 \text{ MWh} \quad (2.8)$$

Pri vydelení vstupného výkonu z rovnice 2.4 a výkonu získaného pomocou palivového článku z rovnice 2.8 je získaná účinnosť akumuláčného celku.

$$\eta_{H_2} = \frac{E_{H_2}}{P_{CEL}} \times 100 = \frac{4740255000}{19435510000} \times 100 = 24,39 \text{ \%} \quad (2.9)$$

Z výsledku možno vidieť, že celková účinnosť akumuláčného procesu spolu s premenou chemickej energie späť na elektrickú je 24,39 %.

Diskusia

Energetický prebytok bol stanovený ako 5 % časť celkovej NETTO produkcie solárnych a veterných elektrární za rok 2020. Prebytok bol stanovený touto metódou z dôvodu charakteru výroby energie z obnoviteľných zdrojov.

Tento prebytok bol následne použitý ako vstup do elektrolyznej stanice. Z parametrov od výrobcov sa stanovil najoptimálnejší elektrolyzér pre stanovený model.

Po určení elektrolyzéra sa následne stanovili ostatné parametre ako spotreba vody a produkcia vodíka.

Celková účinnosť akumulačnej stanice sa určila ako podiel dodanej elektrickej energie ku vyprodukovanej elektrickej energii, z elektrolyzéra po spätnej premene energie z vodíka.

Výsledná účinnosť akumulačnej stanice je teoretická a v reálnej prevádzke bude menšia, a to z dôvodu nezapočítania strát. Straty sa môžu predpokladať počas akumulácie vodíka a ďalšie pre nestálu prevádzku obnoviteľných zdrojov z dôvodu závislosti na meteorologických podmienkach.

Záver

Prvá časť bakalárskej práce je zameraná na rozličné spôsoby akumulácie energie od olovnatých akumulátorov po rozličné spôsoby akumulácie pomocou vodíkových technológií a možnosti ich skladovania.

V ďalšej časti sa práca zaoberá návrhom samotnej akumuláčnej stanice, ktorá sa skladá zo zdroju elektrickej energie, elektrolyzéra, kompresoru, skladovacej časti pre vodík a vodu a nakoniec spätná premena vodíka na požadovanú formu energie. Za zdroj energetických prebytkov považujeme 5 % z celkovej energie vyprodukovanej z fotovoltaiických a veterných elektrární na území Českej republiky. V práci sú tak isto jednotlivo popísané časti akumuláčnej stanice. Pre výber elektrolyzéra boli porovnané jednotlivé modely od rozličných firiem. Prevádzkové parametre elektrolyzérov sú následne vložené do tabuliek.

V poslednej časti nazvanej modelový výpočet sa za pomoci vyprodukovanej elektrickej energie vypočíta energetický prebytok, ktorý sa použije ako vstupný parameter do elektrolyzéra. Všetky elektrolyzéry sú porovnané na základe vstupnej elektrickej energie. Podielom prebytku a požadovaného výkonu pre rozličné elektrolyzéry sa získa počet jednotiek potrebný pre maximálne využitie daného prebytku. Zvoleným bol elektrolyzér MC 250 kvôli jeho produkcii vodíka a počtu jednotiek potrebných pre spotrebovanie energie. Rozhodlo sa pre dve jednotky elektrolyzérov kvôli možnému postaveniu na dvoch rozličných miestach v Českej republike, optimálne v blízkosti zdrojov elektrickej energie.

Na záver sa vyprodukovaný vodík premieňa spätne na elektrickú energiu a to z dôvodu výpočtu celkovej teoretickej účinnosti akumuláčnej stanice. Samozrejme vodík nemusí byť spätne premenený na elektrickú energiu, ale naďalej skladovaný na využitie v dopravnom alebo inom priemysle. Celková teoretická účinnosť bola stanovená ako 24,39 %. Táto hodnota je väčšia ako v reálnej prevádzke z dôvodu strát v skladovaní, v preprave a z dôvodu meteorologických podmienok na území Česka.

Literatúra

- [1] JANCO, Marcel. Čo je to a ako funguje klasický olovený akumulátor. *Autorubik* [online]. 2010, 20.12.2010, **2010**(1), 1 [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <http://www.autorubik.sk/clanky/co-je-to-a-ako-funguje-akumulator/>
- [2] Energostat. <https://oenergetice.cz/> [online]. Třebíč: ČTK, 2021, 11.4.2020 [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/energostat>
- [3] DLOUHÝ, Petr a Janík JANÍK. VYUŽITÍ VODÍKU: Účinnost. *HYTEP* [online]. 20.07.2007, **2007**, 1 [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/vyuziti-vodiku/637-ucinnost>
- [4] DE LA CRUZ, Gary. Introduction to Car Batteries. In: *Vehicle-maintenanceandrepairs.com* [online]. Cape Town: Vehicle Maintenance And Repairs, 2017, 27.04.2017 [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <https://www.vehiclemaintenanceandrepairs.com/car-battery-facts-101/>
- [5] MAREČEK, Aleš a Jaroslav HONZA. *Chemie pro čtyřletá gymnázia*. 2. díl. Brno: DaTaPrintBrno, 1996. ISBN 80-902200-4-5.
- [6] DINGMAN, SHANE. GREAT CANADIAN INNOVATIONS: How a Canadian engineer fuelled the battery industry. *The globe and mail* [online]. 2017, **2017**(1), 1 [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <https://www.theglobeandmail.com/news/national/canada-150/how-a-canadian-engineer-revolutionized-the-battery-industry/article33465448/>
- [7] MAHLIA, T.M.I., T.J. SAKTISAH DAN, A. JANNIFAR, M.H. HASAN a H.S.C. MATSEELAR. A review of available methods and development on energy storage: Renewable and Sustainable Energy Reviews. *Technology update* [online]. 2014, **2014**(33), 532-545 [cit. 2021-04-11]. ISSN ISSN 1364-0321. Dostupné z: doi:technology update, Volume 33, 2014, , ISSN 1364-0321,
- [8] HUGGINS, Robert A. *Energy storage: fundamentals, materials and applications* [online]. Second edition. Cham: Springer, [2016] [cit. 2021-04-11]. ISBN 978-3-319-21239-5.
- [9] MAGDOLEN, Luboš a Michal MASARYK. *Rotačný elektrodynamický stroj, najmä zotrvačnickový motorgenerátor na akumuláciu elektrickej energie*.
- [10] COMPRESSED AIR ENERGY STORAGE (CAES). In: <https://www.oilfree-air.eu/> [online]. Eelderwolde: RTC Group B.V., b.r. [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://www.oilfree-air.eu/compressed-air-energy-storage-caes/>

- [11] CHEN, Haisheng, Thang Ngoc CONG, Wei YANG, Chunqing TAN, Yongliang LI a Yulong DING. Progress in electrical energy storage system: A critical review. *Progress in Natural Science* [online]. 2009, **19**(3), 291-312 [cit. 2021-04-12]. ISSN 10020071. Dostupné z: doi:10.1016/j.pnsc.2008.07.014
- [12] ÖSTERGÅRD, Rickard. *Flywheel energy storage* [online]. Uppsala, 2011 [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:476114/FULLTEXT01.pdf>. Diplomová práce. Uppsala universitet. Vedoucí práce Frans Dijkhuizen.
- [13] COMPRESSED AIR ENERGY STORAGE (CAES). *ESA* [online]. b.r., **b.r.**(1), 1 [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://energystorage.org/why-energy-storage/technologies/compressed-air-energy-storage-caes/>
- [14] ČIERNY VÁH. *Seas* [online]. Bratislava: Slovenské elektrárne, b.r. [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://www.seas.sk/pve-cierny-vah>
- [15] FUNK, Jeffrey. Superconducting materials becoming economically feasible for energy applications. In: *Slideshare.net* [online]. 2013 [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/Funk98/mt5009-superconducting-materials-presentation-1106>
- [16] *SUPRAVODIVÝ INDUKČNÍ AKUMULÁTOR* [online]. In: . Praha: Simopt, 1999, s. 1 [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/vykladovy-slovník-energetiky/hesla/supravod_ind_ak.html
- [17] Hydrogen Production: Electrolysis. In: *Energy.gov* [online]. Washington: U.S. Department of energy, b.r. [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-electrolysis>
- [18] *Elektrolýza* [online]. Třebíč: Creative Commons, b.r. [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: <http://e-chembook.eu/elektrolyza>
- [19] GALLANDAT, Noris, Krzysztof ROMANOWICZ a Andreas ZÜTTEL. An Analytical Model for the Electrolyser Performance Derived from Materials Parameters. *Journal of Power and Energy Engineering* [online]. 2017, **05**(10), 34-49 [cit. 2021-04-15]. ISSN 2327-588X. Dostupné z: doi:10.4236/jpee.2017.510003
- [20] *Wind Resource: Utilising Hydrogen Buffering: Electrolyser* [online]. Glasgow: University of Strathclyde Glasgow, b.r. [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: http://www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web_sites/08-09/Hydrogen_Buffering/Website%20Electrolyser.html

- [21] KAMARODDIN, Mohd Fadhzir Ahmad, Nordin SABLI a Tuan Amran Tuan ABDULLAH. Hydrogen Production by Membrane Water Splitting Technologies. *Advances In Hydrogen Generation Technologies* [online]. In-Tech, 2018, 2018-08-22 [cit. 2021-04-17]. ISBN 978-1-78923-534-0. Dostupné z: doi:10.5772/intechopen.76727
- [22] , Davidlfrizt. Schematic of the basic operating principle of a polymer electrolyte membrane electrolysis cell. In: *Https://commons.wikimedia.org* [online]. San Francisco: Wikimedia Commons, 2013 [cit. 2021-04-17]. Dostupné z: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/26/PEMelectrolysis.jpg>
- [23] *ELECTROLYSIS: PEM electrolysis* [online]. Columbus: Nel Hydrogen, b.r. [cit. 2021-04-17]. Dostupné z: <https://www.cummins.com/new-power/applications/about-hydrogen/electrolysis>
- [24] KEÇEBAŞ, Ali, Muhammet KAYFECI a Mutlucan BAYAT, CALISE, Francesco, Massimo Dentice D-ACCADIA, Massimo SANTARELLI, Andrea LANZINI a Domenico FERRERO, ed. Solar Hydrogen Production. *Solar Hydrogen Production: Chapter 9 - Electrochemical hydrogen generation* [online]. 1. Karabük: Academic Press, 2019, s. 299-317 [cit. 2021-04-17]. ISBN 978-0-12-814853-2. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128148532000096>
- [25] ZORICA, Siniša, Ivan ZULIM a Marko VUKSIC. *Evaluation of DC-DC Resonant Converters for Solar Hydrogen Production Based on Load Current Characteristics* [online]. 2014,4[cit.2021-04-17]. Dostupné z:<https://www.researchgate.net/publication/263470190> Evaluation of DC-DC Resonant Converters for Solar Hydrogen Production Based on Load Current Characteristics
- [26] NIKOLAIDIS, Pavlos a Andreas POULLIKKAS. A comparative overview of hydrogen production processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2017, **67**, 597-611 [cit. 2021-04-17]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2016.09.044
- [27] HIRAYAMA, Naoki, Hiroko NAKATA, Haruki WAKAYAMA, et al. Solar-Driven Photoelectrochemical Water Oxidation over an n-Type Lead—Titanium Oxyfluoride Anode. *Journal of the American Chemical Society* [online]. 2019, **141**(43), 17158-17165 [cit. 2021-04-17]. ISSN 0002-7863. Dostupné z: doi:10.1021/jacs.9b06570

- [28] DINCER, Ibrahim a Canan ACAR. Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2015, **40**(34), 11094-11111 [cit. 2021-5-3]. ISSN 03603199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2014.12.035
- [29] HOLLADAY, J.D., J. HU, D.L. KING a Y. WANG. An overview of hydrogen production technologies. *Catalysis Today* [online]. 2009, **139**(4), 244-260 [cit. 2021-5-3]. ISSN 09205861. Dostupné z: doi:10.1016/j.cattod.2008.08.039
- [30] Hydrogen Production: Thermochemical Water Splitting. *Energy.gov* [online]. Washington: U.S. Department of energy, b.r., b.r. [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/index.php/eere/fuelcells/hydrogen-production-thermochemical-water-splitting>
- [31] ZüTTEL, Andreas. Hydrogen storage methods. *Naturwissenschaften* [online]. 2004, **91**(4), 157-172 [cit. 2021-04-18]. ISSN 0028-1042. Dostupné z: doi:10.1007/s00114-004-0516-x
- [32] VON HELMOLT, Rittmar a Ulrich EBERLE. Fuel cell vehicles: Status 2007. *Journal of Power Sources* [online]. 2007, **165**(2), 833-843 [cit. 2021-5-3]. ISSN 03787753. Dostupné z: doi:10.1016/j.jpowsour.2006.12.073
- [33] Joules units breakdown. *LINE* [online]. Tokyo: LINE.17QQ.COM, b.r. [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: https://line.17qq.com/articles/ebhjdfgbz_p3.html
- [34] WOOD, P. Hydrogen Basics - Liquid Storage. *Fsec.ucf.edu* [online]. Cocoa: University of Central Florida, b.r. [cit. 2021-5-4]. Dostupné z: <http://www.fsec.ucf.edu/en/consumer/hydrogen/basics/storage-liquid.htm>
- [35] *Hydrogen Storage* [online]. Washington, DC: U.S. Department of Energy, b.r. [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage>
- [36] Co je to vodíkový kompresor? In: <https://www.netinbag.com/> [online]. Hongkong: NetinBag, b.r. [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://www.netinbag.com/cs/manufacturing/what-is-a-hydrogen-compressor.html>
- [37] ARFALK, ERIK. *How it Works: Piston Compressor* [online]. In: . Rock Hill: Atlas Copco Compressors, 2014, 2014, s. 1 [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://www.thecompressedairblog.com/how-it-works-piston-compressor>

- [38] *Ako funguje piestový kompresor? charakteristika piestového kompresora* [online]. Chynorany: COMPRESSED GAS, b.r. [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://www.kompresory-servis.sk/n/ako-funguje-piestovy-kompresor>
- [39] Reciprocating Compressors. In: *Instrumentationtools.com* [online]. Kakinada: Inst Tools, b.r. [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://instrumentationtools.com/reciprocating-compressors/>
- [40] Kompresor pneumatický membránový. In: *Encyklopediapoznania.sk* [online]. Bratislava: Wesline, b.r. [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://encyklopediapoznania.sk/clanok/7439/kompresor-pneumaticky-membranovy>
- [41] KOLARČÍK, Doc. Ing. KAMIL, CSc. Prof. Ing. JAROSLAV KAMINSKÝ a CSc. Doc. Ing. MOJMÍR VRTEK, PH.D. *INOVACE ODBORNÉHO VZDĚLÁVÁNÍ NA STŘEDNÍCH ŠKOLÁCH ZAMĚŘENÉ NA VYUŽÍVÁNÍ ENERGETICKÝCH ZDROJŮ PRO 21. STOLETÍ A NA JEJICH DOPAD NA ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ: KOMPRESORY* [online]. Ostrava, 2012 [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: https://kke.zcu.cz/export/sites/kke/about/projekty/enazp/projekty/01_Stavba-a-provoz-stroju_1-3/1_IUT/002_Kompresory—Kolarcik-a-kol—P3.pdf. Skriptum. Vysoká škola báňská — Technická univerzita Ostrava.
- [42] Kompresný pomer. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: https://sk.wikipedia.org/wiki/Kompresn%C3%BD_pomer
- [43] *ITM Power* [online]. Sheffield: ITM Powe, 2021 [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: <https://www.itm-power.com/>
- [44] *McPhy Energy* [online]. LA MOTTE FANJAS: McPhy Energy, 2021 [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: <https://mcphy.com/en>
- [45] *Siemens Energy* [online]. Mníchov: Siemens Energy, 2021 [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: <https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/renewable-energy/hydrogen-solutions.html>
- [46] *Nelhydrogen* [online]. Oslo: Nel, 2021 [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: <https://nelhydrogen.com/>
- [47] *Destilovaná voda* [online]. Vlčany: AQUAVIT Lab-Water, b.r. [cit. 2021-4-27]. Dostupné z: <https://www.destilator-vody.cz/destilovana-voda/>

- [48] *Zprávy o provozu elektrizační soustavy Cenová rozhodnutí Sdělení Statistika a sledování kvality Zprávy o provozu elektrizační soustavy Zprávy o kvalitě Vykazování Kontakty Konzultační procesy Regulační výkaznictví Metodika regulace Rámcové pokyny a Síťové kodexy Infrastruktura Pro spotřebitele |Často kladené dotazy |Změna dodavatele |Kalkulátory |Mimosoudní řešení sporů Více informací Zprávy o provozu elektrizační soustavy* [online]. Jihlava: Energetický regulační úřad, 2020 [cit. 2021-4-27]. Dostupné z: http://www.eru.cz/documents/10540/6616306/Ctvrtletni_zprava_2020_IV_Q.pdf/ef32acbe-8093-4abd-a2cc-43ae3470bf96
- [49] HÁJKOVÁ, Mgr. Bc. Mariana a RNDr. Hana SVOBODOVÁ, PH.D. Energetika. *Is.muni.cz/* [online]. Brno: Masarykova univerzita, 2017, 2017 [cit. 2021-4-27]. Dostupné z: https://is.muni.cz/do/rect/el/estud/pdf/js17/cesko_atlas/web/pages/06-energetika.html
- [50] *Metodika - průmysl, energetika* [online]. Praha: Český statistický úřad, 2021 [cit. 2021-4-27]. Dostupné z: https://www.czso.cz/csu/xs/metodika_prumysl
- [51] Airbus reveals new zero-emission concept aircraft: A “blended-wing body” design. *Airbus.com* [online]. Leiden: AIRBUS, 2020, 2020 [cit. 2021-4-28]. Dostupné z: <https://www.airbus.com/newsroom/press-releases/en/2020/09/airbus-reveals-new-zeroemission-concept-aircraft.html>
- [52] *FUEL CELL TECHNOLOGIES OFFICE* [online]. In: . Washington: U.S. Department of energy, 2015 [cit. 2021-4-28]. Dostupné z: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/11/f27/fcto_fuel_cells_fact_sheet.pdf
- [53] Fuel Cell. *Energies.airliquide* [online]. Paris: Air Liquide, b.r. [cit. 2021-4-28]. Dostupné z: <https://energies.airliquide.com/resources-planet-hydrogen/fuel-cell>
- [54] *Vesmír* [online]. 2013. VESMÍR, 2013 [cit. 2021-4-28]. ISSN 1214-4029.

Zoznam jednotiek

h	Planckova konštanta	J.s
ν	Frekvencia	Hz
d_w	Hrúbka steny	m
d_o	Vonkajší priemer steny	m
Δp	Tlakový rozdiel	Pa
σ	Pevnosť materiálu v ťahu	MPa
ΔH	Teoretická práca potrebná pre stlačenie plynu	W.h/kg
R	Plynová konštanta	J/K.mol
T	Absolútna teplota	°C
p	Konečný tlak	Pa
p_0	Počiatkový tlak	Pa
S_{ml}	Minimálny povrch absorbéru	m^2/mol
N_A	Avangardova konštanta	$1/mol$
ρ_{liq}	Hustota kvapaliny	kg/m^3
M_{ads}	Hmotnosť absorbéru	kg
S_{spec}	Špecifická plocha absorbéru	m^2/g
m_{ads}	Množstvo absorbovaného vodíka	hmot%
ξ	Kompresový pomer	-
V_k	Objem kompresného priestoru	m^3
V_z	Zdvihový objem	m^3
$C_{výkon}$	Celkový výkon	W
$FVE_{výkon}$	Inštalovaný výkon fotovoltaických elektrární	W
$VTE_{výkon}$	Inštalovaný výkon veterných elektrární	W
P_{real}	Celková vyprodukovaná elektrická energia za rok	W
P_{teo}	Teoretický výkon	Wh
P_{CEL}	Energetický prebytok	Wh
J_e	Počet potrebných elektrolyzerových jednotiek	-
$P_{maxelektrolyzér}$	Maximálny výkon elektrolyzéro	Wh
V_{H_2}	Množstvo vyprodukovaného vodíku	Nm^3/h
$H_{2jednotky}$	Produkcia vodíka pre daný elektrolyzér	Nm^3/h
E_{H_2}	Elektrický výkon vyproduovaný elektrolyzéro	Wh
η_{H_2}	Teoretická účinnosť akumuláčnej stanice	%

Zoznam obrázkov

1.1	Graf podielu výroby elektrickej energie zo všetkých zdrojov elektrickej energie. [2]	15
1.2	Olovená autobatéria [4]	16
1.3	Jednotlivé časti alkalickéj batérie [6]	17
1.4	Zotrvačnickový systém pre akumuláciu energie: (1) prvý rotor, (2) protibežný rotor, (3) stator, (4) zberač, (5) magnetické ložiská, (6) vonkajšie teleso [9]	18
1.5	Zjednodušená ukážka tlakovzdušnej akumuláčnej elektrárne, [10]	18
1.6	Spodná nádrž prečerpávacej vodnej elektrárne Čierny Váh, SR, [14]	19
1.7	Nákres supravodivého akumulátora [15]	20
1.8	Elektrolýza vody, [17]	21
1.9	Princíp alkalického elektrolyzéra [21]	22
1.10	PEM elektrolyzér [22]	23
1.11	Štiepenie vody pomocou solárnej energie [27]	25
1.12	Termochemické štiepenie vody [30]	26
1.13	Diagram znázorňuje fázy vodíka v závislosti na teplote a tlaku [31]	27
1.14	Kompozitná tlaková nádoba na skladovanie vodíka: Vonkajšia ochranná vrstva odolná voči nárazom (1), penová kupola odolná voči nárazom (4), Výstup plynu (8), integrovaný regulátor tlaku (5), uhlíková kompozitná vrstva pre mechanickú odolnosť (2), polymér s veľkou hustotou pre zabránenie difuzivity plynu (3), ventilový systém (7), bezpečnostný ventil (6) [32]	28
1.15	Joule - Thomson cyklus [33]	29
1.16	Nádrž na skvapalnený vodík v NASA KSC [34]	30
2.1	Blokové schéma akumuláčnej stanice	33
2.2	Piestový kompresor [39]	35
2.3	Prierez membránovým kompresorom [40]	36
2.4	HGasXMW [43]	38
2.5	McLyzer 800-30 [44]	39
2.6	sylizer300 [45]	40
2.7	Elektrolyzér serie M (12.2 m x 2.5 m x 3 m) [46]	41
2.8	Brutto a Netto produkcia energie FVE [48]	43
2.9	Brutto a Netto produkcia energie VTE [48]	43
2.10	Mapa FVE a VTE elektrární v ČR [49]	45
2.11	Porovnanie vhodných elektrolyzérov	46
2.12	vodíkové lietadlo Airbus [51]	48
2.13	Palivový článok [54]	48

Zoznam tabuliek

1.1	Parametre prečerpávacej elektrárne Čierny Váh [14]	20
1.2	Prevádzkové parametre elektrolyzéroov [19]	22
1.3	Výhody a nevýhody rozličných typov elektrolyzéroov [24] [25]	24
1.4	Spôsobu skladovania vodíka	27
2.1	Skladovacie spôsoby [31]	37
2.2	Ponuka elektrolyzéroov ITM Power [43]	38
2.3	Elektrolyzéry McPhy Energy SA [44]	38
2.4	McLyzer 100 - 30 [44]	39
2.5	Parametre McLyzer 800-30 [44]	39
2.6	Modul elektrolyzéroov Sylezer 300 [45]	40
2.7	M séria elektrolyzéroov [46]	40
2.8	Inštalovaný výkon FVE elektrární [48]	42
2.9	Inštalovaný výkon VTE elektrární [48]	42
2.10	ITM Power produkčné parametre [43]	44
2.11	McPhy Energy SA produkčné parametre [44]	45
2.12	Siemens AG produkčné parametre [45]	45
2.13	Nel ASA produkčné parametre [46]	45

