

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

2021

**JIŘÍ
BURDA**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Burda** Jméno: **Jiří** Osobní číslo: **478002**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav energetiky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Využití chemických přeměn v rámci akumulace elektrické energie v souvislosti s provozem obnovitelných zdrojů energie

Název bakalářské práce anglicky:

Use of chemical transformations in the accumulation of electricity in connection with the operation of renewable energy sources

Pokyny pro vypracování:

Práce se bude věnovat problematice akumulace elektrické energie jako prostředku pro potlačení negativního vlivu kolísavého výkonu obnovitelných zdrojů energie na rozvodnou soustavu. Úvodní část práce bude obsahovat stručnou rešerši základních způsobů akumulace přebytků energie. Stěžejní část bude zaměřena zejména na využití chemických a elektrochemických reakcí jako je například výroba vodíku. Dále pak na další možnosti využití vyrobeného vodíku a problematiku spojenou s jeho skladováním. Závěrečná část práce bude věnována problematice vývoje nového zařízení na výrobu vodíku z přebytků elektrické energie.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Václav Železný, ústav energetiky FS

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

Datum zadání bakalářské práce: **23.04.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **04.06.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2022**

Ing. Václav Železný
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
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

Anotační list

Jméno autora:	Jiří Burda
Název BP:	Využití chemických přeměn v rámci akumulace elektrické energie v souvislosti s provozem obnovitelných zdrojů energie
Anglický název:	Use of chemical transformations in the accumulation of electricity in connection with the operation of renewable energy sources
Akademický rok:	2020/2021
Ústav:	Ústav energetiky
Vedoucí BP:	Ing. Václav Železný
Bibliografické údaje:	Počet stran: 65 Počet obrázků: 20 Počet tabulek: 3 Počet příloh: 0
Klíčová slova:	Obnovitelné zdroje energie, Vodík, Elektrolýza, Akumulace energie, Zdroj vodíku
Keywords:	Renewable energy sources, Hydrogen, Electrolysis, Energy storage, Hydrogen source
Anotace:	Tato bakalářská práce se zabývá výrobou, využitím a problematikou akumulace vodíku z kolísavých obnovitelných zdrojů energie. Úvodní část práce obsahuje stručný přehled kolísavých obnovitelných zdrojů energie a způsoby akumulace elektrické energie z těchto zdrojů využívané v současné době. Závěrečná část se věnuje návrhu nového zařízení na výrobu vodíku s nízkou energetickou náročností.
Abstract:	This bachelor thesis deals with the production, use and issue of hydrogen accumulation from fluctuating renewable energy sources. The introductory part of the work contains a brief overview of fluctuating renewable energy sources and methods of accumulation of electricity from these sources currently used. The final part is devoted to the design of a new device for the production of hydrogen with low energy consumption.

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Václavu Železnému, za odborné vedení, za pomoc a rady při tvorbě této práce.

Obsah

Seznam symbolů a zkratek.....	8
Úvod	9
1 Proměnlivé obnovitelné zdroje energie	10
1.1 Energie větru	11
1.2 Energie slunce	14
2 Akumulace elektrické energie z obnovitelných zdrojů	15
2.1 Přečerpávací vodní elektrárny.....	16
2.2 CAES – skladování energie stlačeného vzduchu	17
2.3 Setrvačník	18
2.4 Olověné akumulátory	19
2.5 Alkalické akumulátory.....	19
2.5.1 Ni-Cd akumulátory	20
2.5.2 Ni-MH akumulátory	20
2.5.3 Ni-Zn akumulátory.....	20
2.6 Li-ion akumulátory.....	21
2.7 Průtokové baterie.....	21
2.8 Superkondenzátory.....	22
2.9 Supravodivé indukční akumulátory	23
3 Power to gas	23
4 Vodík.....	25
4.1 Vodík jako prvek	25
4.2 Historie	25
4.3 Vodík v palivovém článku.....	25
5 Elektrolýza vody	26
5.1 AEL – Alkalická vodní elektrolýza	27

5.2	PEM – Elektrolýza Polymerní membrány elektrolytu	29
5.3	SOEC – Solid oxide electrolyzer cell.....	29
6	Využití vodíku.....	30
6.1	Výroba metanu – metanizace.....	31
6.2	Průmyslové využití.....	32
6.3	Výroba elektřiny	33
6.4	Doprava.....	33
6.5	Vesmírný průmysl	33
6.6	Průmyslové vysokopotenciální teplo	34
6.7	Bytové vytápění a služby.....	34
7	Akumulace a skladování vodíku	35
7.1	Skladování vodíku v plynné fázi.....	36
7.2	Skladování vodíku v kapalně fázi	37
7.3	Skladování vodíku v pevné fázi.....	39
7.3.1	Metalhydridy.....	40
7.3.2	Alanáty	42
7.3.3	Borohydridy	42
7.3.4	Zeolity.....	43
7.3.5	Uhlíkové nanotrubičky	44
7.3.6	Skleněné mikrokuličky	45
7.3.7	Chemické sloučeniny	45
8	Návrh zdroje vodíku na vysoké energetické úrovni.....	46
8.1	Cíle.....	47
8.2	Stavba	47
8.3	Princip.....	50
8.4	Analýza jeho budoucího využití.....	53

Závěr.....	54
Seznam použitých zdrojů	56
Seznam obrázků	63
Seznam tabulek.....	65

Seznam symbolů a zkratk

OZE	Obnovitelné zdroje energie
PVE	Přečerpávací vodní elektrárny
CAES	Compressed air energy storage
SMES	Superconducting magnetic energy storage
P2G	Power to gas
SOFC	Solid oxide fuel cell
AEL	Alkaline Electrolysis
PEM	Polymer electrolyte membrane
SOEC	Solid oxide electrolyzer cell
FCEV	Fuel cell electric vehicles
CNT	Carbon nanotubes

Úvod

V současné době se vyvíjí velké úsilí k nahrazování konvenčních zdrojů energie, jako jsou fosilní paliva či jaderná energie, obnovitelnými zdroji energie. Obnovitelné zdroje energie budou hrát v dodávkách elektřiny stále větší roli. Mnoho obnovitelných zdrojů, jako je především větrná a sluneční energie, bohužel může dodávat energii pouze přerušovaně, a ne vždy je v době, kdy je to potřeba. Zvyšující se podíl těchto elektráren v elektrické síti vyvolává problém přizpůsobení kolísajícího energetického vstupu poptávce. Proto jsou obnovitelné zdroje ideální volbou pro akumulaci energie pro pozdější využití například při nedostatku dodávané energie do sítě. K překonání tohoto problému musí být do energetické sítě integrovány úložné systémy.

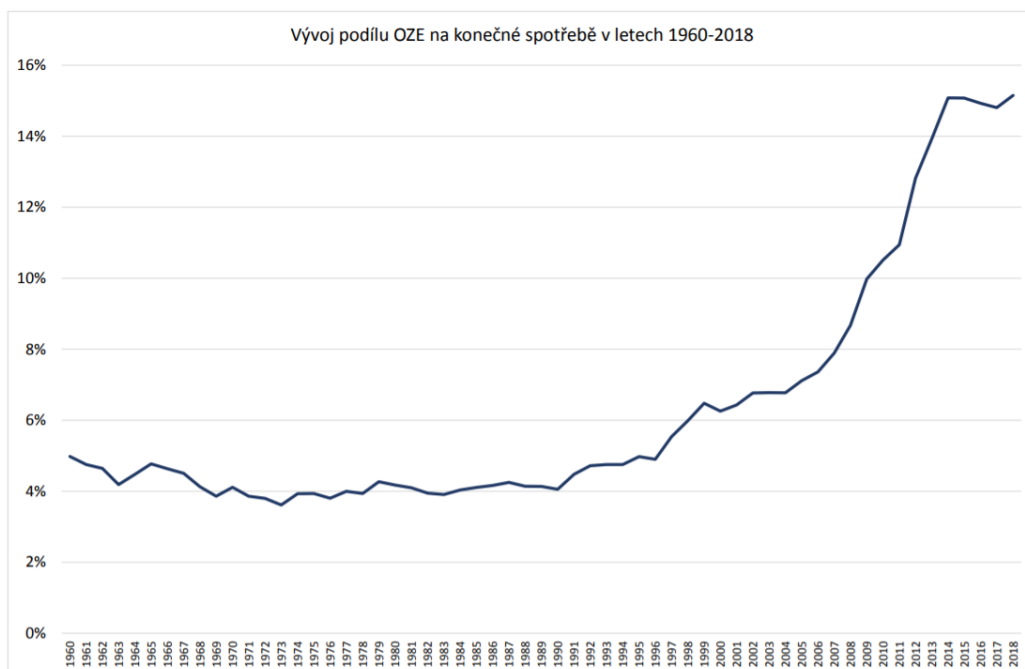
Elektrická síť nemá skladovací kapacitu, proto se pro skladování elektřiny obvykle využívá přeměna na jinou formu energie. Hlavní kritéria jako je kapacita a doba akumulace těchto úložných systémů se liší. Skladování energie pomocí konvenčních způsobů je často omezené jejich krátkodobou akumulací a samovybíjením. Pro dlouhodobé skladování se nabízí řešení v akumulaci energie z obnovitelných zdrojů v podobě paliv, jako je vodík, popřípadě metan.

Na vodík se z mnoha ohledů nahlíží jako na ideální palivo. Skladování vodíku by se na první pohled mohlo zdát snadné, ale vyskytuje se zde spousta technických problémů, které snadnému ukládání zabraňují. Pro jeho výrobu je potřeba v uvozovkách pouze voda a při jeho spalování v čistém kyslíku vzniká zase jen voda. Je možnou alternativou konvenčních fosilních paliv, a navíc šetří životní prostředí. I když je vodík na Zemi hojný ve formě sloučenin, jako je právě voda, produkce molekulárního vodíku vyžaduje velké množství energie. Vodík sám o sobě je sice ideální palivo, ale cesta k získání jeho čisté formy a skladování v současné době je nákladná, a ne příliš účinná.

1 Proměnlivé obnovitelné zdroje energie

Obnovitelná energie také nazývaná čistá energie je energie, která je získávána pomocí obnovitelných zdrojů, tím jsou myšleny ty zdroje energie, které jsou nevyčerpatelné nebo se přirozeně doplňují rychleji, než jsou čerpány. Dalším často kladeným kritériem je, že zdroj musí být uhlíkově neutrální nebo nesmí uhlík vypouštět do okolí. Mezi obnovitelné zdroje energie se řadí voda, vítr, slunce, geotermální energie a biomasa, u které je předmětem debaty, zda patří nebo nepatří mezi OZE kvůli její diskutované uhlíkové neutralitě. Uhlíkově neutrální znamená, že zdroj energie absorbuje tolik uhlíku, kolik vydává. OZE poskytují energii především ve čtyřech základních oblastech: výroba elektrické energie, ohřev/chlazení, doprava a energetické služby mimo síť, například na chalupách. Tyto zdroje se také nazývají „alternativními zdroji“, protože jsou považovány do budoucna jako alternativa pro konvenční neudržitelné zdroje například v podobě uhlí, zemního plynu a ropy.

V České republice podíl vyrobené energie z obnovitelných zdrojů stále roste.



Obr. 1: Graf znázorňující vývoj podílu obnovitelných zdrojů energie na hrubé konečné spotřebě energie v České republice v letech 1960-2018, zdroj [51]

Z obnovitelných zdrojů energie jsou pro akumulaci elektrické energie stěžejní především sluneční a větrná energie. Je to z důvodu jejich společné vlastnosti, a to kolísavosti a proměnlivosti. Nelze je zapnout a vypnout kdykoli je to potřeba a elektrická síť to vyžaduje. Oba tyto zdroje velice závisí na meteorologických podmínkách, podnebí a aktuálním počasí. Z těchto důvodů narušují ustálení elektrické sítě. Jiné zdroje jsou u nás v porovnání s těmito nevýznamné, tedy kromě vody. Vodní energie je na rozdíl od sluneční a větrné dobře regulovatelná a napomáhá ke stabilizaci elektrické sítě, a proto není tak vhodná přímo pro akumulaci.

1.1 Energie větru

Vítr je turbulentní proudění vzduchu, které vzniká v atmosféře v důsledku rozdílů atmosférických tlaků na různých místech. Vítr vane z míst s vyšším atmosférickým tlakem do míst s nižším atmosférickým tlakem, aby se tyto rozdíly vyrovnaly. Teplý vzduch stoupá vzhůru, na jeho místo se tlačí vzduch studený. Větrné proudy jsou ovlivněny především zemskou rotací, morfologií krajiny, rostlinným pokryvem a vodními plochami.[1][2]

Větrná turbína převádí síly proudícího vzduchu působící na listy rotoru na rotační mechanickou energii. Ta je prostřednictvím generátoru převedena na energii elektrickou. Kolem listů rotoru vznikají velké aerodynamické síly, proto listy rotoru mají speciálně tvarovaný profil a pracují na principu buď vztlakové nebo odporové síly.

- Vztlakové turbíny jsou v dnešní době nejpoužívanějším typem větrných elektráren. Využívají principu obtékání vzduchu a vzniku aerodynamických vztlakových sil na listech rotoru. Tyto síly vznikají díky speciálně tvarovaným lopatkám, připomínající křídla letadel.
- Odporové turbíny jsou starší technologií větrných elektráren. Pracují na jednodušším principu a nedosahují tak vysokých účinností jako turbíny vztlakové. Využívá se principu rozdílu sil působících na lopatky, v důsledku jejich různého odporu vůči proudícímu vzduchu. U tohoto principu dochází k mnohem vyššímu dynamickému namáhání, které značně snižuje životnost.

Lopatky mívají tvar připomínající miskou, do kterých se vítr opírá a tím roztáčí turbínu.

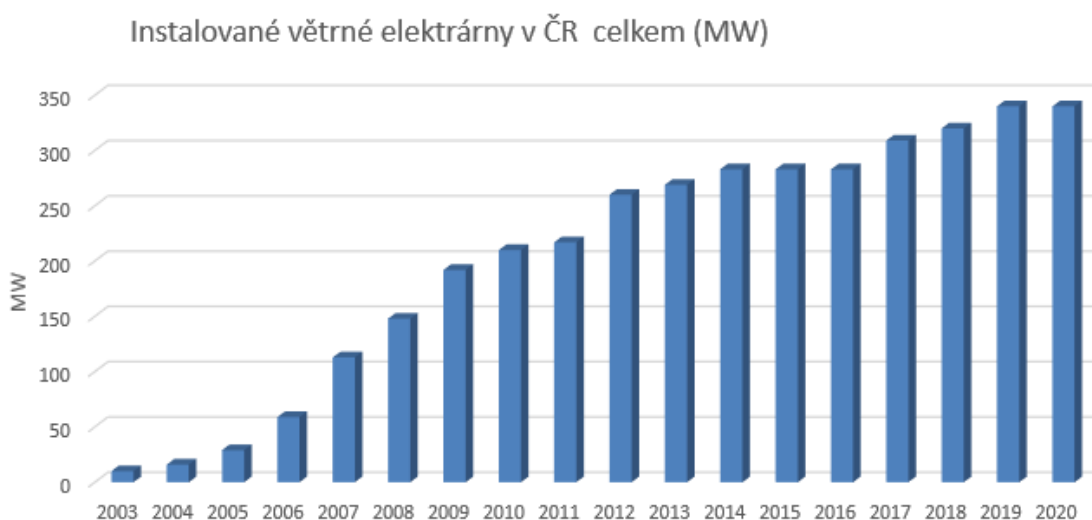
Dále se větrné elektrárny dělí podle osy otáčení rotoru na horizontální a vertikální.

- Horizontální turbína musí směřovat vždy proti směru větru, proto se u menších elektráren tohoto typu využívá směrové lopatky, u větších většinou větrného senzoru a servomotoru. Horizontální turbíny jsou v dnešní době nejvyužívanější především pro jejich vyšší účinnost, která se pohybuje kolem 48 %.
- U vertikálních turbín se nemusí měnit jejich směr vůči větru, což je výhodou zejména v oblastech, kde je směr větru velmi proměnlivý. Výhodou je také, že generátor a převodové ústrojí nemusí být umístěné ve vzduchu, ale na zemském povrchu, to značně zjednodušuje údržbu. Hlavní nevýhodou je nižší účinnost okolo 38 % a vyšší náklady vynaložené na stejnou velikost výkonu jako u horizontálních turbín. [1][2]

Výkon větrných elektráren velmi závisí na průměru rotoru. Trend vývoje je směřován právě k větším průměrům rotorů a vyšším stožárům. Rotor umístěný na vyšším stožáru pracuje v oblasti s výrazně vyššími rychlostmi proudění a větší rotor sbírá energii větru z větší plochy. Zvětšení průměru rotorů v řádu metrů, zvětšuje aktivní plochu rotoru o stovky až tisíce metrů čtverečných a tím se zvyšuje výkon elektrárny. [3]

S větrnými elektrárnami se setkáme buď v podobě malých větrných turbín s výkony okolo 5 kW, které slouží jako zdroj u rekreačních objektů, chat a obytných domů, nebo především v takzvaných větrných parcích, kde jsou instalovány velké větrné turbíny, většinou s výkony 2 MW. Větrné parky obsahují často několik jednotek až desítek větrných elektráren a jsou stavěny v oblastech příznivých na ideální proudění vzduchu pro výrobu elektrické energie. Startovací rychlost větru pro elektrárny jsou 3 m/s. Energeticky využitelný vítr bývá v rozmezí 4 až 26 m/s. Pokud je tato rychlost větru překročena, je elektrárna z bezpečnostních důvodů odstavena. Ideální rychlost větru u moderních elektráren je okolo 13 m/s. V České republice počet větrných elektráren stále přibývá a instalovaná kapacita stále

roste. K 31. 12. 2020 celková instalovaná kapacita dosáhla 340 MW a celková výroba z větrných elektráren v roce 2020 činila 699 GWh. [4]



Obr. 2: Graf znázorňující celkovou instalovanou kapacitu větrných elektráren v České republice v letech 2003-2020, zdroj [4]

Jak ukazuje tabulka č.1 výroba z větrných elektráren je velmi proměnlivá a dodávaná energie do elektrické sítě je velmi kolísavá. Hodnoty vyrobené energie se mění nejen v rámci let, ale i jednotlivých měsíců. Proto je tento obnovitelný zdroj ideální pro akumulaci elektrické energie.

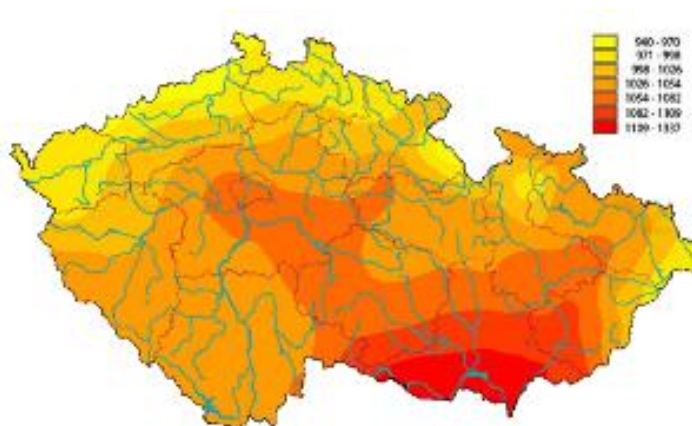
Měsíc	rok 2015	rok 2016	rok 2017	rok 2018	rok 2019	rok 2020
Leden	71661,1	50700	57500	74200	80800	74051,7
Únor	41085,9	67500	47500	28100	64400	114689,8
Březen	60281,3	42600	56600	57500	84900	79787,3
Duben	52130,8	37800	55200	58100	62677,2	48974,2
Květen	36334,6	44000	33500	45900	51570,1	46461,7
Červen	33332,4	20600	38800	35100	36345,9	40485,8
Červenec	37571,1	30800	33400	28400	28179,5	31574,8
Srpen	28275,7	25700	27800	26500	27359	35553,8
Září	40961	25100	34200	36000	44857	36984,5
Říjen	34311,8	41000	64700	68800	62171,7	68850
Listopad	70739,9	50000	56900	60100	72688,5	49962,1
Prosinec	65077,7	61100	85000	80600	83966,4	71688,8
Celkem	571763,3	496900	591000	609300	699959,7	699064,5

Tabulka č.1: Výroba z větrných elektráren v jednotlivých měsících v MWh v letech 2015-2020, zdroj [4]

1.2 Energie slunce

Solární energii můžeme využít hned několika způsoby, například k ohřevu užitkové vody, k vytápění nebo výrobě elektřiny. Sluneční záření dopadá všude na Zemi, ale s rozdílnou intenzitou. Podmínky v České republice se rozhodně nemohou srovnávat se státy například na rovníkových oblastech, přesto i u nás lze vyrábět elektrickou energii pomocí sluneční energie. Intenzitu záření značně ovlivňuje také počasí, denní doba a roční období. Sluneční energie je proměnlivá stejně jako větrná energie.

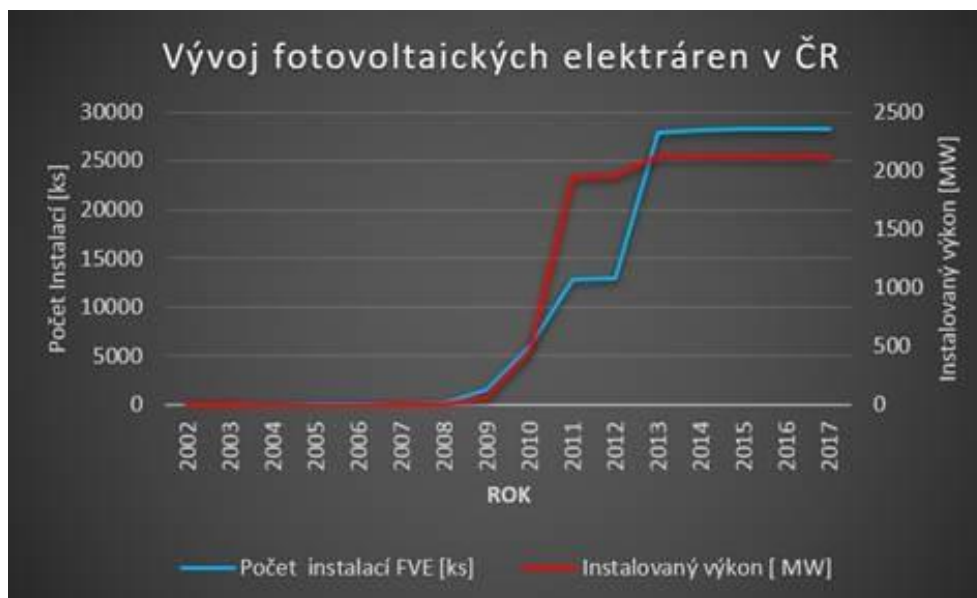
V České republice jsou podmínky pro využití sluneční energie relativně dobré. Pokud nepočítáme s oblačností, tak celková doba slunečního svitu je 1 400 - 1 700 hodin za rok. Vhodnost lokality pro využití sluneční energie na našem území se vybírá podle výsledků globálního slunečního záření, která vychází z dlouhodobých meteorologických měření. Je naměřeno, že na území ČR dopadá ročně na 1 m² přibližně 950–1340 kWh sluneční energie. Téměř tři čtvrtiny ze zmíněné energie dopadne v letním období. [5]



Obr. 3: Roční úhrn globálního slunečního záření v ČR v kWh/m², zdroj [5]

Pro přeměnu sluneční energie na energii elektrickou se využívá fotovoltaických panelů. Skládají se z jednotlivých článků, které jsou ve své podstatě polovodičové diody. Fotovoltaický článek pracuje na principu P-N přechodu, přičemž jeho základem je tenká křemíková destička s vodivostí typu P, na kterou je při výrobě nanášena tenká vrstva polovodiče typu N. Vlivem slunečního záření na článek vzniká v polovodiči vnitřní fotovoltaický jev a začnou se uvolňovat elektrony z

krystalické mřížky. Na P-N přechodu se vytvoří elektrické napětí. Po připojení spotřebiče k článku, kladné a záporné náboje se začnou vyrovnávat a obvodem začne procházet elektrický proud. Pro zvýšení napětí a proudu na potřebnou hodnotu jsou fotovoltaické články zapojovány sériově nebo paralelně a tvoří fotovoltaické panely. [6]



Obr. 4: Graf vývoje fotovoltaických elektráren v České republice v letech 2002-2017, zdroj [50]

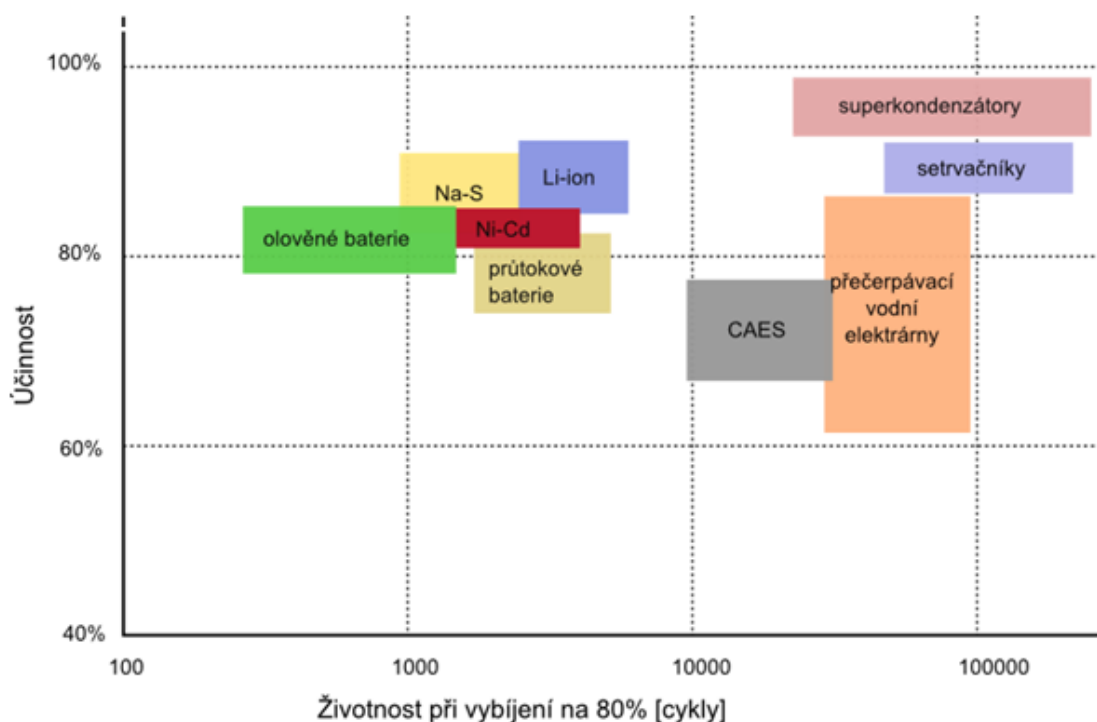
2 Akumulace elektrické energie z obnovitelných zdrojů

Bakalářská práce se zabývá akumulací elektrické energie z obnovitelných zdrojů pomocí chemické cesty, tudíž přeměnou na vodík pomocí elektrolýzy. Přesto je důležité nastínit další možnosti akumulace energie.

Pro akumulaci elektrické energie se používají jako zdroj především obnovitelné zdroje energie, protože dodávají energii do sítě přerušovaně, a ne vždy tak jak je zrovna potřeba. V takovém případě se energie neztratí, ale akumuluje se a je využita v době energetické špičky, kdy je zvýšená spotřeba a odběr ze sítě.

Pojmem akumulace elektrické energie rozumíme způsob převedení a následné uskladnění elektrické energie pomocí jiného druhu energie, který lze v době potřeby zase převést zpět na elektrickou. V České republice se pro akumulaci využívají nejvíce přečerpávací vodní elektrárny, které v době přebytku elektrické

energie ji mění na mechanickou a v době nedostatku zpět. Není to zdaleka jediný způsob uskladnění, používají se dále například chemické akumulátory, superkondenzátory, setrvačníky a další. Každá aplikace vyžaduje jinou technologii skladování. Hlavními kritérii je možná doba uskladnění, počet cyklů, účinnost dané technologie, kapacita a cena.



Obr. 5: Závislost účinnosti na životnosti pro jednotlivé typy akumulace energie, zdroj [11]

2.1 Přečerpávací vodní elektrárny

Přečerpávací vodní elektrárny jsou velmi důležité pro zajištění spolehlivosti dodávek elektrické energie. Význam těchto elektráren značně stoupá s rostoucím podílem výroby elektrické energie pomocí obnovitelných zdrojů, především solárních a větrných elektráren. Z pohledu instalovaného výkonu jde o nejpoužívanější technologii akumulace elektrické energie. Jedná se o soustavu dvou vodních nádrží, které jsou jinak výškově položené a jsou spojené tlakovým potrubím s instalovanou reverzní turbínou v dolní části a motorgenerátorem. [7][8]

V době, kdy je v elektrizační soustavě přebytek elektrické energie, se elektřina spotřebovává k čerpání vody z dolní do horní nádrže. PVE pracuje v čerpadlovém režimu a ukládá energii v horní akumulární nádrži ve formě potenciální energie

načerpané vody. V době nedostatku elektrické energie je načerpaná voda využívána pro pohon turbíny a výrobu elektřiny. Tento režim se nazývá turbínový. [7][8]

U účinnosti PVE rozlišujeme, zda jde o účinnost velkého či malého cyklu. U velkého cyklu se bere v úvahu, že elektrická energie pro akumulaci musí být vyrobena jinou elektrárnou, která disponuje určitou účinností. V praxi se udává účinnost PVE pro malý cyklus. Vztahuje se na přívody a vývody samotné PVE a je vypočítaná jako součin účinností dílčích zařízení pro čerpadlový a turbínový provoz. V dnešní době se celková účinnost pohybuje okolo 75 %. Velká část akumulované energie se mění ve ztráty mechanické, tepelné, přenosem, hydraulické a další. [7][8]

2.2 CAES – skladování energie stlačeného vzduchu

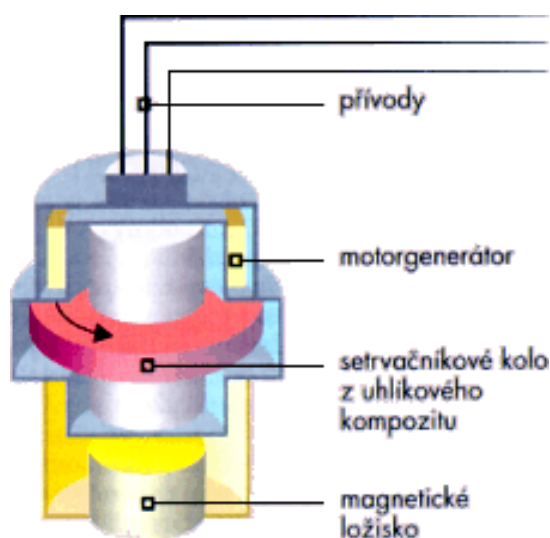
U CAES (Compressed air energy storage) probíhá akumulace za pomoci normálního vzduchu. Princip je podobný jako u přečerpávacích vodních elektráren. V čase přebytku elektrické energie se vhná vzduch z okolního prostředí za pomoci kompresoru do uzavřených předem upravených podzemních prostor, kde se skladuje. Často se z ekonomických důvodů využívají již vyhloubené prostory jako jsou solné jeskyně nebo vytěžené doly, které jsou následně utěsněny a upraveny pro využití jako rezervoáru pro stlačený vzduch. Vzduch je stlačován tlakem okolo 7–10 MPa. Výkon je závislý na velikosti prostoru pro akumulaci. V době nedostatku elektrické energie je stlačený vzduch využit pro pohon turbíny, která mění kinetickou energii vzduchu na elektrickou energii. [9][10]

Problémem této technologie akumulace je její nízká účinnost, která se pohybuje okolo 50 %. Hlavním důvodem jsou ztráty v podobě tepelné energie při kompresi. Před uskladněním musí být vzduch zchlazen. Pro zvýšení účinnosti je potřeba tepelnou energii akumulovat a následně ji využít na zpětné ohřátí vzduchu při expanzi. Pro uskladnění tepla je v zásobnících používán jako medium štěrk. Tímto procesem se dá dosáhnout účinnosti okolo 70 až 80 %, čímž se dají srovnávat s PVE. [9][10]

2.3 Setrvačnick

Setrvačnick je jedna z dalších možností akumulace energie. Princip spočívá v tom, že elektromotor roztočí setrvačnick, který je umístěn na hřídeli a tím do něj naakumuluje energii v podobě kinetické energie. Po zpomalení, či úplném vypnutí motoru, setrvačnick stále běží a nadále roztáčí rotor a tím přetváří naakumulovanou energii na elektřinu a vrací ji z elektromotoru zpět do sítě. [9]

Setrvačnický se vyznačují vysokou energetickou účinností, přesahující 80 %. Pro zvýšení otáček a účinnosti jsou dříve používaná litinová kola nahrazena koly z vyztužených plastů. Pro lepší funkci jsou setrvačnický umístěné ve speciálních ložiskách a ve vakuové nebo heliem plněné skříní, aby se co nejvíce omezilo tření. Takto sestavené setrvačnický vydrží více než 100 000 otáček za minutu. [9][11][12]



Obr. 6: Setrvačnický akumulátor s rotorem z uhlíkového kompozitu zavěšeného v magnetických ložiskách, otáčejícím se rychlostí 100 000 otáček za minutu, zdroj [12]

Největší výhodou setrvačnicků je především jejich náběhová rychlost v řádech jednotek milisekund a schopnost krátkodobě vydat elektrický výkon v řádech několika MW. Životnost setrvačnicků se pohybuje okolo 10 let nepřetržitého provozu. V dnešní době se setrvačnickové zásobníky nejvíce využívají jako alternativa ukládání energie, pro průmyslovou akumulaci elektřiny a jako pohon hybridních vozidel. Dále se setrvačnický začínají využívat pro překonání krátkodobého výpadku sítě. [11][12]

2.4 Olověné akumulátory

Jedná se o nejstarší a nejpoužívanější akumulátory. Byly vynalezeny již v roce 1859 francouzským fyzikem Gastonem Planté. Jde o první nabíjecí baterie pro komerční využití. V dnešní době jsou často nahrazovány akumulátory Li-ion, ale stále lze najít oblasti, kde jsou nenahraditelné. Jsou tolik rozšířené především pro jejich spolehlivost, odolnost vůči nízkým teplotám a cenu. Své uplatnění mají tyto baterie především v dopravních prostředcích jako 12 V automobilové akumulátory s kapacitou okolo 65-70 Ah, a také při krátkodobém skladování energie. [11][12][13]

Olověné akumulátory dosahují vysoké účinnosti okolo 80 %. Bohužel mají omezenou životnost, která je ovlivněna opakovaným hlubokým vybíjením a nabíjením, každý cyklus ubírá trvale malé množství celkové kapacity. Hlavními důvody relativně krátké životnosti je koroze mřížky na kladné elektrodě a ztenčení vrstvy aktivního materiálu. Výhodou olověných akumulátorů oproti jiným nabíjecím bateriím je jejich pomalé samovybíjení. Nevýhodou je vysoká hmotnost a ekologická zátěž v podobě Pb a Cd. Také se nehodí pro aplikace, které vyžadují rychlé nabití. U většiny trvá úplné nabití 14-16 hodin. [11][12][13]

Mřížková elektroda olověných akumulátorů není vyrobena z čistého olova, ale ze slitiny olova a jiného prvku pro získání mechanické pevnosti a zlepšení elektrických vlastností. Nejčastěji se využívá cín, selen, vápník nebo antimon. Jako elektrolyt se užívá kyselina sírová. Při reakci vzniká na obou elektrodách síran olovnatý (PbSO_4). Svorkové napětí jednoho olověného článku jsou 2 V. [11][13]

2.5 Alkalické akumulátory

Alkalické akumulátory pracují na podobném principu jako olověné akumulátory, avšak nepoužívají jako elektrolyt kyselinu sírovou, ale silně zásaditý hydroxid alkalického kovu. Nejčastěji se využívá hydroxid draselný (KOH). Druhy alkalických akumulátorů se dělí podle materiálů, ze kterých jsou vyrobeny elektrody. Nejpoužívanějšími druhy jsou Nikl-kadmiové (Ni-Cd), nikl-železné (Ni-Fe), nikl-zinkové (Ni-Zn), stříbro-zinkové (Ag-Zn) a stříbro-kadmiové (Ag-Cd).

2.5.1 Ni-Cd akumulátory

Kladná elektroda je tvořena hydroxidem nikelnatým, záporná elektroda kadmíem. Jako elektrolyt se používá rozpuštěný hydroxid draselný ve vodě. Výstupní napětí je 1,2 V na jeden článek. Ni-Cd baterie se používají například v letectví a dalších aplikacích pro krátkodobé uchování energie. [9][11][14]

Ni-Cd akumulátory se vyznačují vysokou účinností okolo 80 %, životností, která se odhaduje kolem 2000 cyklů, odolností a nízkým samovybíjením. Další výhodou je spolehlivost i ve velmi nízkých teplotách. Hlavní nevýhodou je toxicita používaných materiálů. Především kadmium je silně jedovatá a karcinogenní látka, která je nebezpečná pro člověka i životní prostředí. Z tohoto důvodu se v současnosti hledají náhradní řešení například v podobě Ni-MH akumulátorů. [9][11][15]

2.5.2 Ni-MH akumulátory

Z ekologických důvodů se v současné době Ni-Cd články nahrazují nikel-metal hydridovými akumulátory. Kladná elektroda je tvořena hydroxidem nikelnatým, záporná elektroda je tvořena slitinou kovu. Jedná se o bezkadmiovou variantou, která bohužel hned v několika ohledech nedosahuje kvalit Ni-Cd baterií. Trpí vysokým samovybíjením a výrazně nižším počtem cyklů. Počet nabíjecích/vybíjecích cyklů se pohybuje okolo 500. Neumožňuje tak rychlé nabíjení. Účinnost je přibližně o 10 % nižší než u nikel-kadmiových akumulátorů. Na druhou stranu disponují přibližně o 30-40 % vyšší kapacitou u článků stejných rozměrů a jsou šetrné k životnímu prostředí. Výstupní napětí je stejné, 1,2 V na jeden článek.[15][16]

2.5.3 Ni-Zn akumulátory

U Nikl-zinkových akumulátorů je kladná elektroda z niklu a záporná ze zinku. Elektrolytem je hydroxid draselný. Díky jejich ceně, dostupnosti a možnosti recyklace se jedná o jednu z možností pro náhradu Ni-Cd článků. Výhodou těchto baterií je jejich nízké samovybíjení. Jejich výstupní napětí je 1,6 V na jeden článek. Hlavní nevýhodou je nízký počet nabíjecích/vybíjecích cyklů, který činí pouze kolem 200. Tyto baterie vyžadují speciální nabíjení, a proto nejsou vhodné pro komerční nabíječky.[9]

2.6 Li-ion akumulátory

Li-ion akumulátory představují perspektivní možnost akumulace energie a v současnosti nahrazují ve spoustě aplikacích běžné Ni-Cd, Ni-MH a olověné akumulátory. Kladná elektroda je tvořena oxidem kovu (LiCoO_2) a záporná je vyrobena z uhlíku. Elektrolytem je lithná sůl (LiPF_6) rozpuštěná v organickém karbonátu. Při nabíjení Li-ionty se dostávají do mezer vrstevnaté struktury uhlíkové elektrody. To znamená, že se ionty vměšují do materiálu bez chemické reakce s jeho mřížkou. Tím je dosaženo dlouhé životnosti. [9][11][17]

Hlavní výhodou oproti ostatním bateriím je vyšší energetická hustota. Další výhodou těchto typů akumulátoru je, že dochází k pomalejšímu samovybíjení než u většiny ostatních, umožňují rychlejší nabíjení a vyšší jmenovité napětí, které u některých typů Li-ion akumulátorů dosahuje až 3,6–3,7 V. Nevýhodou je postupná ztráta celkové kapacity, i v době nečinnosti. Je to z důvodu samovolné nevratné degradace materiálů uvnitř baterie. Při porušení pláště baterií dochází k reakcím lithia se vzdušnou vlhkostí a kyslíkem a tím vzniká velké riziko požáru. V takovém případě je vysoká energetická hustota spíše nevýhodou, protože se mění velmi rychle na teplo. [9][11][17]

Li-ion akumulátory disponují na svůj výkon nízkou hmotností a malou velikostí a jejich využití je velmi široké. Instalují se do přenosných a mobilních zařízení jako jsou elektromobily, elektromotocykly, mobilní telefony, notebooky a tablety. Tvoří napájení ručního nářadí. Dále jsou vhodné pro krátkodobé skladování elektrické energie. [9][11]

2.7 Průtokové baterie

Hlavní rozdíl průtokové baterie od konvenčních akumulátorů se týká elektrolytu, který je rozdělen na kladný a záporný a je umístěn ve dvou oddělených nádržích. V jedné nádrži se nachází vanadová sůl a ve druhé koncentrovaná kyselina sírová. Z nádrží jsou pomocí čerpadel vháněny elektrolyty do reaktoru, kde se nemísí, ale přes membránu probíhá mezi nimi výměna iontů. Probíhající chemickou reakcí se na uhlíkových elektrodách tvoří elektrický proud. [9][18]

Díky odděleným vnějším nádržím a možnosti zvyšovat a snižovat objem elektrolytu, průtokové baterie umožňují regulaci akumulární kapacity a celkového výkonu baterie. Další výhodou je, že nepoužívají žádné nebezpečné kovy a jsou šetrné vůči životnímu prostředí. Jejich účinnost se pohybuje okolo 85 %. Díky rozdělení elektrolytu nedochází k degradaci materiálů, proto má baterie životnost tisíce až desetitisíce nabíjecích/vybíjecích cyklů. Díky okamžitému přechodu z režimu nabíjení na vybíjení jsou průtokové baterie vhodné k vyrovnání krátkodobých i střednědobých výkyvů výkonu slunečních a větrných elektráren, které mohou být způsobeny meteorologickými podmínkami. Nevýhodou průtokových baterií je nízká hustota energie a vznik vysokých tepelných ztrát při chemických reakcích. [9][18]

2.8 Superkondenzátory

Superkondenzátory jsou elektrotechnické součástky. Energie v nich není uchována chemicky, tak jak je to u akumulátorů, ani v podobě kinetické a potenciální energie jako je to u CAES a PVE, ale díky schopnosti udržet na svých elektrodách elektrický náboj je uchována přímo elektrická energie. [9][11]

Princip superkondenzátorů spočívá v kombinaci kondenzátoru a akumulátoru. Konstrukcí, přítomností elektrod vyrobených z uhlíku a elektrolytu, který může být na vodné bázi nebo být tvořen organickým rozpouštědlem je podobný akumulátoru. Schopností se za velmi krátký časový úsek nabít a velmi rychle uvolnit naakumulovanou energii ven zase připomíná kondenzátor. Svorkové napětí je kvůli bezpečnosti omezeno na 1 - 1,2 V ve vodném a 2,5 - 3 V v organickém elektrolytu. [9][11]

Superkondenzátory mají malý vnitřní odpor a díky tomu dosahuje jejich účinnost prakticky 95 %. Na rozdíl od akumulátoru i po mnoha nabíjecích/vybíjecích cyklech neztrácí svoji kapacitu a jejich výhodou je tedy možnost absolvování vysokého počtu cyklů. Hodí se pro krátkodobé pokrytí špičkových proudů. Na dlouhodobou akumulaci bohužel nejsou uzpůsobeny, trpí rychlým samovybíjením a nízkou hustotou energie. [9][11]

2.9 Supravodivé indukční akumulátory

Impulz pro zcela revoluční způsob vedení a akumulaci elektrické energie dal již v roce 1911 nizozemský fyzik Heike Kamerlingh Onnes, kdy objevil supravodivost. Jedná se o stav, kdy látka neklade procházejícímu proudu téměř žádný elektrický odpor. Pokud se bavíme o supravodivosti, jde o technologii určenou nejen pro akumulaci, ale také pro vedení elektrického proudu, výrobu supravodivých magnetů a pro experimenty s levitací. Nás především zajímá skladování energie, a tedy technologie SMES (Superconducting magnetic energy storage). Akumulace pomocí supravodivosti zatím je ve vývojové fázi a počítá se s ní především do budoucna. Zatím bylo vyrobeno pouze několik malých akumulátorů s kapacitou v řádech kWh. [12][19]

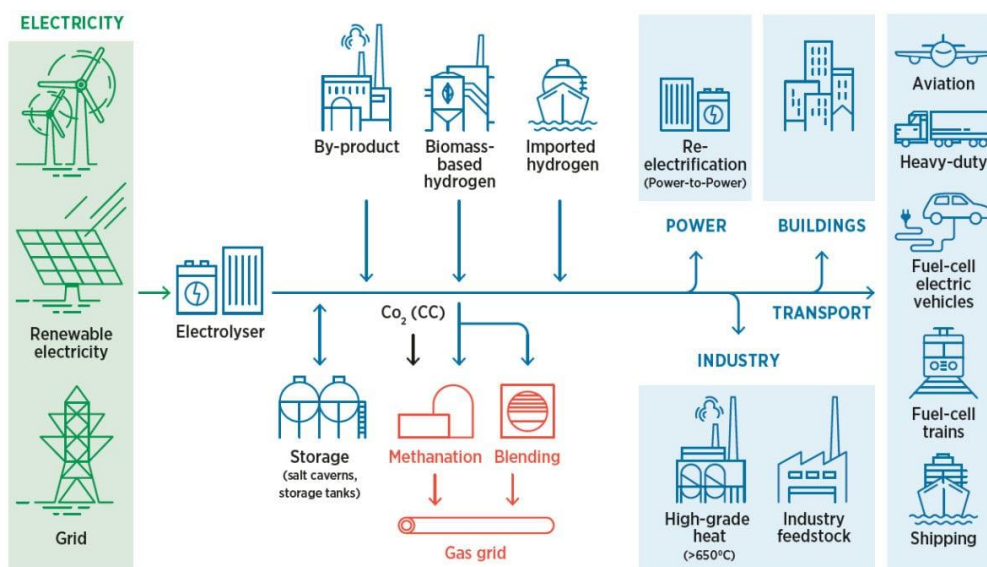
Systém SMES dokáže skladovat energii v magnetickém poli vytvořeném průtokem stejnosměrného proudu cívkou. Nejčastější materiál cívky je měď, dále se používá například cín nebo olovo. Cívka je ponořena do helia udržovaném pomocí kryogenní stanice v kapalném skupenství o teplotě $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$. Další segmenty systému jsou řídicí jednotka a stabilizátor napětí, jehož součástí je usměrňovač a střídač. Za stálého chlazení lze po nabití cívky, uchovávat energii neomezeně dlouho s minimální ztrátou. [12][19]

Jedná se o nejefektivnější možnost pro skladování energie. Supravodivé indukční akumulátory vydrží i několik milionů nabíjecích/vybíjecích cyklů. Doba nabíjení i vybíjení je extrémně krátká a v případě nedostatku výkonu v síti je možné naakumulovanou energii do sítě uvolnit v řádech mikrosekund. Při započítání vydané energie na chlazení helia a ztrát vzniklých na usměrňovači a střídači se celkové ztráty pohybují okolo 2-4 %, a celková účinnost přesahuje 95 %. Do budoucna se mluví o akumulátorech o výkonu až 4 000 MW. [12][19]

3 Power to gas

V dnešní době se syntetický vodík a metan většinou vyrábějí z fosilních paliv a biomasy. Power to gas nebo také zkráceně P2G je technologie popisující přeměnu obnovitelné energie na plynné nosiče energie jako je právě vodík nebo následně metan pomocí elektrolýzy vody. Metoda využívá přebytku elektrické energie

v době špičkové výroby, kdy je energie více než je potřeba a není pro ni využití. P2G využívá především jako zdroj fotovoltaické panely a větrné elektrárny. Tyto typy elektráren jsou proměnlivé a velice závisí na okolních změnách a především počasí. Nelze je zapnout kdykoli by bylo potřeba pomoci elektrické síti při největších odběrech elektřiny, a naopak je vypnout, když by nebyly potřeba. Proto se často stává, že produkují energii v době, kdy pro ni není využití. V takové chvíli přichází právě na řadu Power to Gas. [20][21]



Obr. 7: Power to Gas v zásadě zahrnuje použití elektrolyzátoru k rozdělení vody na kyslík a vodík. Vodík může být použit přímo nebo přiváděn do řady procesů, zdroj [20]

Koncept Power to gas se zdá být ideálním řešením jak výroby vodíku, tak akumulace energie v dlouhodobém či krátkodobém horizontu s minimální uhlíkovou stopou. Bohužel tato technologie v dnešní době není ekonomicky životaschopná. Výrobní a provozní náklady „ekologicky citlivých zařízení“ jsou mnohonásobně vyšší než ceny fosilního zemního plynu. Při přeměně solární nebo větrné energie na vodík elektrolýzou se část použité energie ztrácí jako odpadní teplo. Pokud je vodík následně zpracován na syntetický metan, aby mohl být přiváděn do sítě v jakémkoli množství, je třeba použít další energii, to snižuje účinnost přeměny. Pokud se pak metan přeměňuje zpět na elektřinu pomocí plynových elektráren, výsledkem je, že se použije pouze malé množství původně přivedené energie. [22]

4 Vodík

4.1 Vodík jako prvek

Vodík (latinsky hydrogenium, značka H) je plyn, lehčí než vzduch, bez jakékoliv barvy, chuti a zápachu. Je to první prvek v Mendělejevově periodické tabulce chemických prvků s protonovým číslem 1. Je to nejrozšířenější prvek ve vesmíru, tvoří asi 90 % z celkové hmotnosti. Na Zemi je to třetí nejrozšířenější prvek. Na vzduchu je vodík snadno zápalný, ale sám hoření nepodporuje. Na rozdíl od molekulového vodíku, který disponuje vysokou vazebnou energií a je poměrně stabilní, jednoatomový vodík (tzv. vodík ve stavu zrodu) je prudce reaktivní. [23][24][25]

Za běžných podmínek se na Zemi volný vodík nevyskytuje, je vázán v sloučeninách. Největší množství vodíku se nachází ve vodě, ale je vázán i v dalších organických sloučeninách, kde s dusíkem, kyslíkem a uhlíkem tvoří skupinu nazývanou biogenní prvky. Vodík se v přírodě vyskytuje jako směs 3 izotopů. Izotopem s největším podílem výskytu (99,985 %) je ${}^1_1\text{H}$ – protium, někdy nazývaný jako lehký vodík. Deuterium (těžký vodík) - ${}^2_1\text{D}$, izotop s jedním neutronem v jádře zaujímá 0,015 % a radioaktivní tritium - ${}^3_1\text{T}$ se dvěma neutrony v jádře zaujímá jen 0,0001 %. [23][24][25]

4.2 Historie

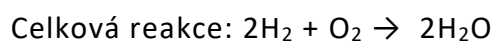
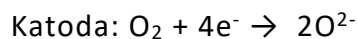
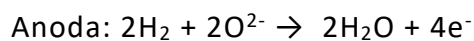
Vodík objevil v roce 1776 britský vědec Henry Cavendish. Objevil ho při svých pokusech, kdy rozpouštěl neušlechtilé kovy v kyselině a nad nimi se tvořil vodík, který popsal jako „hořlavý vzduch z kovů“. V té době se milně domníval, že vodík se uvolňuje spíše z rozpouštějících se kovů, a ne z kyseliny. V roce 1781 objevil, že vodík společně s kyslíkem tvoří dohromady molekulu vody. Pojmenování hydrogen získal až v roce 1783, kdy tento název skládající se z řeckých slov hydro (voda) a genes (tvořící) použil francouzský chemik Antoine Lavoisier. [26]

4.3 Vodík v palivovém článku

Palivové články (SOFC – Solid oxide fuel cell) převádí chemickou energii na elektrickou energii s vysokou účinností a s minimálním znečištěním. Jednobuněčný SOFC se skládá z anody, katody a pevného elektrolytu. Palivo je přiváděno na

anodu, kde probíhá oxidace, zatímco kyslík se přivádí přes katodu. Kyslík vstupující do katody je redukován na ionty kyslíku, které migrují přes hustý oxid-iontově vodivý elektrolyt směrem k anodě a jsou spotřebovány během oxidace paliva k výrobě elektřiny. [27]

Reakce, pokud je použit jako palivo pro palivový článek vodík:



5 Elektrolýza vody

Rostoucí znepokojení nad ekologickými problémy, které vyplývají z používání fosilních paliv přitahuje celosvětovou pozornost. Z tohoto důvodu je v dnešní době snažíme používat ekologicky co nejméně závadné zdroje energie a vyvíjet efektivní technologie, kterými lze tyto zdroje získat. Vodík je jedním ze slibných dostupných zdrojů energie.

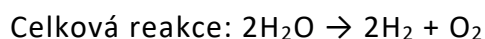
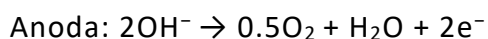
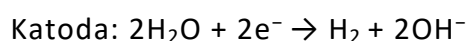
V současné době je přibližně 80 % vodíku vyráběno pomocí parní reformace. To je proces výroby pomocí methanu, který se mísí s vodní parou. Bohužel parní reforma uhlovodíků vede k emisím skleníkových plynů, a to představuje problémy pro životního prostředí. Proto je snaha vyvinout jinou, ekologickou technologii výroby vodíku s vysokou účinností, nízkými náklady a minimální stopou skleníkových plynů. Obecně se uvažuje o nejméně čtyřech metodách ekologické výroby vodíku z vody: elektrolýza, endotermický chemický rozklad, fotolýza a biokonverze. V praxi byla prokázána pouze elektrolýza. Bohužel v dnešní době elektrolýza vody nedosahuje tak vysoké účinnosti, aby se mohla stát náhradou parní reformy. Přesto se vyvíjejí nové způsoby této technologie, jako například SOEC, které mají potenciál vyrábět vodík s vysokou účinností a nízkými vstupními náklady.

5.1 AEL – Alkalická vodní elektrolýza

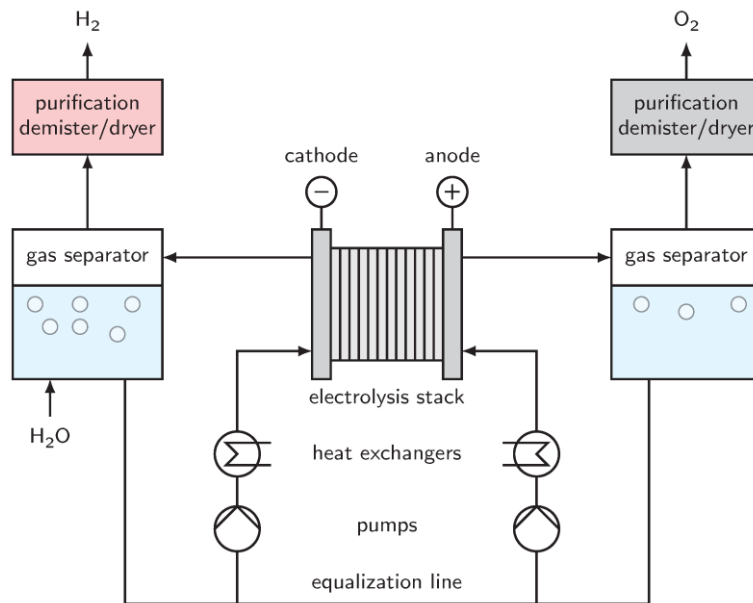
Nejznámější a nejrozšířenější technologie využívající jako elektrolyt vodný alkalický roztok. Tento způsob výroby je velmi spolehlivý, co se týče kontinuálního provozu, který běží s nepřetržitě dodávanou energií. Znovunastartování systému po vypnutí trvá 30 až 60 minut, takže je méně vhodný pro manipulaci s přerušovaným napájením s častým spouštěním a vypínáním. Tato vlastnost je značně nevýhodná pro předpokládané použití a implementaci do systému s dodávkou energie ze slunečných a větrných elektráren. [28]

Alkalická vodní elektrolýza se používá k rozdělení vody na plyny vodík a kyslík pomocí elektrické energie. Na katodě jsou molekuly vody redukovány elektrony na vodík a záporně nabitě hydroxidové ionty. Na anodě se hydroxidové ionty oxidují na kyslík a vodu za uvolňování elektronů. Celkově molekula vody se dělí na vodík a kyslík v poměru 2:1. [29]

Chemické reakce:



Elektrolyt je čerpán elektrolýzním komínem, kde se tvoří produktové plyny. Zatímco přirozená konvekce může být nákladově efektivní alternativou, pokrytí povrchu elektrody plynem může zvýšit požadované napětí článku, a tím zvýšit provozní náklady. Většina systémů s alkalickým vodním elektrolýzérem navíc zajišťuje regulaci teploty elektrolytu k udržení optimálního teplotního rozsahu. Schéma elektrolýzy alkalické vody je uveden na následujícím obrázku. [29]



Obr. 8: Schéma elektrolyzéro alkalické vody, zdroj [29]

Dvoufázové směsi kapalného elektrolytu a produktového plynu opouštějí elektrolytický článek a vstupují do odlučovačů plynu. Většinou se fázová separace realizuje s vysokou dobou zdržení ve velkých nádržích. Produkční plyn je odmlžován a sušen, než je čištěn na požadovanou úroveň. Čistota plynu je důležitým kritériem elektrolyzy alkalické vody. Vyrobený vodík má příznačně čistotu vyšší než 99,9 obj. %, čistota kyslíku bývá v rozmezí 99,0 až 99,5 obj. %. Protože oba produktové plyny mohou tvořit výbušné směsi v rozsahu přibližně 4 až 96 obj. %. Znečištění cizími plyny, stanoví bezpečnostní limity pro nouzové odstavení celého systému elektrolyzéro na úrovni 2 obj. %. Proto musí být během provozu nečistota produktového plynu pod touto hranicí, aby byla zajištěna nepřetržitá výroba. [29]

Kombinace elektrolyzy alkalické vody s obnovitelnou energií je nezbytná pro udržitelnou výrobu vodíku bez významných emisí oxidu uhličitého. Zatímco sluneční a větrná energie jsou často upřednostňovány kvůli jejich široké dostupnosti, pro základní zatížení se často využívají kontinuálnější obnovitelné zdroje, jako je vodní energie, biomasa a geotermální energie. [30]

5.2 PEM – Elektrolýza Polymerní membrány elektrolytu

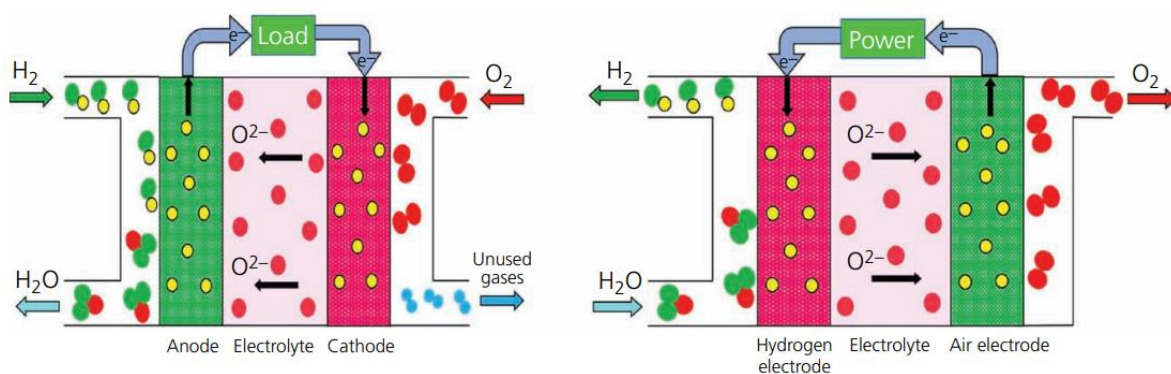
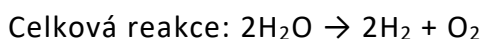
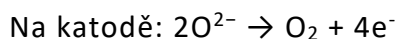
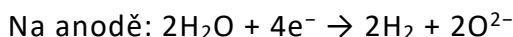
Technologie, která je novější než AEL. Vhodnější pro vkládání do systémů s přerušovanými obnovitelnými zdroji, díky lepším vlastnostem při vypínání a zapínání. Provoz této elektrolytické přeměny je v porovnání s AEL dražší a její předpokládaná životnost kratší. [28]

5.3 SOEC – Solid oxide electrolyzer cell

Technologie vyvinuta poměrně nedávno a stále v experimentální fázi vývoje. Očekává se, že půjde o elektrolýzu s největší elektrickou účinností a nižšími náklady na materiál. [28]

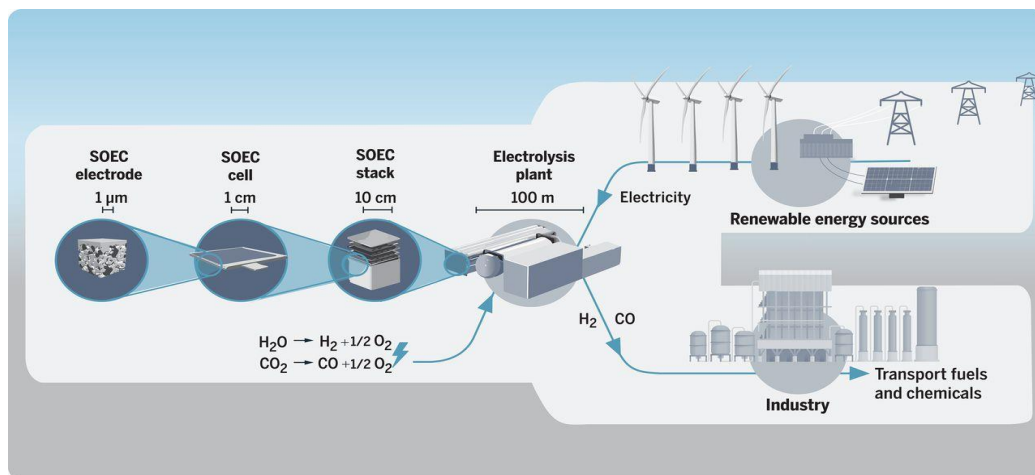
Pracovní mechanismus SOEC je opačný režim než u palivového článku (SOFC). Anoda a katoda nesou názvy vzduchová a vodíková elektroda. Vodní pára se redukuje na vodíkové elektrodě na vodíkový a kyslíkový iont, který migruje přes pevný elektrolyt na vzduchovou elektrodu a oxiduje za vzniku kyslíkového plynu uvolňováním elektronů. [27]

Chemické reakce:



Obr. 9: Pracovní princip SOFC (vlevo) a SOEC (vpravo), zdroj [5]

SOEC používá k elektrolyzování vody teplotu vyšší než 600 °C k podpoře termodynamicky příznivého štěpení vody, které umožňuje výrobu vodíku ve velkém. Navíc v důsledku přechodu vody, při teplotách nad 100 °C z kapalného do plynného stavu, se snižuje potřeba vstupní elektrické energie pro elektrolytický proces, jelikož je kompenzována tepelnou energií. Provoz SOEC při vysoké teplotě má další výhodu, nevyžaduje použití drahého katalyzátoru z ušlechtilého kovu, jako je například platina. Práce při vysokých proudových hustotách, produkuje velké množství vysoce čistého vodíku. Proudová hustota neboli hustota elektrického proudu je fyzikální veličina, která popisuje velikost elektrického proudu v průřezu vodiče. Požadovanou tepelnou energii pro provoz SOEC lze také dodávat z externích zdrojů, jako je průmyslové odpadní teplo. [27]



Obr. 10: Elektrolyzér SOEC: Od nanoměřítko po makroměřítka., zdroj [52]

6 Využití vodíku

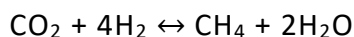
Tato kapitola zabývající se využitím syntetického vodíku je důležitá a je zapotřebí ji věnovat dostatek pozornosti, protože právě pro jeho možnosti využití se vodík stává tolik diskutovaným a zajímavým médiem. Nahrazení standartních fosilních paliv právě vodíkem pro snížení uhlíkové stopy je tématem, které si zaslouží pozornost. Dá se mluvit o uplatnění v několika odvětvích průmyslu, ať už je to doprava, výroba elektrické energie, industriální využití, metanizace a další. Víceúčelové využití lze rozdělit na dvě velké kategorie. Vodík lze vnímat jako surovinu, jejíž význam je znám už desítky let. Uplatnění nachází jako redukční činidlo v metalurgických procesech a v dalších chemických reakcích. Nebo vodík

vnímáme jako zprostředkovatele energie umožňující energetický přechod. Tato stránka věci je otázka především blízké budoucnosti, kdy by se měla všestrannost využívat naplno a díky tomu by mohlo docházet k postupné dekarbonizaci v dopravě, průmyslu, energetice i ve vytápění a výrobě tepla obecně. Právě druhý pohled je pro nás v této práci podstatný.

6.1 Výroba metanu – metanizace

Metanizace je proces, který se především využívá pro výrobu zemního plynu. Má ale i další využití, jako je odstraňování oxidu uhelnatého ze syntézního plynu a zvyšování výhřevnosti svítiplynu. Jedná se o exotermickou reakci oxidu uhličitého a vodíku. To znamená, že se při reakci uvolňuje teplo, které navíc lze použít v jiných procesech jako je výroba páry nebo vytápění. Reakce probíhá za přítomnosti kovového katalyzátoru, jako je nikl, ruthenium nebo železo. Reakce probíhá mezi teplotami 200–550 °C právě podle zvoleného katalyzátoru. Vodík a vodní pára je získávána z elektrolýzy vody, oxid uhličitý se získává zplyňováním biomasy nebo zachycováním z uhelných elektráren. Vyroběný metan lze poté zavést do stávající sítě zemního plynu, která má velkou skladovací kapacitu. [31][32][33]

Rovnice metanizace:



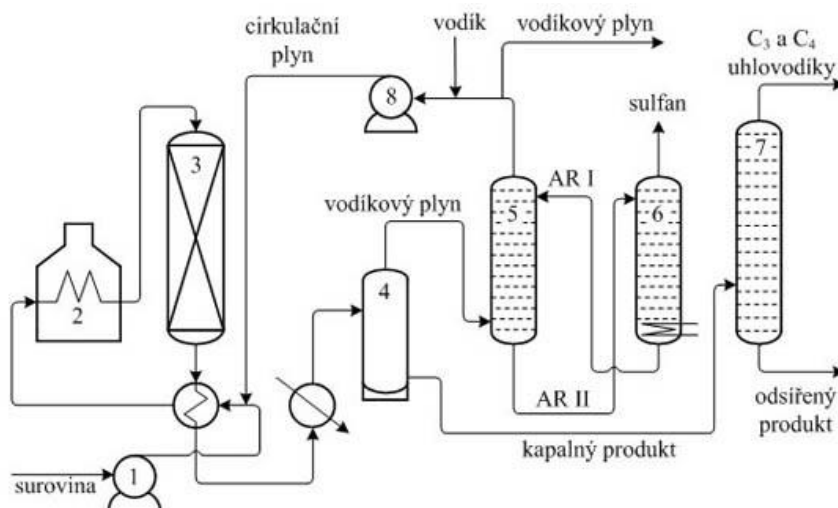
Jedná se o opačný proces parního reformingu. K dosažení co nejvyšší účinnosti metanizace, má proces čtyři reakční stupně uspořádané do série s plynovými mezichladiči, kde se plyn před vstupem do dalšího stupně ochladí. První fáze reakce probíhá v prvním reaktoru s pevným ložem. Vodík a vodní pára jsou přiváděny pod tlakem 20 bar. CO₂ je natlakovaný na tlak v systému pomocí kompresoru a přiváděn do prvního reaktoru pomocí výměníku tepla. Z výstupu reaktoru je část produktu přiváděna zpět na vstup, aby se regulovalo reakční teplo. Do fáze 2 až 4, které probíhají v druhém stupňovitém reaktoru, se plyn přivádí vždy ochlazený na stejnou teplotu 30 °C. Pro zvýšení výroby CH₄ je metanizační proces navržen pro práci při vysokém tlaku 20 MPa. U celého procesu od obnovitelných zdrojů energie po skladování metanu v plynárenské síti lze dosáhnout účinnosti okolo 64 %. [31][32][33]

6.2 Průmyslové využití

V současné době je v průmyslu největší poptávka po vodíku v odvětví rafinace ropy a následně v průmyslové výrobě amoniaku, který je hlavní složkou hnojiv pro zemědělské využití. Proces nazývaný hydrogenační rafinace spočívá ve snižování obsahu síry a aromátů v palivu, právě pomocí vodíku. Je to nejpoužívanější způsob pro výrobu automobilových pohonných hmot. [34]

Vedle klasické hydrogenační rafinace se rozlišuje selektivní hydrorafinace. Tento proces slouží k odstranění některých nežádoucích složek, jako jsou dieny a acetyleny z pyrolýzního benzínu při zachování obsahu alkenů, nebo pro odstranění sírných sloučenin ze středních benzinů při zachování obsahu alkenů. [35]

Hydrorafinace se nejčastěji provádí v reaktoru s pevným ložem. Surovina se smíchá s vodíkem a zahřátá na reakční teplotu je vedena do reaktoru, ve kterém proběhnou hydrorafinační reakce. Následně se v separátoru po ochlazení a snížení tlaku z reakčních produktů uvolní vodíkový plyn, který je zachycen v absorbéru, kde se z něj vyselektuje sulfan a další kyselé plyny. [35]



Obr. 11: Schéma hydrogenační rafinace benzínu (1 - nástřikové čerpadlo, 2 - trubková pec, 3 - hydrorafinační reaktor, 4 - separátor vodíku, 5 - absorbér, 6 - regenerátor, 7 - frakční kolona, 8 - vodíkový kompresor, AR I - absorpční roztok, AR II - absorpční roztok se sulfanem), zdroj [35]

6.3 Výroba elektřiny

Vodíkové palivové články vyrábějí elektřinu kombinací atomů vodíku a kyslíku. Vodík reaguje s kyslíkem přes elektrochemický článek podobně jako u baterie a vyrábí elektřinu, vodu a malé množství odpadního tepla. [36]

Existuje mnoho různých typů palivových článků pro širokou škálu aplikací. Malé palivové články mohou napájet přenosné počítače i mobilní telefony. Velké palivové články mohou poskytovat elektřinu pro záložní nebo nouzové napájení budov a dodávat elektřinu na místech, která nejsou připojena k elektrickým rozvodným sítím. [36]

6.4 Doprava

Použití vodíku v dopravě, někdy označované jako „mobilita vodíku“, vyžaduje k výrobě elektřiny použití palivových článků. Palivové články jsou podobné spalovacím motorům a generátorům v tom, že ke své činnosti vyžadují stálý přísun paliva. Místo toho, aby palivové články spalovaly palivo, aby uvolňovaly energii jako zachycené teplo, používají v elektrochemické reakci vodík k uvolňování a zachycování iontů k výrobě elektřiny. [34]

Elektrická vozidla s palivovými články (FCEV – Fuel cell electric vehicles) vyrábí několik výrobců automobilů. Avšak vzhledem k nízkému počtu FCEV na silnici a kvalitám vodíku představuje umístění čerpacích stanic vodíku finanční a logistickou výzvu pro průmysl palivových článků, což ovlivňuje celkovou proveditelnost použití FCEV. [34]

6.5 Vesmírný průmysl

Od začátku vesmírného programu Apollo až do současnosti hraje vodík zásadní roli při využití jako raketové palivo. Je to dáno tím, že vodík nese třikrát více energie než benzín o stejné hmotnosti. Pro tuto aplikaci je nejzajímavější vlastností schopnost kombinace s kyslíkem a následné uvolňování energie. Dodnes se používá kapalný vodík a kapalný kyslík pro start vesmírných raket. Vodík je také používán jako kapalné palivo s nízkou hustotou pro navigační trysky na oběžné dráze. [37]

Raketoplány pak nesou centrální nádrže s kapalným vodíkem. Vodík hoří čistě a neprodukuje nic jiného než čistou vodu, protože atomy vodíku se vážou s kyslíkem.

Pokud lze samotný vodík vyrábět pomocí energie z obnovitelných zdrojů, jako je sluneční nebo větrná energie, představuje to potenciálně 100% cyklus čisté energie. [37]

6.6 Průmyslové vysokopotenciální teplo

Různá průmyslová odvětví, jako jsou například ocelářský a cementářský průmysl, používají vodík jako vysoce kvalitní zdroj tepla. A stejně jako u hydrorafinace je používaný vodík vyráběn především pomocí fosilních paliv. [36]

Protože se vodík může spalovat ve vodíkových hořácích nebo se může používat v palivových článcích, nabízí alternativu s nulovými emisemi pro vytápění. V průmyslu se vodík využívá jako zdroj tepla v aplikacích jako je procesní ohřev a sušení. Využití vodíku je pomocí palivových článků, které jsou vysoce účinné a poskytují jak teplo, tak energii, ale instalace vyžaduje vysoké náklady. Druhé využití je pomocí hořáků, které fungují s menší účinností, ale nepotřebují výrazné investice pro jejich montáž.

6.7 Bytové vytápění a služby

Ve vytápění a chlazení se kladou cíle v podobě výroby čisté a nízkouhlíkové tepelné energie. I přesto se v dnešní době používá jako zdroje ze $\frac{3}{4}$ fosilní paliva. Dekarbonizace vytápění lze provést několika způsoby: Elektrickými tepelnými čerpadly, elektrickými ohřivači nebo zavedením vytápění pomocí obnovitelných plynů jako je právě vodík. Je uvažováno především řešení přimíchání vodíku do zemního plynu, aby se snížilo procento fosilních paliv. Vodík může činit 5-20 % z celkového objemu zemního plynu, aniž by se musela měnit a upravovat infrastruktura. Některá města v Evropě jsou dokonce uzpůsobena změnit svou plynárenskou síť na síť čistě vodíku. Vodík se stává atraktivní alternativou z pohledu ekonomiky, při přepravě obnovitelné energie na delší vzdálenosti. Tento řešení je ideální například pro Evropu, kde jsou oblasti s vysokým potenciálem výroby obnovitelné energie a možnost dopravy potrubím do jiných oblastí s vysokou poptávkou po energii.

7 Akumulace a skladování vodíku

Vodík má také potenciál hrát zásadní roli v životním cyklu obnovitelné energie tím, že slouží jako forma skladování energie. Vodík, který funguje jako sklad chemické energie, představuje alternativu pro řešení přerušovanosti a spolehlivosti elektřiny vyrobené z tradičních obnovitelných zdrojů, jako je větrná a sluneční energie. To se děje pomocí elektrolyzérů, kde se elektřina vyrobená z obnovitelného zdroje přeměňuje na vodík.

Cílem této kapitoly je přiblížit možnosti skladování vodíku, jejich limity a dosavadní problémy. Systémy skladování jsou velmi různorodé a vždy závisí především přímo na konkrétní aplikaci, které řešení je nejlepší.

Nalezení schůdného řešení uskladnění vodíku, které je technicky bezpečné, cenově nenáročné, a především energeticky účinné představuje v dnešní době největší překážku pro akumulaci a rozvoj vodíkového průmyslu obecně. Vyřešení tohoto zásadního problému by výrazně urychlilo a pomohlo k rozvoji technologie palivových článků, mnoha odvětví průmyslu, v dopravě a stacionární a přenosné energie.

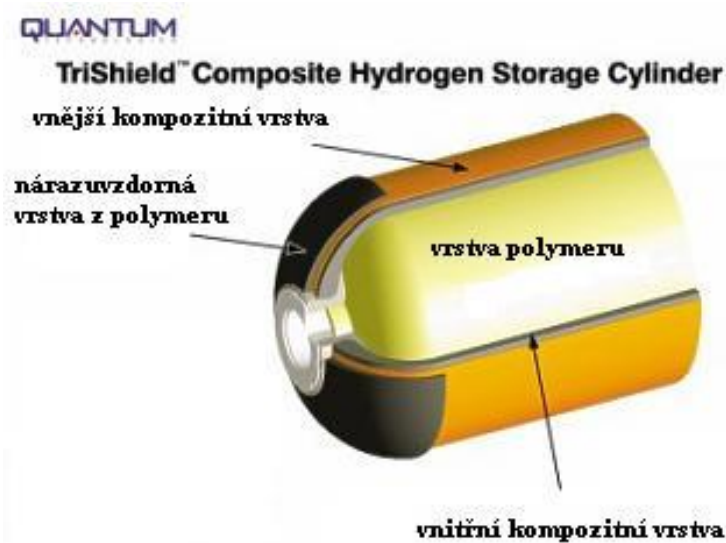
Na rozdělení uskladňování vodíku lze nahlížet z pohledu objemu skladovaného paliva. Buď tu máme skladování v malém měřítku, a to především jako samotný pohon dopravních prostředků, či jiných strojů. Nás ale více zajímá koncept skladování vodíku ve větším měřítku pro skladování přebytečné energie. Ať se skladuje vodík v kapalné, pevné, či plynné formě, vždy tu musí hrát velkou roli bezpečnost, protože vodík je za určitých podmínek výbušný a hořlavý. Velkou roli hrají v instalaci také velikost daných nádrží, odpařování paliva a v souladu s bezpečností upouštění pro snížení vnitřních přetlaků. Touto cestou se samozřejmě snižuje jak uchovávaný objem, tak i účinnost procesu akumulace.

Existují konvenční způsoby akumulace v podobě skladování plynného a kapalného vodíku. Výhodou těchto řešení je jejich ověření v praxi, protože jsou známa a využívána již léta. Nevýhodou je, že nenabízí další potenciál pro jejich rozvoj. Dá se u nich předpokládat minimální technologický vývoj, ale nebude tak rapidní jako u alternativních řešení, které jsou nové, často ještě ve vývojové části a doposud

nepříliš komerčně využívané. Alternativní řešení mají potenciál zodpovědět hlavní otázky akumulace vodíku jako jsou velikost nádrží, objem skladovaného vodíku i ekonomickou stránku.

7.1 Skladování vodíku v plynné fázi

Vodík můžeme fyzicky skladovat v jeho plynné nebo kapalně fázi. Pro akumulaci vodíku v plynné fázi se nejčastěji používají bezešvé vysokotlaké lahve. Vyráběny jsou především z nízkouhlíkatých a chrom-molybdenových ocelí. Tlak v nádobách se obvykle pohybuje mezi 40-200 MPa. Nejčastěji používaný objem lahví v ČR je 50 l, které jsou určeny pro běžné aplikace. Do dopravních prostředků poháněných vodíkem se nejčastěji instalují kompozitní tlakové lahve. Tyto lahve vyžadují tlaky okolo 100 MPa a objem se pohybuje od 10 do téměř 300 litrů. Pro zamezení úniku vodíku skrz stěnu jsou tyto lahve zevnitř potahovány tenkou vrstvou kovu nebo speciálního polymeru. [39] [40]



Obr. 12: Složení tlakové nádoby pro skladování vodíku v plynném skupenství, zdroj [39]

Omezením tohoto způsobu skladování je energie potřebná ke stlačení plynu pomocí kompresoru. Asi 20 % energetického obsahu vodíku je ztraceno v důsledku právě stlačování. Kromě energetických ztrát je velký problém spočívající v křehnutí konvenčních materiálů, ze kterých jsou vyrobeny vysokotlaké vodíkové nádrže,

během četných cyklů plnění a vyprazdňování. I přes zmíněné komplikace této technologie se jedná o nejpoužívanější metodu skladování vodíku vůbec. [41]



Obr. 13: Vodíkové nádrže používané v současnosti ve vozidlech na vodíkový pohon, zdroj [41]

Pro akumulaci vodíku v plynné formě se též využívá podzemních uložišť, která mohou být tvořena člověkem nebo přírodně, mezi které patří zásobárny vznikající z jeskyň po vyčerpání zemního plynu nebo z vytěžených solných dolů. Skladovaný vodík je v těchto uložišťích stačen poměrně nízkým tlakem, aby se zamezilo překročení kapilárních sil, které udržují vodu v mikropórech. Přesažení těchto sil by mělo za následek únik vodíku. Tlak se pohybuje okolo 11 MPa. U těchto způsobů skladování hrozí riziko znečištění paliva jinými přítomnými plyny. Znečištění se počtem opakování snižuje. V Evropě se tato metoda využita například v Billingtonu ve Velké Británii, Beynes ve Francii, pak v Nizozemí a Německu. [40]

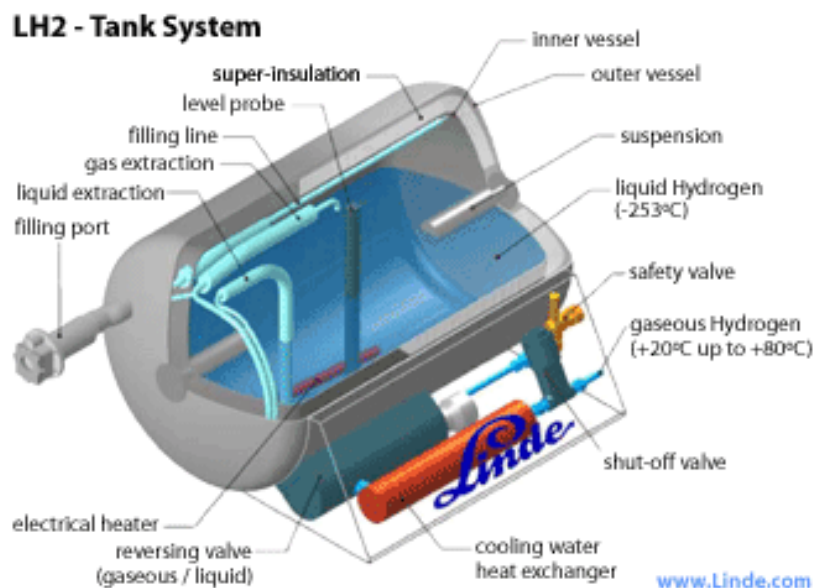
7.2 Skladování vodíku v kapalně fázi

Skldování kapalného vodíku je druhou a méně používanou formou fyzického skladování. Zkapalnění vodíku vyžaduje velké množství energie a klade vysoké nároky na použité materiály. Tyto aspekty se samozřejmě projevují také po ekonomické stránce. Oproti fosilním palivům, které se dají skladovat v kapalně

formě při běžných teplotách a relativně nízkých tlacích, se vodík nezkapalňuje až při $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$, to je $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ nad absolutní nulou. Nízká teplota je udržována pomocí nádrže s kapalným heliem. [40][41]

Tato metoda je jak energeticky, tak finančně náročná. Jak již bylo řečeno je potřeba velkého množství energie na ochlazení a také udržení potřebné teploty. Další energie je spotřebována pro přechod na paraformu vodíku z ortoformy. Paravodík je stabilnější při nižší teplotě. V důsledku skladování může být ztraceno asi 40 % energetického obsahu vodíku. Bezpečnost a čistota je také dalším problémem při zacházení s kapalným vodíkem. Velkou pozornost vyžaduje obsah zbytkového kyslíku, který nesmí přesáhnout hranici 1 ppm (ppm = parts per million, výraz pro jednu miliontinu celku), z důvodu nebezpečí výbuchu. Kromě nákladů na použité materiály a čištění je výroba nádrží pro skladování další ekonomicky nákladná složka. Kapalným vodíkem se skladuje především ve vysokotlakých nádržích s tepelnou izolací nebo v Dewarových nádobách, které mají dvojitou stěnu s vakuovým meziprostorem. [40]

Kryogenní nádoby musejí být vybaveny přetlakovým mechanismem, který reguluje maximální přípustný přetlak. Vlivem přestupu tepla dochází při skladování k vypařování části kapaliny a tím zvyšování tlaku uvnitř. Aby nedošlo k destrukci nádrže musí být přebytečný plyn upouštěn. Pro eliminaci ztrát je nádrž v některých aplikacích vybavena přídavnými tlakovými lahvemi, do kterých je upouštěný plynný vodík zachycován a stlačován. Pokud tomu tak není u běžných nádob činní denní ztráty z objemu až 3 %. [39]

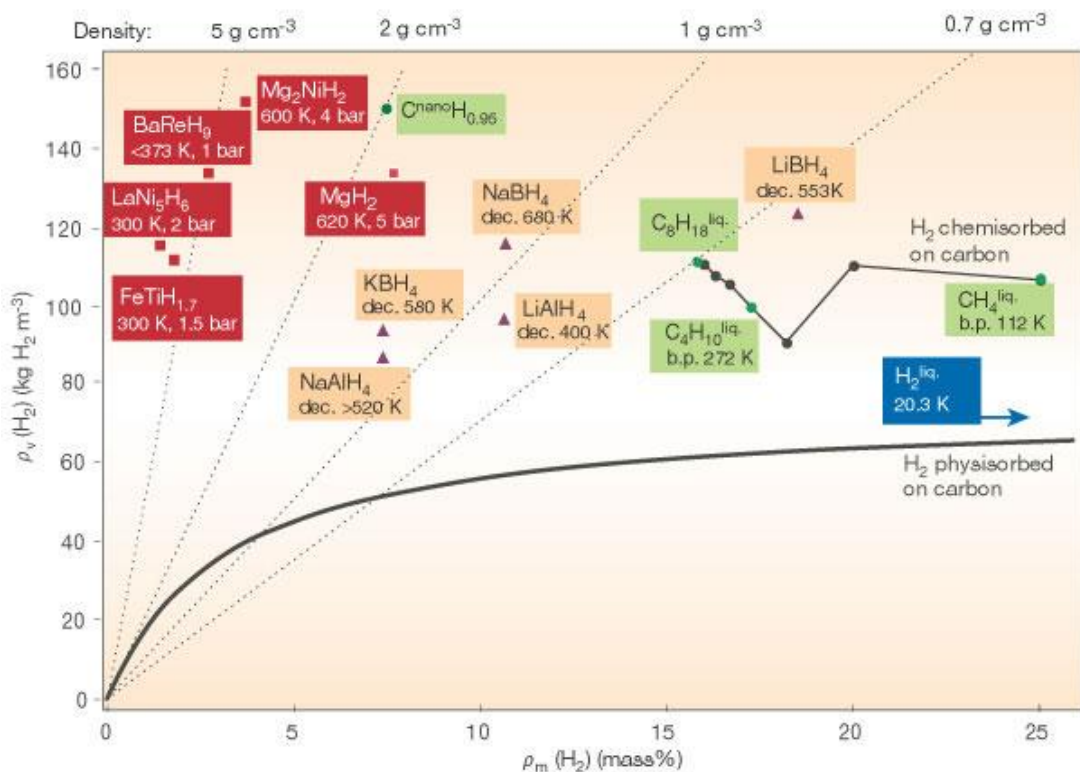


Obr. 14: Systém vysokotlaké nádrže na kapalný vodík, zdroj [41]

7.3 Skladování vodíku v pevné fázi

Ve výše uvedených typech skladování jsou některé praktické problémy, které nelze obejít, jako jsou například bezpečnostní problémy (pro skladování ve vysokotlakých nádobách) a problémy s odpařováním (pro skladování kapalin). Proto kromě fyzického skladování v podobě kapalné a plynné existují i experimentální alternativní formy uskladnění. Těmto metodám se také přezdívá skladování vodíku v pevné fázi. Tyto technologie jsou v současné době teprve ve vývojové fázi nebo jsou vcelku nové a na trhu ještě ne příliš rozšířené.

V těchto systémech jsou molekuly vodíku ukládány v mezoporézních materiálech pomocí absorpce materiálu. V takovém případě je vodíková kapacita materiálu úměrná jeho specifické povrchové ploše. Skladování adsorpcí je atraktivní řešení, protože je zde možnost snížit celkový tlak v systému na ekvivalentní množství vodíku, čímž vznikají bezpečnější provozní podmínky. V posledních desetiletích bylo vyvinuto a zkoumáno mnoho typů vodíkových zásobních materiálů, mezi které patří hydridy, alanáty, borohydridy a další. Mnohem větší pozornost si v dnešní době získaly porézní materiály jako jsou metalhydridy, uhlíkové nanotrubičky, zeolity, či skleněné mikrokuličky. [41]



Obr. 15: Kompletní diagram skladování vodíku v hydridech kovů a materiálech na bázi uhlíku, zdroj [41]

7.3.1 Metalhydridy

Skladování vodíku v metalhydridech využívá principu absorpce vodíku do materiálů na bázi kovů. Jedná se o exotermickou reakci. To znamená, že při absorpci je teplo odebíráno. Při uvolňování vodíku z materiálu se naopak musí teplo dodávat. U takovýchto systémů jsou hlavními parametry, které se sledují teplota, při které dochází k uvolňování vodíku, hmotnostní a objemová kapacita absorbátoru, cena a složitost systému. [42]

Jak ukazuje tabulka č. 2 jedná se o atraktivní alternativu díky své univerzálnosti a také proto, že pevné sloučeniny mohou ukládat více vodíku na jednotku objemu než samotný kapalný vodík, tím zvyšuje i bezpečnost. [43]

Materiál	Gravimetrická vodíková hustota	Objemová hustota
	[% z hmotnosti]	[kg/m ³]
Plynný vodík při 700 barech	100	50
Kapalný vodík	100	70
LaNi ₅	1,5	120
FeTi	1,5	110
MgH ₂	7,6	105
LiH	12,6	100
NaAlH ₄	7,5	95
NH ₃ BH ₃	19,6	100
LiBH ₄	18,4	120

Tabulka č.2: Gravimetrická a objemová hustota různých hydridů ve srovnání s hustotou kapalného vodíku a plynného vodíku při vysokém tlaku. Hmotnost kontejneru není zohledněna, zdroj [43]

Slitiny na bázi Lanthanu (La) a Titanu (Ti) jsou příklady nízkoteplotních materiálů. Jejich hlavní nevýhodou je, že poskytují nízkou hmotnostní kapacitu, menší než 2 % hmotnosti.

Sloučenina je vhodná, pokud může absorbovat a desorbovat vodík při středním tlaku v rozmezí 1–10 barů a teplotě 0–100 °C. Jako nejvhodnější sloučeniny jsou intermetalické sloučeniny, který mají chemický vzorec ve tvaru AB₅, AB₂ a AB (A a B jsou prvky s vysokou a nízkou ochotou reakce s vodíkem). Takové sloučeniny tvoří slabou kovovou vazbu s vodíkem. Takové sloučeniny byly dobře prozkoumány a mohou absorbovat a desorbovat vodík během několika minut. Mají dobrou reverzibilitu (schopnost částečné či úplné návratnosti procesu) a jsou ideální pro stacionární aplikace, tedy i pro skladování vodíku generovaného z obnovitelných zdrojů energie. Naproti tomu kapacita intermetalických sloučenin na jednotky hmotnosti není příliš vysoká, a proto se obvykle nepoužívají v mobilních aplikacích. [43][44]

Je potřeba najít hydridy s co nejvyšší gravimetrickou vodíkovou hustotou. Musí tedy obsahovat lehké prvky, jako jsou alkalické kovy nebo kovy alkalických zemin (např. lantánové hydridy, jako je LiH, NaH, CaH₂). Atraktivním východiskem může být hydrid hořečnatý (MgH₂), protože hořčík je velmi hojný prvek, jeho reaktivita je

nízká a jeho skladovací kapacita je relativně vysoká, podle tabulky 7,6 %. Příznivé parametry metalhydridů nejvíce kompenzuje jejich vysoká cena. [44]

7.3.2 Alanáty

Alanáty jsou sloučeniny na bázi hliníku a řadí se mezi komplexní hydridy. Nejvýznamnější sloučeniny z pohledu skladování vodíku jsou NaAlH_4 a LiAlH_4 . Mají velmi vysokou hmotnostní i objemovou kapacitu. Nevýhodou je poměrně vysoká cena hydridů a vysoká desorpční teplota nad $150\text{ }^\circ\text{C}$. Bylo ale zjištěno, že titanové katalyzátory mohou snížit teplotu desorpce NaAlH_4 . Další možnou alternativou by mohl být hydrid hlinitý AlH_3 , který obsahuje 10 % hm. vodíku, při mírné teplotě se plynule rozkládá v jednom kroku, bohužel regenerace pro znovupoužití je možné pouze při velmi vysokém tlaku 24 kbar. [45]

7.3.3 Borohydridy

Ideální materiály pro skladování vodíku měly mít vysoký obsah vodíku, nízké teploty dehydrogenace, aby energetické ztráty byly co nejmenší a rychlá desorpce vodíku při provozních teplotách. Z množství různých zvažovaných možností jsou pevné hydridy kovů, které reverzibilně desorbují velké množství vodíku, extrémně atraktivní jako základní materiály pro skladování vodíku kvůli jednoduchosti procesu, nízkým provozním tlakům a relativně nízkým nákladům. Rané experimenty se soustředily především na metalické hydridy jako LaNi_5 a TiFe , které vykazovaly velmi dobrou kinetiku absorpce/desorpce, ale měly nízkou kapacitu skladování vodíku, pod 2 % hmotnosti. Rozsáhlé pokusy s lehkými kovy ke zvýšení kapacity a udržení dobré kinetiky byly neúspěšné. Následná vlna výzkumů se zaměřovala především na alanáty. Díky jejím desorpčním vlastnostem a pořizovací ceně nejsou nejvhodnějšími kandidáty. Rostoucí zájem tvoří komplexní borohydridy kovů (s chemickým vzorcem $\text{M}(\text{BH}_4)$) s vysokým obsahem vodíku a velkým potenciálem splnit požadované vlastnosti. [45]

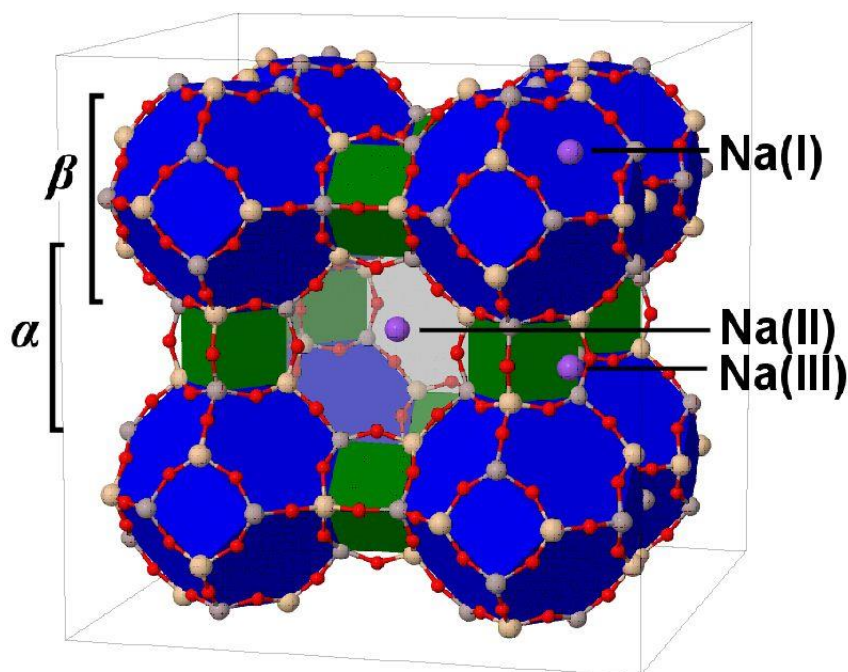
I přes vysoký potenciál možnosti využití jako budoucího media pro skladování vodíku musí být před komerčním využitím vyřešeny nebo zdokonaleny následující parametry: vysoká teplota dehydrogenace, pomalá kinetika dehydrogenace a hydrogenace a vysoké náklady materiálu. S ohledem na tyto úvahy a obsah vodíku jsou nejslibnějšími materiály pro skladování vodíku borohydridy lithia, hořčíku a

vápníku. Na první pohled má $\text{Ca}(\text{BH}_4)_2$ nízkou gravimetrickou kapacitu pro ukládání vodíku, ale objemová kapacita je vyšší než u LiBH_4 a srovnatelná s $\text{Mg}(\text{BH}_4)_2$. [45]

Borohydridy se vytváří pomocí reakcí vodíku s borem a hydridy Li, Na a Mg při 600–700 °C. Pro různé prvky jsou zapotřebí jiné tlaky při reakcích. LiH vyžaduje tlak vodíku 150 bar, zatímco MgH_2 vyžaduje mnohem vyšší tlak, a to 800 bar. Použití sloučenin boru snižuje teplotu na 300 °C a hydrogenační tlak až na 100 barů. Pro další zlepšení kinetiky desorpce u borohydridů vápníku a lithia by se měl výzkum zaměřit na vývoj katalyzátorů pro tyto reakce. [45]

7.3.4 Zeolity

Zeolity jsou hlinitokřemičité krystaly široce používané v průmyslových aplikacích zahrnujících separaci, absorpci nebo preferenční adsorpci plynů. Jsou to významnými kandidáty na médium pro skladování vodíku díky své strukturální a vysoké tepelné stabilitě, velké vnitřní povrchové ploše a nízkým nákladům. [46]



Obr. 16: Jednotková buňka zeolitu sodného s klecí a dutinou, zdroj [41]

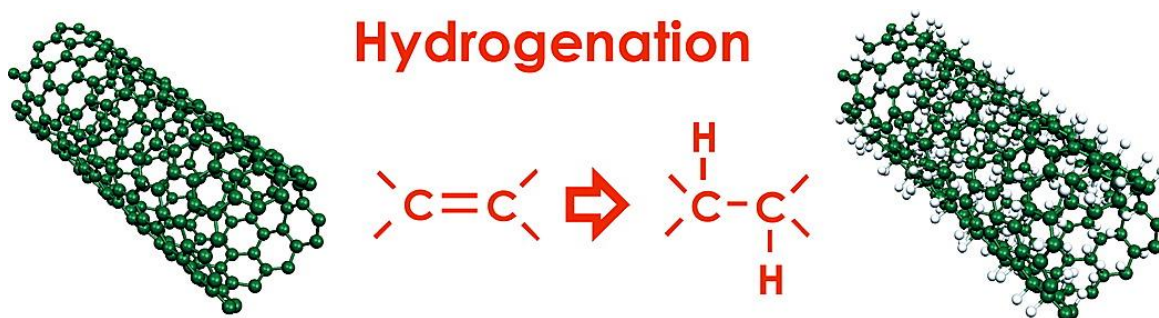
Zeolity obsahují dobře definovanou strukturu otevřených pórů s často nastavitelnou velikostí a vykazují pozoruhodnou chemii typu host-hostitel s důležitými aplikacemi v katalýze, adsorpci, čištění a separaci plynů. Navíc je tento materiál levný a po mnoho desetiletí se široce používá v průmyslových procesech.

Experimentální průzkum stanovil skladovací kapacitu vodíku zeolitů <2 % hmotn. při kryogenních teplotách a <0,3 % hmotn. při pokojové teplotě. [41]

Specifická strukturní konfigurace zeolitů poskytuje velký vliv na jejich vlastnosti s ohledem na adsorpci, selektivitu a mobilitu hostujících molekul. Umožňují přímou manipulaci s dostupným prázdným prostorem uvnitř materiálu, jakož i chemické vlastnosti vazebných míst, což výrazně ovlivňuje jejich skladovací kapacitu. Množství vodíku adsorbovaného do zeolitů závisí na rámcové struktuře, složení, acidobazické povaze zeolitů, tlaku a teplotě. Se snižující se teplotou a zvyšujícím tlakem se kapacita zeolitů zvyšuje. [41]

7.3.5 Uhlíkové nanotrubic

K uskutečnění přepravy pomocí vodíkového pohonu je nutné najít způsoby, jak účinně a bezpečně skladovat vodík na palubě dopravních prostředků. Z alternativních zdrojů hydridy kovů nejsou pro tyto aplikace velmi vhodné, z důvodů jejich poměru objemu, kapacity a váhy. Díky jedinečné duté trubkové struktuře, velké ploše a požadované chemické a tepelné stabilitě jsou uhlíkové nanotrubic (CNT – Carbon nanotubes) možnými kandidáty pro mobilní aplikace, a nejen pro ně. Mohou teoreticky poskytnout kapacitu pro skladování vodíku až 7,7 % hmotnosti. Základní stavební jednotkou je grafen. Jedná se o formu uhlíku, jehož atomy tvoří šestiúhelníkovou krystalovou mříž. CNT lze považovat za jednu bezešvou válcovanou grafitovou vrstvu s vnitřním průměrem začínajícím od 0,7 nm do několika nanometrů a délkou 10 až 100 μm , na obou stranách polokoulí jako polovina fullerenu. Tyto nanotrubic uchovávají vodík pomocí chemisorpce, tzn. tvorbou stabilních vazeb C-H. [47][48]



Obr. 17: Hydrogenace v uhlíkových nanotrubicích – tvorba stabilních C-H vazeb, zdroj [47]

Existují tři různé druhy, jmenovitě „křeslo“, „cikcak“ a „chirá“ podle způsobu, jakým byl grafenový list složen do tuby. Směr válcování ovlivňuje jeho elektrické, mechanické a tepelné parametry. CNT vykazují vysokou mechanickou pevnost s Youngovým modulem 1 TPa a pevností v tahu 200 GPa. V závislosti na průměru nanotrubice lze dosáhnout různých stupňů hydrogenace, než se hydrogenované nanotrubice stanou nestabilními a rozloží se. Skladování vodíku závisí také na počtu vrstev grafenu. S přibývajícemi vrstvami se množství uloženého vodíku snižuje, tudíž jednovrství grafen je pro ukládání nejlepší. Bylo prokázáno téměř 100% pokrytí grafenu atomy vodíku, tedy na každý atom uhlíku byl navázán atom vodíku. [41][48]

7.3.6 Skleněné mikrokuličky

V dnešní době skladování vodíku představuje stále technologickou překážku. Proto se zkoumají různá alternativní řešení skladování. Jednotlivé koncepty jsou ve velmi různorodých stádiích vývoje. Jedním z dalších zkoumaných řešení, které je ještě v laboratorní a vývojové fázi jsou skleněné mikrokuličky.

Skleněné mikrokuličky jsou duté kuličky, s rozměry okolo 25–200 μm a tloušťkou stěny 0,5–20 μm . Jsou plněny difuzí molekul plynného vodíku přes tenkou stěnu při teplotě okolo 200 $^{\circ}\text{C}$ a přetlaku dosahujícího maximálně 100 MPa. Proces uvolňování vodíku je vyvoláno opětovným zvýšením teploty. Hmotnostní kapacita se pohybuje do 15 % hm. při 700 barech, objemová kapacita do 20 gH_2/l . Po naplnění vodíkem se mohou mikrokuličky čerpat do nádrží podobně jako tekutina. Vyprázdněné medium je možné znovu plnit a použít. Materiály využívané pro výrobu jsou křemité sklo, MgAlSi sklo a polyamidy. Skladování vodíku ve skleněných mikrokuličkách je ve stádiu výzkumu a vývoje a v současnosti není známa žádná komerční realizace. Z hlediska ekonomiky se předpokládá, že skleněné kuličky mohou být konkurenceschopné s jinými systémy skladování vodíku. [42][49]

7.3.7 Chemické sloučeniny

Vodík lze skladovat také ve sloučeninách, které jsou obvykle chápány jako primární zdroj. Nejznámější skupinou s vysokým obsahem vodíku jsou uhlovodíky, mezi které patří metan, propan, butan, benzín či nafta. Výhodou je možnost

skladování v tlakových nádobách v kapalném stavu při běžných teplotách, vyšší uhlovodíky jako jsou benzín nebo nafta lze skladovat v kapalném stavu jak za běžné teploty, tak i tlaku. Pro aplikace vyžadující čistý vodík je nevýhodou nutná instalace reformeru mezi nádrž se skladovaným uhlovodíkem a palivový článek. [42]

8 Návrh zdroje vodíku na vysoké energetické úrovni

Jedná se o elektrický článek, který pracuje na podobný princip jako studená elektrolýza. V této „buňce“ nedochází k rozložení molekuly vody pomocí procházejícího proudu, ale vlivem působení vysoce proměnného silného elektrického pole. Hlavní výhodou tohoto řešení by mělo být vytvoření nízkoenergetické elektrolýzy. Velikost procházejícího elektrického proudu by měla být nižší než u klasické elektrolýzy a mohla by dosahovat hodnot v miliampérech. Při rozpadu molekuly vody nedochází ke zahřívání kapaliny, a tudíž by nemělo docházet k omezení produkce vodíku v důsledku měnící se teploty vody.

Zvolený systém je vytvoření speciálního sériového kondenzátoru („buňky“) o válcové skladbě, paralelně zapojeného v rezonančním obvodu. Dielektrikem bude H_2O a na každou z mezikruží, bude střídavě přiveden pulz. Tím by mělo dojít k narušení stability a následnému rozpadu molekuly vody. Při pokusu by měla vznikat směs plynů $O_2 + H_2$ v poměru 1:2. Jedna z výhod je, že by voda mohla obsahovat nečistoty a nemusela být více chemicky upravena pro zvýšení účinnosti. Výchozím produktem by neměly být oddělené prvky vodíku a kyslíku, ale optimální směs nasycených plynů, která by měla být určena k přímému spalování. „Buňka“ by měla být ideálně v provozu, kdy je to potřeba. Toto zařízení je určeno pro aplikaci především do spalovacích motorů.

Vytvoření optimálního spínaného zdroje pro vytvoření dostatečného elektrického pole v buňce pro zajištění principu „studené elektrolýzy“ (Studená elektrolýza je elektrolýza, u které se nemění teplota kapaliny při probíhající reakci.). Vytvoření proměnného elektrického pole by bylo na bázi procesorového řízení.

Pomocí této „buňky“ by mohl být vodík jako palivo přiváděn v optimální směsi s kyslíkem do spalovacích motorů a plynových turbín. Vývoj „buňky“ probíhá proto,

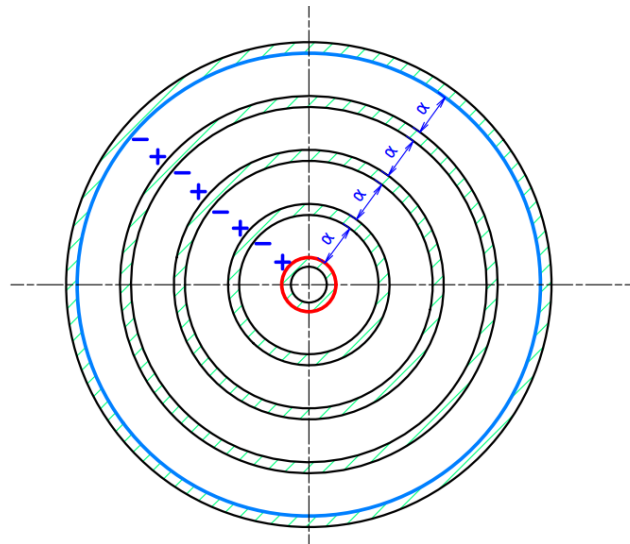
aby bylo umožněno přímé spalování a nemuselo se vynakládat velké množství energie pro kompresorové stlačování.

8.1 Cíle

Cílem práce na této „buňce“ je ověření funkčnosti a zdokonalení „vodního palivového článku“, který si nechal patentovat Stanley Meyer. Navržená „buňka“ by měla pracovat na stejném principu jako Meyerův článek, a to rozložení vody na vodíkové a kyslíkové plyny s nízkou energetickou náročností za pomoci excitační frekvence (Excitační frekvence je frekvence, která umožňuje atomům v molekule se dostat na vyšší energetickou úroveň.). Meyerův patent je nepřesný a nekonkrétní, z toho důvodu jsem se rozhodl na základě jeho principu navrhnout vlastní „buňku“ (dále také kondenzátor nebo zdroj vodíku). Vynálezce odmítl zveřejnit podrobnosti, které by umožnily dalším vědcům duplikovat a zkoumat jeho „vodní palivový článek“. Americkému patentovému úřadu poskytl pouze tolik informací, kolik bylo za potřebí k jejich přesvědčení a získání patentu.

8.2 Stavba

Stěny „buňky“ tvoří uvnitř izolovanou lázeň vody, kde je umístěn souosý trubkovitý systém, který vytváří sériový kondenzátor. Jednotlivé trubky jsou od sebe odděleny určitou vzdáleností, nedotýkají se a tvoří prostor mezikruží. Místo rovnoběžných desek používaných u klasického kondenzátoru jsem použil právě princip soustředných trubek. Dielektrikum „buňky“ tvoří voda. Kapacita kondenzátoru je dána povrchovou plochou trubek a jejich vzdáleností od sebe. Pro správnou funkčnost celé „buňky“ musí být počet trubek ve vodním kondenzátoru lichý. Na každou trubku kondenzátoru bude střídavě přivedené kladné a záporné napětí. V našem případě se jedná o 5, 7 nebo 9 takto středěných trubek.



Obr. 18: Řez kondenzátorem a zobrazení polarity jednotlivých stěn trubek

Použitý materiál musí být z elektricky vodivého materiálu magneticky stabilizovaný, který je chemicky inertní ve vodě. Vnitřní trubky musí mít stejnou šířku stěny a mezi vnitřním průměrem větší trubky a vnějším průměrem menší trubky musí být vždy stejná vzdálenost, aby byl zachován stejný prostor mezikruží, co by mělo zajistit lepší účinnost a funkci celého systému. Pro tuto aplikaci jsem zvolil bezešvé trubky z nerezové oceli. U svařovaných trubek je v místě sváru nanášen jiný materiál, než ze kterého je trubka vyrobena a vytváří nerovnoměrné rozměry stěny, proto jsou voleny bezešvé trubky. Jedná se o ocel 1.4301 nebo 1.4401. O konkrétní typ oceli se rozhodne podle aktuální nabídky, dostupnosti a ceny.

Vnější průměr x síla (mm)	vnitřní průměr (mm)	hmotnost (kg/m)
12,70 x 2,11	8,48	0,58
38,00 x 2,60	32,8	2,305
63,50 x 2,60	58,3	3,965
88,90 x 2,60	83,7	5,618
114,30 x 2,60	109,1	7,272

Tabulka č.3: Rozměry bezešvých nerezových trubek navržené pro konkrétní navrženou „buňku“.

Stěna „buňky“ je tvořena ochrannou trubkou z tvrzeného čirého plexiskla o vnitřním průměru 242 mm a tloušťkou stěny 4 mm. Průhledný materiál byl volen kvůli viditelnosti děje, který by měl probíhat uvnitř „buňky“. Tvrzené plexisklo je

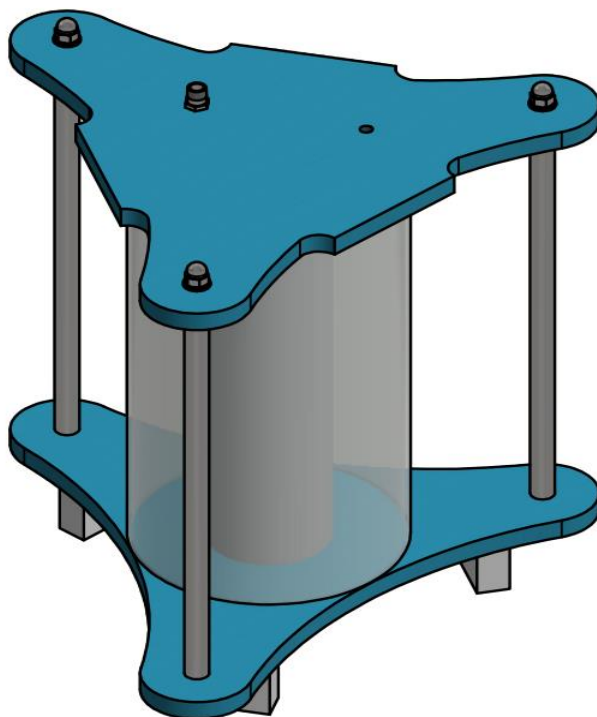
zvoleno, protože nepředpokládáme vysoké hodnoty tlaku uvnitř „buňky“. Ochranná trubka je vsazena a utěsněna mezi dvě víka, které budou vyrobeny ze silonu nebo jiného izolačního materiálu, do kterých budou vysoustružené soustředné drážky hluboké 8 mm pro kondenzátor a ochrannou trubku. Drážky budou vysoustruženy pro uložení s přesahem.

V horním víku budou vyvrtané otvory pro odebírání odcházející směsi plynu, kde bude instalován separátor vlhkosti, otvor pro manometr s normalizovaným trubkovým závitem G1/4 a otvor pro doplňování vody. Ve spodním víku bude umístěna výpust, jako bezpečnostní prvek, pro případ potřeby okamžitého vypuštění vody z nádoby, čímž se okamžitě zastaví reakce. V dolní části trubek kondenzátoru budou vyvrtány vždy dva otvory, aby se voda dostala do mezikruží. Mimo pracovní prostor „buňky“ bude ve třech rozích horního i dolního víka vyvrtán otvor pro závitové tyče, které budou víka držet pevně spojené. Systém bude uložen na pevném podstavci pro lepší stabilitu, možnost na závitové tyče našroubovat kloboukové matice a pro umístění výpusti do spodního víka. Pro minimální ovlivnění polaritu uvnitř „buňky“ budou všechny výpustě a vývody z jednotného materiálu, a to z nerez, jako trubky kondenzátoru.

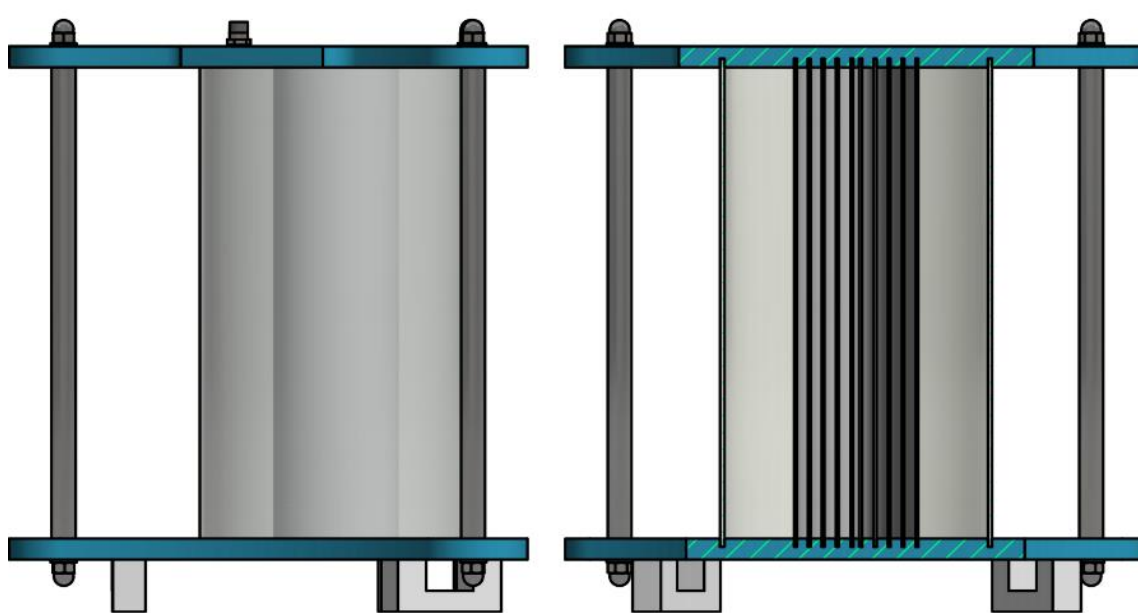
Výška celého systému bude maximálně 600 mm, záleží na velikosti podstavce. Vnitřní pracovní prostor bude 450 mm.

V obvodu s „buňkou“, který bude uveden do procesu, musí být instalovaná dioda, která bude fungovat jako blokovací dioda a elektrický spínač. Bude umožňovat toku napětí průchod pouze jedním směrem a tím na trubkách kondenzátoru nevznikne opačná polarita.

Funkce diody jako elektrického spínače umožňuje „zhroucení“ magnetického pole vytvořeného v induktoru, tím zdvojnásobí pulzní frekvenci a zabraní vybití kondenzátoru. Tím se vytvoří kontinuální napětí mezi trubkami a kondenzátor se nebude vybit. Molekuly vody jsou tak stále vystaveny působení elektrického pole, dokud nedojde k rozpadu kovalentní vazby.



Obr. 19: Konstrukce „buňky“



Obr. 20: Boční pohled vlevo a řez „buňkou“ vpravo

8.3 Princip

Zdroj vodíku by měl, za pomoci vysokého pulzního napětí, úspěšně rozložit obyčejnou vodu z vodovodu na základní prvky, kyslík a vodík. Samozřejmě s příměsí dalších látek, které jsou v obyčejné vodě rozpuštěny. Tím jsou na mysli například

minerály, chlór a další. „Buňka“ by měla fungovat na principu studené elektrolýzy s tím rozdílem, že kde elektrolýza vody využívá průchod proudu v jednotkách ampérů, tam by měl v buňce se stejným účinkem procházet proud měřitelný v miliampérech. Další výhodou by mělo být, že voda by nevyžadovala příměs elektrolytu jako je kyselina sírová, která se využívá v konvenční elektrolýze pro podporu vedení proudu. „Buňka“ by měla fungovat s vyšší účinností s čistou vodou. V izolované vodní lázni dochází k elektrickému úniku díky zbytkové vodivosti, nečistotám a iontům, které se mohou ve vodě vyskytovat. Kondenzátor výhodně chemicky nereaguje s vodou, vodíkem, kyslíkem ani s prvky obsaženými ve vodě. V buňce přebírá náboj molekula vody a náboj se zvyšuje. V důsledku působení náboje aplikovaný deskami se síla stává větší než síla kovalentních vazeb. Tímto procesem se má docílit zrušení kovalentní vazby. tzn. Přerušení elektrické nebo elektromagnetické síly, která váže atomy vodíku a kyslíku v molekule, aby se jednotlivé prvky oddělily.

Další výhodou oproti konvenční elektrolýze by měla být rychlost nástupu tvorby plynné směsi. Zatímco u elektrolýzy se náběhový čas pohybuje často v rámci minut, „buňka“ by měla být schopna začít vytvářet vodík po několika vteřinách. Proto by měla být ideální aplikace společně s obnovitelnými zdroji.

Další nespornou výhodou je, že štěpící mechanismus vodního palivového článku vyvíjí malé množství tepla v porovnání s konvenční elektrolýzou s vysokým proudem, kde se elektrolyt zahřívá rychle a je nutné ho chladit. Nejenže všechny kovové součásti trubkového kondenzátoru by měly mít konstantní teplotu i po delší době provozu, ale soustava by měla odvádět pouze malé množství ztrátové tepelné energie, a to by mělo zvýšit účinnost celého systému.

V tomto procesu jsou elektrony extrahovány z vodní lázně. Elektrony nejsou spotřebovávány ani nejsou vedeny do „buňky“ elektrickým obvodem jako bývá u elektrolýzy. Přesto může docházet k úniku proudu skrz vodu. Atomy vodíku, kterým chybí elektrony se neutralizují a jsou uvolňovány z vody. Nabité atomy a elektrony jsou přitahovány k napěťovým oblastem opačné polarity. Elektrony, které byly sdílené mezi atomy v molekule v kovalentní vazbě jsou přerozděleny tak, že se

uvolňují elementární plyny z vody, které stoupají vzhůru, kde jsou odváděny nebo odčerpávány.

Způsob uvolňování plynné směsi z vody zahrnující vodík, kyslík a další rozpuštěné látky dříve zachycené ve vodě by měl probíhat v následujících šesti krocích.

- A) Výchozí pozice, ve které je voda jako dielektrická kapalina obsažena mezi jednotlivými deskami kondenzátoru. Molekuly vody jsou chaoticky orientovány. Do sestavy není přiváděno žádné napětí, ani proud.
- B) Kondenzátor uvnitř „buňky“ je vystaven pulznímu poli elektrického napětí, přičemž jednotlivé soustředné trubky kondenzátoru jsou střídavě kladně a záporně orientovány. Za pomoci zvyšující se napěťových pulzů, kterým je kapalina vystavena, se náhodně orientované molekuly vody v kapalném stavu otáčejí a zarovnají vzhledem k polární orientaci desek kondenzátoru. Dva atomy vodíku jsou kladně elektricky nabitě a jsou přitahovány k zápornému napěťovému poli, zatímco atom kyslíku je ve srovnání s nimi záporně nabitý a je přitahován ke kladnému napěťovému poli atomem kyslíku. Polarita napětí na trubkách, které vytvářejí elektrické pole, zůstává konstantní, i při zvyšování náboje. V elektrickém poli desek vodního kondenzátoru se tedy současně tvoří oblasti kladného a záporného napětí.
- C) Kondenzátor je vystaven stále se zvyšujícímu pulznímu elektrickému poli, za účelem dosažení takové pulzní frekvence, která indukuje v molekulách vody rezonanci. V důsledku postupného nabíjení kondenzátoru je molekula vody vystavena stále zvyšujícímu se rozdílu potenciálu na deskách. Tím se zvyšuje také síla, kterou jsou atomy přitahovány k trubkám kondenzátoru.
- D) Pokračování aplikace pulzního elektrického pole na molekuly vody v kondenzátoru, poté co dojde k dosažení rezonanční frekvence. Molekuly vystavené rezonančním pulzům se prodlužují a jsou přitahovány stále větší silou k opačně elektricky nabitým deskám kondenzátoru.
- E) Udržením náboje kondenzátoru během působení pulzujícího pole má za následek destabilizaci kovalentní vazby mezi atomy vodíku a kyslíkem v molekule. Síla elektrického pole přesahuje vazebnou sílu molekuly. To má

za následek disociaci atomů a molekula vody se rozpadá na elementární složky v podobě plynů vodíku a kyslíku.

F) Elementární plyny se shromažďují ve vrchní části „buňky“ nad vodní hladinou a následně odcházejí jako směs palivových plynů pro další využití.

8.4 Analýza budoucího využití

Při ověření funkčnosti a zdokonalení stavby vyvíjené „buňky“ by se mohlo jednat v budoucím využití o nahrazení fosilních paliv ve spalovacích motorech. Motor upraven pro spalování ideální směsi plynů vodíku a kyslíku tvořenou v „buňce“ by mohl být hermeticky uzavřen. Tudíž by motor byl dokonale izolovaný, vzduchotěsný a nepotřeboval by přívod vzduchu do prostoru motoru, aby se s palivem mísil. To by s sebou neslo spoustu výhod, například by to umožnilo práci motoru i v oblastech, kde vzduch není.

Při ověření generování vodíku by se nabízela možnost, do budoucna využití pro výrobu i dalších prvků a palivových směsí. Technologie by neměla zůstat zaměřená pouze na vodík a měla by být rozšířena i v dalších aplikacích a odvětvích průmyslu.

Závěr

V této bakalářské práci byly nejprve popsány kolísavé obnovitelné zdroje energie a jejich problematika s přerušovanými dodávkami elektrické energie do sítě, a také způsoby akumulace elektrické energie z těchto zdrojů. Následně byla popsána technologie zvaná Power to gas, která se zabývá procesem výroby vodíku z obnovitelných zdrojů až po jeho následné využití nebo skladování. Dále byl rozebrán vodík jako prvek a podrobně analyzována jeho výroba pomocí elektrolýzy, jeho způsoby využití, a především byly rozebrány technologie akumulace a skladování vodíku. V závěrečné části práce jsem se zabýval návrhem systému na výrobu vodíku, za účelem využití ve spalovacích motorech. Technologie by využívala schopnost tvořit ideální směs vodíku a kyslíku prakticky okamžitě, čímž by jeho využití bylo ideální společně s obnovitelnými zdroji energie. Návrh systému se zabývá stavbou konkrétní „buňky“, jejím principem a analyzováním budoucího využití v praxi.

Ve vodíku je skrytý obrovský potenciál jako palivo i zdroj energie. Přestože v dnešní době existuje hned několik možností na výrobu vodíku a jeho následné skladování, většina z nich jsou bohužel energeticky a ekonomicky náročné. Navíc se často vyznačují ne příliš vysokou účinností. V současnosti stále nemáme technologie, pomocí kterých bychom mohli vodík akumulovat i po delší dobu a bez vysokých ztrát. Jedním z možných důvodů, proč již nevyužíváme vodík ve velkém je, že jako jakákoliv nová technologie se potýká s problémy implementace a proražením na daném trhu, například v automobilovém průmyslu nebo výrobě elektrické energie. Existuje mnoho vyvíjených technologií, ať už se jedná o výrobu pomocí elektrolýzy nebo akumulaci, jako jsou uhlíkové nanotrubičky nebo skleněné mikrokuličky a další, díky kterým se vodíkový průmysl stále rozšiřuje a zdokonaluje, a které dávají naději, že již v blízké budoucnosti budeme vodík považovat za běžné palivo. Bohužel v současné době o něm takto mluvit nemůžeme, a i nadále zůstává palivem budoucnosti.

I přestože je vodík stále považován za palivo budoucnosti, jsou odvětví průmyslu, kde je nenahraditelný. Týká se to zejména jeho využití v zemědělství, průmyslu a v procesu metanizace. Většina vodíku v těchto aplikacích je vyráběna z fosilních

paliv s uhlíkovou stopou, protože ekologická cesta k získávání vodíku je prozatím výrazně ekonomicky náročnější. Troufám si říct, že pokud se nenajde jiný zdroj energie, který by dokázal svou dostupností a efektivitou výroby překonat vodík, zůstane již zmíněný prvek dále nadějí a tím rozhodujícím palivem budoucnosti v oblasti energetiky a mobility.

Seznam použitých zdrojů

- [1] VOBOŘIL, David. *Větrné elektrárny - princip, rozdělení, elektrárny v ČR* [online]. Třebíč, 2015 [cit. 2021-5-6]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/typy-elektraren/vetrne-elektrarny-princip-cinnosti-zakladni-rozdeleni>
- [2] SKUPINA ČEZ: *Jak funguje větrná elektrárna* [online]. Praha, 2021 [cit. 2021-5-6]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobnizdroje/obnovitelne-zdroje/vitr/jak-funguje-vetrna-elektrarna>
- [3] *Česká společnost pro větrnou energii: Velikost větrné elektrárny a její vývoj* [online]. Praha, 2021 [cit. 2021-5-6]. Dostupné z: <https://csve.cz/cz/clanky/velikost-vetrne-elektrarny-a-jeji-vyvoj/110>
- [4] *Česká společnost pro větrnou energii: Statistika* [online]. Praha, 2021 [cit. 2021-5-6]. Dostupné z: <https://csve.cz/cz/clanky/statistika/281>
- [5] *Isofenenergy: Fotovoltaika v podmínkách České republiky* [online]. České Budějovice, 2009 [cit. 2021-5-6]. Dostupné z: <http://www.isofenenergy.cz/slunecni-zareni-v-cr.aspx>
- [6] VOBOŘIL, David. *Fotovoltaické elektrárny - princip funkce a součásti, elektrárny v ČR* [online]. Třebíč, 2016 [cit. 2021-5-6]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje-energie/fotovoltaicka-elektrarna-princip-funkce-a-soucasti>
- [7] VOBOŘIL, David. *Přečerpávací vodní elektrárny v České republice* [online]. Třebíč, 2017 [cit. 2021-5-6]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrarny-cr/precerpavaci-vodni-elektrarny-v-ceske-republice>
- [8] BUDÍN, Jan. *Přečerpávací vodní elektrárna - princip a uspořádání* [online]. Třebíč, 2015 [cit. 2021-5-6]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/typy-elektraren/precerpavaci-vodni-elektrarna-princip-usporadani-2>

- [9] ELSNER, Petr. *Akumulace energie z obnovitelných zdrojů* [online]. Nová Paka, 2015 [cit. 2021-5-6]. Dostupné z: http://stretch.fs.cvut.cz/2015/sbornik_2015/0750.pdf. Integrovaná střední škola, Nová Paka.
- [10] MURTINGER, Karel. Ukládání elektřiny z fotovoltaických a větrných elektráren. *Narrative Media s.r.o.: nazeleno* [online]. Brno, 2011 [cit. 2021-5-6]. ISSN 1803-4160. Dostupné z: <https://www.nazeleno.cz/energie/energetika/ukladani-elektriny-z-fotovoltaickych-a-vetrnych-elektraren.aspx>
- [11] DVOŘÁK, Petr Dvořák. *Akumulace elektřiny* [online]. Brno, 2011 [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/7435-akumulace-elektriny>
- [12] CESTY K AKUMULACI ELEKTRICKÉ ENERGIE. *SKUPINA ČEZ* [online]. Praha, 2007 [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/06/cesty_1.html
- [13] How does the Lead Acid Battery Work? *Batteries in a Portable World: A Handbook on Rechargeable Batteries for Non-engineers*. 3. vyd. Richmond: Cadex Electronics, 2011, Chapter 2. ISBN 978-0968211830.
- [14] AKUMULACE ENERGIE: VÝKLAD. *SVĚT ENERGIE* [online]. Praha, 2020 [cit. 2021-5-7]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/decentralizovana-energetika/decentralizovane-energeticke-zdroje-podrobne/akumulace-energie/vyklad>
- [15] WAGNER, Vladimír. *Velký přehled: Využívané i perspektivní technologie akumulace energie* [online]. Třebíč, 2018 [cit. 2021-5-6]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/akumulace-energie/velky-prehled-vyuzivane-i-perspektivni-technologie-akumulace-energie>

- [16] HAMMERBAUER, Jiří. *Akumulátory NiFe a NiCd* [online]. 2017, 1-41 [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: http://www.malavoda.cz/akum_nife_nicd.pdf
- [17] DUFKOVÁ, Marie. *Li-ion baterie* [online]. Tábor, 2015 [cit. 2021-5-7]. ISSN 2464-7888. Dostupné z: <https://www.3pol.cz/cz/rubriky/prakticke-informace/1677-li-ion-baterie>
- [18] REICHL, Tomáš. *Průtoková baterie* [online]. Třebíč, 2015 [cit. 2021-5-6]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektroenergetika/prutokova-baterie>
- [19] MOLEK, Tomáš. Supravodivost - princip a využití. *OEnergetice.cz* [online]. Třebíč, 2015 [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektroenergetika/supravodivost-princip-a-vyuziti>
- [20] PATEL, Sonal. Why Power-to-Gas May Flourish in a Renewables-Heavy World. *POWER* [online]. Rockville, 2019 [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: <https://www.powermag.com/why-power-to-gas-may-flourish-in-a-renewables-heavy-world/>
- [21] VOBOŘIL, David. Power to Gas - budoucnost akumulace elektřiny? *OEnergetice.cz* [online]. Třebíč, 2015 [cit. 2021-4-24]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/power-to-gas-budoucnost-akumulace-elektriny>
- [22] DOS SANTOS, Dorothee. Power-to-Gas: Potenziale, Grenzen und Geschäftsmodelle. *EUWID Neue Energie* [online]. 2021 [cit. 2021-4-24]. Dostupné z: <https://www.euwid-energie.de/dossier-power-to-gas-fuer-die-energiewende/>
- [23] VOHLÍDAL, Jiří. *Chemické a analytické tabulky*. Praha: Grada, 1999. ISBN 978- 80-7169-855-5.
- [24] WINTER, Mark. *Hydrogen: the essentials* [online]. Sheffield, 2021 [cit. 2021-5-6]. Dostupné z: <https://www.webelements.com/hydrogen/>
- [25] TUČEK, Vít, Ludmila DVOŘÁKOVÁ a Jiří HANZAL. *Vodík* [online]. Praha: ČESKÁ ASOCIACE TECHNICKÝCH PLYNŮ, 2004 [cit. 2021-5-14]. Dostupné

z: <https://docplayer.cz/2266532-Ceska-asociace-technickych-plynu-rada-informace-normy-predpisy-vodik-1-uvod-2-fyzikalne-chemicke-vlastnosti.html>

- [26] WINTER, Mark. *Hydrogen: the essentials: Hydrogen: historical information* [online]. Sheffield, 2021 [cit. 2021-5-6]. Dostupné z: <https://www.webelements.com/hydrogen/history.html>
- [27] PANDIYAN, Arunkumar, Aarthi UTHAYAKUMAR, Rengaraj SUBRAYAN, Suk Won CHA a Suresh Babu KRISHNA MOORTHY. Review of solid oxide electrolysis cells: a clean energy strategy for hydrogen generation. *Nanomaterials and Energy* [online]. 2019, **8**(1), 2-22 [cit. 2021-4-24]. ISSN 2045-9831. Dostupné z: doi:10.1680/jnaen.18.00009
- [28] GÖTZ, Manuel, Jonathan LEFEBVRE, Friedemann MÖRS, Amy MCDANIEL KOCH, Frank GRAF, Siegfried BAJOHR, Rainer REIMERT a Thomas KOLB. Renewable Power-to-Gas: A technological and economic review. *Renewable Energy* [online]. 2016, **85**, 1371-1390 [cit. 2021-5-14]. ISSN 09601481. Dostupné z: doi:10.1016/j.renene.2015.07.066
- [29] BRAUNS, Jörn a Thomas TUREK. Alkaline Water Electrolysis Powered by Renewable Energy: A Review. *Processes* [online]. 2020, **8**(2) [cit. 2021-5-14]. ISSN 2227-9717. Dostupné z: doi:10.3390/pr8020248
- [30] GAHLEITNER, Gerda. Hydrogen from renewable electricity: An international review of power-to-gas pilot plants for stationary applications. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2013, **38**(5), 2039-2061 [cit. 2021-5-14]. ISSN 03603199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2012.12.010
- [31] SCHAAF, Tanja, Jochen GRÜNIG, Markus Roman SCHUSTER, Tobias ROTHENFLUH a Andreas ORTH. Methanation of CO₂ - storage of renewable energy in a gas distribution system. *Energy, Sustainability and Society* [online]. 2014, **4**(1) [cit. 2021-5-7]. ISSN 2192-0567. Dostupné z: doi:10.1186/s13705-014-0029-1

- [32] POWER. Methanation of CO₂: Storage of Renewable Energy in a Gas Distribution System. *POWER: News & Technology for the Global Energy Industry* [online]. Rockville, 2013 [cit. 2021-5-7]. Dostupné z: <https://www.powermag.com/methanation-of-co2-storage-of-renewable-energy-in-a-gas-distribution-system/>
- [33] CALBRY-MUZYKA, Adelaide S. a Tilman J. SCHILDHAUER. Direct Methanation of Biogas—Technical Challenges and Recent Progress. *Frontiers in Energy Research* [online]. 2020, **8** [cit. 2021-5-6]. ISSN 2296-598X. Dostupné z: doi:10.3389/fenrg.2020.570887
- [34] NOLAN, Eamon, Alan J. ALEXANDER a Hailey F. PHILLIPS. *Hydrogen Applications and Usage* [online]. 2020, 1 [cit. 2021-4-24]. Dostupné z: <https://www.velaw.com/insights/hydrogen-applications-and-usage/>
- [35] MAXA, Daniel. *Hydrogenační rafinace* [online]. Praha, 2007 [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: <http://www.petroleum.cz/zpracovani/zpracovani-ropy-19.aspx>
- [36] EIA. *Hydrogen explained: Use of hydrogen* [online]. Washington D.C., 2021 [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: <https://www.eia.gov/energyexplained/hydrogen/use-of-hydrogen.php>
- [37] MESGUEN, JP., J. BIDON a L. LELONG. *Applications: Uses hydrogen* [online]. Birmingham, 2005 [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: <https://energies.airliquide.com/resources-planet-hydrogen/uses-hydrogen>
- [39] DLOUHÝ, Petr a Luděk JANÍK. Skladování vodíku I. *Česká vodíková technologická platforma* [online]. Husinec-Řež, 2007 [cit. 2021-4-24]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/transport-a-skladovani-vodiku/618-skladovani-vodiku-i>
- [40] ŠVÁB, Michal. *TRENDY VE VÝVOJI VODÍKOVÉHO HOSPODÁŘSTVÍ: VE SVĚTĚ A MOŽNOSTI UPLATNĚNÍ V ČESKÉ REPUBLICE* [online]. Praha: ČESKÁ

- ENERGETICKÁ AGENTURA, 2006 [cit. 2021-5-14]. Dostupné z:
<https://www.mpo-efekt.cz/dokument/01.pdf>
- [41] KRISHNA, Rahul, Elby TITUS, Maryam SALIMIAN, et al. Hydrogen Storage for Energy Application. *Hydrogen Storage* [online]. InTech, 2012 [cit. 2021-4-24]. ISBN 978-953-51-0731-6. Dostupné z: doi:10.5772/51238
- [42] DLOUHÝ, Petr a Luděk JANÍK. Skladování vodíku II. *Česká vodíková technologická platforma* [online]. Husinec-Řež, 2007 [cit. 2021-4-24]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/transport-a-skladovani-vodiku/620-skladovani-vodiku-ii>
- [43] ARES, José R. *Hydrogen storage in metal hydrides* [online]. Madrid, 2019 [cit. 2021-5-14]. Dostupné z:
<https://www.norvento.com/en/blog/hydrogen-storage/>
- [44] FERNANDEZ, Asuncion, Carlos SANCHEZ, O. FRIEDRICHS, J.R. ARES, Fabrice LEARDINI, J. BODEGA a J.F. FERNÁNDEZ. Hidruros sólidos como acumuladores de hidrógeno. *Revista Española de Física* [online]. 2010, **24**, 63-68 [cit. 2021-5-14]. Dostupné z:
<https://aprenderly.com/doc/2835571/hidruros-s%C3%B3lidos-como-acumuladores-de-hidr%C3%B3geno>
- [45] SOLOVEICHIK, Grigorii L. *Metal Borohydrides as Hydrogen Storage Materials* [online]. Washington D.C., 2007 [cit. 2021-5-6]. Dostupné z:
<https://www.sigmaaldrich.com/technical-documents/articles/material-matters/metal-borohydrides.html>
- [46] LIU, Xiuying, Jie HE a Rui LI. High-Pressure Hydrogen Adsorption in the Zeolites: A Grand Canonical Monte Carlo Study. *ISRN Renewable Energy* [online]. 2012, 1-4 [cit. 2021-5-6]. ISSN 2090-746X. Dostupné z: doi:10.5402/2012/491396
- [47] NIKITIN, Anton, Xiaolin LI, Zhiyong ZHANG, Hirohito OGASAWARA, Hongjie DAI a Anders NILSSON. Hydrogen Storage in Carbon Nanotubes

- through the Formation of Stable C–H Bonds. *Nano Letters* [online]. 2008, **8**(1), 162-167 [cit. 2021-5-14]. ISSN 1530-6984. Dostupné z: doi:10.1021/nl072325k
- [48] MOHAN, Man, Vinod Kumar SHARMA, E. Anil KUMAR a V. GAYATHRI. Hydrogen storage in carbon materials—A review. *Energy Storage* [online]. 2019, **1**(2) [cit. 2021-4-24]. ISSN 2578-4862. Dostupné z: doi:10.1002/est2.35
- [49] DROBNÝ, Josef. *Skladování vodíku* [online]. Děčín, 2019 [cit. 2021-5-6]. Dostupné z: <https://www.hydro-race.eu/Skladov%C3%A1n%C3%AD-vod%C3%ADku>
- [50] NOS, Filip. *Jaký je vývoj fotovoltaiky v České republice? A jak si stojíme v Evropě?* [online]. Praha, 2018 [cit. 2021-5-6]. Dostupné z: <https://www.estav.cz/cz/6385.jaky-je-vyvoj-fotovoltaiky-v-ceske-republice-a-jak-si-stojime-v-evrope>
- [51] BUFKA, Aleš a Jana VEVERKOVÁ. *Podíl obnovitelných zdrojů energie na hrubé konečné spotřebě energie 2010–2018* [online]. Praha, 2019, s. 12 [cit. 2021-5-6]. Dostupné z: https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/statistika/obnovitelne-zdroje-energie/2019/12/Podil-OZE-na-hrube-konecne-spotrebe-energie-2010-2018_1.pdf
- [52] HAUCH, A., R. KÜNGAS, P. BLENNOW, A. B. HANSEN, J. B. HANSEN, B. V. MATHIESEN a M. B. MOGENSEN. Recent advances in solid oxide cell technology for electrolysis. *Science* [online]. 2020, **370**(6513) [cit. 2021-5-14]. ISSN 0036-8075. Dostupné z: doi:10.1126/science.aba6118
- [53] Výzkumné a vývojové centrum obnovitelných zdrojů a elektromobility s.r.o.

Seznam obrázků

Obr. 1: Graf znázorňující vývoj podílu obnovitelných zdrojů energie na hrubé konečné spotřebě energie v České republice v letech 1960-2018, zdroj [51]

Obr. 2: Graf znázorňující celkovou instalovanou kapacitu větrných elektráren v České republice v letech 2003-2020, zdroj [4]

Obr. 3: Roční úhrn globálního slunečního záření v ČR [kW/m^2]; zdroj [5]

Obr. 4: Graf vývoje fotovoltaických elektráren v České republice v letech 2002-2017, zdroj [50]

Obr. 5: Závislost účinnosti na životnosti pro jednotlivé typy akumulace energie, zdroj [11]

Obr. 6: Setrvačnickový akumulátor s rotorem z uhlíkového kompozitu zavěšeného v magnetických ložiskách, otáčejícím se rychlostí 100 000 otáček za minutu. zdroj [12]

Obr. 7: Power to Gas v zásadě zahrnuje použití elektrolyzéry k rozdělení vody na kyslík a vodík. Vodík může být použit přímo nebo přiváděn do řady procesů, zdroj [20]

Obr. 8: Schéma elektrolyzéry alkalické vody, zdroj [29]

Obr. 9: Pracovní princip SOFC (vlevo) a SOEC (vpravo), zdroj [5]

Obr. 10: Elektrolyzér SOEC: Od nanoměřítko po makroměřítko., zdroj [52]

Obr. 11: Schéma hydrogenační rafinace benzínu, zdroj [35]

Obr. 12: Složení tlakové nádoby pro skladování vodíku v plynném skupenství, zdroj [39]

Obr. 13: Vodíkové nádrže používané v současnosti ve vozidlech na vodíkový pohon, zdroj [41]

Obr. 14: Systém vysokotlaké nádrže na kapalný vodík, zdroj [41]

Obr. 15: Kompletní diagram skladování vodíku v hydridech kovů a materiálech na bázi uhlíku, zdroj [41]

Obr. 16: Jednotková buňka zeolitu sodného s klecí a dutinou, zdroj [41]

Obr. 17: Hydrogenace v uhlíkových nanotrubicích – tvorba stabilních C-H vazeb, zdroj [47]

Obr. 18: Řez kondenzátorem a zobrazení polaritý jednotlivých stěn trubek

Obr. 19: Konstrukce „buňky“

Obr. 20: Boční pohled vlevo a řez „buňkou“ vpravo

Seznam tabulek

Tabulka č.1: Výroba z větrných elektráren v jednotlivých měsících v MWh v letech 2015-2020, zdroj [4]

Tabulka č.2: Gravimetrická a objemová hustota různých hydridů ve srovnání s hustotou kapalného vodíku a plynného vodíku při vysokém tlaku. Hmotnost kontejneru není zohledněna, zdroj [43]

Tabulka č.3: Rozměry bezešvých nerezových trubek navržené pro konkrétní navrženou „buňku“.