



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

AKUMULACE ELEKTRICKÉ ENERGIE POMOCÍ TECHNOLOGIÍ POWER TO GAS

ELECTRICITY STORAGE WITH POWER TO GAS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Zuzana Bartlíková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání diplomové práce

Ústav:	Energetický ústav
Studentka:	Bc. Zuzana Bartlíková
Studijní program:	Energetické a termofluidní inženýrství
Studijní obor:	Energetické inženýrství
Vedoucí práce:	doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.
Akademický rok:	2021/22

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

Akumulace elektrické energie pomocí technologií Power to gas

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Syntetické plyny jsou jednou z možností akumulace elektřiny. Na vstupu do technologie je elektrická energie získaná většinou z obnovitelných zdrojů (fotovoltaika, vítr) a na výstupu je hořlavý plyn, který je možné skladovat a následně využít v konvenčních zařízeních. Náplní práce je přehled možných technologií Power to gas a jejich detailní rozbor a bilanční výpočet.

Cíle diplomové práce:

- přehled technologií Power to gas,
- detailní popis technologií,
- bilanční výpočty vybraných technologií.

Seznam doporučené literatury:

QUASCHNING, Volker. Obnovitelné zdroje energií. Praha. Grada, 2010. Stavitel. ISBN 978-80-247-3250-3.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá akumulací elektrické energie pomocí technologie power to gas (P2G). Práce je rozdělena na dvě části. V první části je popsán celý systém od výroby elektrické energie, přes vodu až po výrobu vodíku dostupnými technologiemi a jeho následné možnosti využití. U jednotlivých částí P2G systému jsou popsány jejich provozní podmínky, výhody, nevýhody i účinnost. Druhá část práce je praktická. Je vybráno několik možných využití vyrobeného vodíku a je stanovena výsledná účinnost těchto P2G systémů. Na závěr je určité využití vyrobeného vodíku porovnáno z energetického hlediska se systémem, který je v současné době využíván k akumulaci elektrické energie.

Klíčová slova

Power to gas, akumulace, vodík, výroba vodíku, metanizace, přečerpávací vodní elektrárna

ABSTRACT

This diploma thesis deals with accumulation of electricity energy using power to gas technology (P2G). The thesis is divided into two parts. The first part describes the whole system from the production of electricity, through water to the production of hydrogen by available technologies and possibilities of using hydrogen. For individual parts of the P2G system are described their operating conditions, advantages, disadvantages and efficiency. The second part of the thesis is practical. Several possible uses of hydrogen produced and the efficiency result of these P2G systems are determined. Finally, there is one use of the hydrogen produced which is compared from the energy point of view with the system that is currently used to store electricity.

Key words

Power to gas, accumulation, hydrogen, hydrogen produce, pumped hydro power plant

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BARTLÍKOVÁ, Zuzana. *Akumulace elektrické energie pomocí technologií Power to gas* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/139409>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Marek Baláš.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem *diplomovou* práci na téma **Akumulace elektrické energie pomocí technologií Power to gas** vypracoval(a) samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Jméno a příjmení

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto doc. Ing. Marku Balášovi Ph.D za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce.

OBSAH

ÚVOD.....	11
1 Elektrická energie.....	12
1.1 Elektřina z obnovitelných zdrojů.....	12
1.2 Akumulace elektrické energie.....	13
1.2.1 Přečerpávací vodní elektrárny.....	14
1.2.2 Supravodivé indukční akumulátory.....	15
1.2.3 Elektrochemická akumulátory.....	15
1.2.4 Akumulace do tepla.....	15
2 Voda – H ₂ O.....	16
2.1 Fyzikální a chemické vlastnosti.....	16
2.2 Tvrdost vody.....	16
2.3 Čištění vody.....	17
3 Vodík – H ₂	19
3.1 Fyzikální a chemické vlastnosti.....	19
3.2 Využití vodíku.....	20
3.3 Skladování vodíku.....	21
3.3.1 Skladování v plynné fázi.....	21
3.3.2 Skladování v kapalně fázi.....	21
3.3.3 Skladování v pevně fázi.....	22
3.3.4 Skladování v jeskyních.....	22
3.4 Převaha vodíku.....	22
4 Výroba vodíku.....	24
4.1 Produkce vodíku z fosilních paliv.....	24
4.1.1 Parní reforming.....	25
4.1.2 Parciální oxidace.....	26
4.1.3 Autotermální reformování.....	26
4.1.4 Pyrolýza uhlovodíku.....	27
4.2 Produkce vodíku z biomasy.....	27
4.2.1 Termochemické procesy.....	27
4.2.2 Biologické procesy.....	29
4.3 Štěpení vody.....	31
4.3.1 Elektrolýza.....	31
4.3.2 Termolýza.....	34
4.3.3 Foto-elektrolýza.....	34
4.4 Porovnání jednotlivých procesů.....	35
5 Power to gas.....	38
5.1 Metanizace.....	38
5.2 Použití vyrobeného vodíku nebo methanu.....	39
5.2.1 Průmysl.....	40
5.2.2 Přidávání do zemního plynu.....	40

5.2.3	Palivové články	41
5.2.4	Vodíková mobilita	43
6	Energetická účinnost jednotlivých přeměn	46
6.1	Společné zásady	46
6.1.1	Přenos elektrické energie	46
6.1.2	Výroba vodíku	47
6.1.3	Přeprava a skladování vodíku	50
6.2	Palivový článek	53
6.3	Vodíkový automobil	56
6.4	Metanizace a následné vtlačení do sítě zemního plynu	58
6.5	Zhodnocení	59
7	Energetická bilance v porovnání s PVE Dlouhé stráně	61
7.1	Energetická bilance PVE Dlouhé stráně	61
7.2	Energetická bilance systému P2G	65
7.2.1	Jednotlivé komponenty systému P2G	66
7.3	Porovnání způsobů akumulace	71
	ZÁVĚR	74
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	76
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	82
	SEZNAM OBRÁZKŮ	83
	SEZNAM TABULEK	85

ÚVOD

V současné době se hodně hovoří o zpomalení globálního oteplování a tzv. dekarbonizaci s následným zvýšením podílu obnovitelných zdrojů v energetickém mixu jednotlivých zemí, potažmo celého světa. Přechod od uhlí k obnovitelným zdrojům s sebou nese spoustu rizik, protože se jedná o tzv. nestabilní zdroje (jsou závislé na aktuálních podmínkách slunce, větru apod.). Na takové zdroje není současná elektrizační síť připravena a bude třeba instalovat více akumulací prvků, které zajistí její bezproblémový chod.

Chemické skladování elektrické energie bylo navrženo jako klíčové řešení vedoucí k eliminaci fosilního uhlíku ze všech energetických odvětví včetně průmyslu, dopravy, vytápění atd. Power to gas systém (P2G) pracuje právě na principu skladování chemické energie. Z nadbytečné elektrické energie z obnovitelných zdrojů vyrobíme pomocí elektrolýzy vody tzv. zelený vodík. Ten lze následně přeměnit na syntetický metan. Vodík nebo metan můžeme využít ve všech energetických odvětvích, od průmyslu přes energetiku až k dopravě. Mimo jiné by se také mohlo jednat o možný akumulační prvek, který by sloužil ke stabilizaci elektrizační sítě.

Cílem této diplomové práce je provést přehled technologií power to gas. Na vstupu do technologie je přebytečná energie z obnovitelných zdrojů využita k výrobě vodíku pomocí elektrolýzy vody. Vodík je nejčistší palivo s velmi vysokým energetickým obsahem a při jeho spalování nedochází k produkci škodlivých látek, včetně skleníkových plynů. Lze jej vyrábět z fosilních paliv, biomasy nebo štěpením vody. Jak již bylo zmíněné štěpení vody, konkrétně elektrolýza, je pro systém P2G klíčová. Využití vyrobeného vodíku je spousta. Lze jej využít např. v průmyslu, ke zpětné výrobě elektřiny pomocí palivových článků, ve vodíkové mobilitě nebo metanizací vyrobit syntetický metan a ten dále využít např. vtačením do sítě zemního plynu.

Mimo přehledu technologií P2G je cílem diplomové práce celý systém detailně popsat a provést bilanční výpočet technologií. Na závěr je dle získaných informací, stanovené účinnosti, výhod a nevýhod zhodnocen celý systém. Pro lepší představu je vybraný P2G systém porovnán se známou akumulační technologií elektrické energie.

1 Elektrická energie

Elektrická energie se získává přeměnou z jiného druhu energie. Nemusí se jednat o přímou přeměnu energie, ale může obsahovat různé mezistupně. Např. při spalování se mění chemická energie, přes tepelnou energii, na mechanickou. Mechanická energie se pomocí elektrických strojů (generátory, alternátory) mění na elektřinu. Jedná se o čistou univerzální energii, kterou lze dopravovat i na velké vzdálenosti s relativně malými ztrátami. Celá elektrizační soustava je tvořena zařízením pro výrobu elektřiny (různé elektrárny), rozvodnou sítí a spotřebiteli elektrické energie. K dopravě slouží elektrické vedení. Aby mohla být elektřina v elektrárně vyrobena, je potřeba nějaký přírodní zdroj energie. Může se jednat o ropu, uhlí, uran, ale i biomasu, vodu, vítr nebo slunce. Volba zdroje energie a následně technologie závisí na výsledné ceně elektřiny. [1][2]

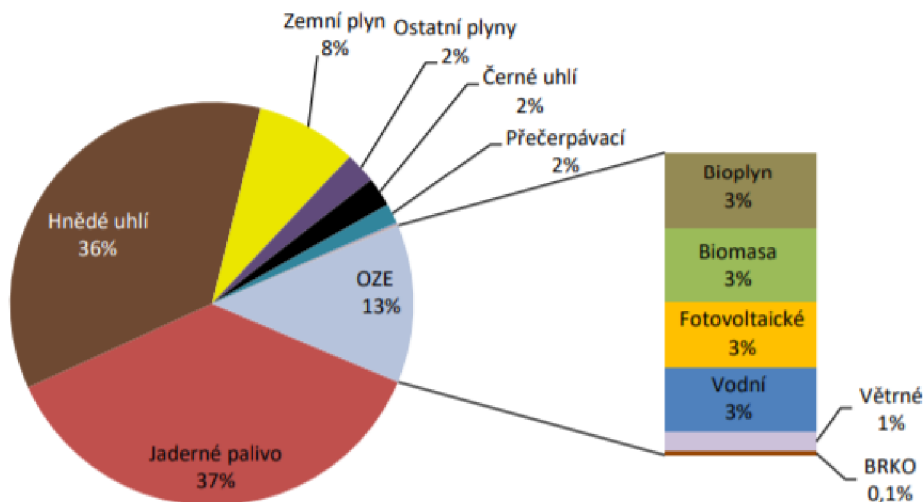


Obrázek 1 Elektrizační soustava [3]

Elektřina pro široké využití, od průmyslu po dopravu, se nejčastěji vyrábí v různých elektrárnách. V tepelných elektrárnách dochází ke spalování paliva (uhlí, ropa, mazut, zemní plyn atd.) a tím se ohřívá voda v kotli. Voda se přeměňuje na páru. Tato pára následně roztáčí turbínu napojenou na generátor, který vyrábí elektřinu. Zvláštním případem tepelné elektrárny je jaderná elektrárna. Zde nedochází ke spalování paliva v kotli, ale štěpení atomů v reaktoru. Dalším typem může být vodní elektrárna. Hlavní komponentou je vodní turbína, která je poháněna buď vodou z řek nebo vodou z moře (pomocí odlivu/přílivu nebo vln). Existují ještě větrné a sluneční elektrárny, které se v současné době rozvíjí. Jejich nevýhodou je nepředvídatelná síla větru/intenzita slunečního záření. Dále oproti předchozím elektrárnám zabírají mnohem větší prostor a vyrobí menší množství elektřiny. [1]

1.1 Elektřina z obnovitelných zdrojů

Mezi obnovitelné zdroje patří větrná, vodní a sluneční energie, biomasa a bioplyn. Jejich výhodou je, že jsou tzv. nevyčerpatelné. Slunce, vítr a tekoucí vodu lze využívat zas a znovu. Další jejich velkou výhodou je, že neprodukují emise CO₂. Na to je kladen velký důraz z Evropské unie. Evropskou unií bylo stanoveno, aby v roce 2020 bylo 20 % spotřebované elektřiny z obnovitelných zdrojů. Každý stát má však jiné přírodní podmínky a pro Českou republiku bylo uvažováno se 13 %, čehož se podařilo dosáhnout viz následující obrázek 2. [4][5]



Obrázek 2 Podíl druhů paliv na výrobě elektrické energie za rok 2020 [6]

V konceptu technologie power to gas, kterou se tato diplomová práce zabývá, je nejčastěji uvažováno s elektřinou z obnovitelných zdrojů energie (OZE). Konkrétně se jedná především o větrnou, sluneční nebo vodní energii. Přínos větrné energie byl objeven již dávno. Ze začátku se využívala pro pohon větrných mlýnů, ve kterých se mlelo obilí. Lopatky mlýna se tehdy roztáčely ručně ve směru proudění větru. V současnosti vítr pohání lopatky větrných elektráren. Z hlediska konstrukce jsou většinou větrné elektrárny stejné. Obsahují třílisté vrtule (lze i jiný počet, ale není to běžné a výhodné) s horizontální osou rotace a rotor. Vše je umístěno na stožáru různých velikostí a usazeno do tzv. strojovny. Účinnost větrné elektrárny je cca 45 %. [5][7]

Dalším OZE jsou fotovoltaické elektrárny. Pomocí fotovoltaických panelů je možné přeměnit sluneční energii na elektřinu. Celý fotovoltaický modul se skládá ze samotných článků, které jsou propojeny do panelů nebo fólií. Panely jsou pomocí vhodné konstrukce upevněny. Nejčastěji se umísťují na střechy budov s vhodným sklonem (optimální je v rozmezí 20–50°). Dále musí být vybaveny zařízením pro skladování vyrobené energie, měničem proudu a připojením na rozvodnou síť. Elektřina je vyráběna s účinností cca 25 %. [7][8]

Do OZE řadíme i vodní elektrárny. Vodní elektrárny mohou být několika typů. V přímořských oblastech se vyskytují často slapové tzv. přílivové elektrárny. Dalším typem jsou průtočné elektrárny, které využívají přirozený průtok řeky. Říční voda se využívá ještě u akumulčních elektráren, kde je spád vody zajištěn přehrazením řeky a vytvořením tzv. hráze. Speciálním typem je potom přečerpávací vodní elektrárna, která slouží k akumulaci elektrické energie. Hlavní komponentou všech druhů je vodní turbína, která je pomocí potenciální nebo kinetické energie vody roztáčena. Turbína pohání generátor a je vyráběna elektřina s účinností v rozmezí 75–90 %. [9]

1.2 Akumulace elektrické energie

Akumulace elektrické energie probíhá tak, že v čase přebytku elektřiny je tato elektřina použita k přeměně na jinou formu energie, kterou uskladníme. Akumulace je nedílnou součástí stabilní elektrické sítě. Týká se obnovitelných zdrojů energie, ale i velkých elektráren (uhelných, jaderných atd.). Obnovitelné zdroje energie považujeme za relativně nestabilní a nepředvídatelné. Rychlost větru a sluneční svit nedokážeme ovlivnit, proto máme někdy elektřiny z těchto zdrojů málo, a naopak jindy hodně. Problémem velkých elektráren je jejich složitá regulace. Najíždění elektráren může trvat i několik dnů. Případné následné omezení

jejich výkonu je nevhodné, jak z technologického hlediska, tak i ekonomického. V době přebytku elektrické energie je potřeba ji akumulovat pro pozdější využití, abychom ji zbytečně nemrhali. [10][11]

Elektrinu nedokážeme ukládat přímo, k jejímu uložení využíváme procesy vratné přeměny elektřiny na jinou formu energie. Obvykle se jedná o energii chemickou, mechanickou nebo tepelnou. Jednotlivé způsoby akumulace se liší hlavně svým výkonem, účinností, životností zařízení a dobou udržení naakumulované energie. Akumulaci můžeme podle mezistupňů v přeměně rozdělit do tří kategorií. První kategorií jsou technologie, kde ke zpětné přeměně na elektřinu dochází samovolně. Není tedy třeba žádná další technologie. Konkrétně se jedná o elektrochemické baterie, různé akumulátory a kondenzátory. Do druhé kategorie patří technologie, kde se mimo akumulací prvek (setrvačnick, nádrž aj.) využívají další technologie potřebné k přeměně naakumulované energie zpět na energii elektrickou (generátor, turbína). Jedná se o setrvačnické, přečerpávací vodní elektrárny (PVE) a stlačený vzduch (CAES). V poslední kategorii jsou zařazeny technologie, kde zpětná přeměna na elektřinu nelze provést nebo se uvažuje s využíváním mezi produktu. Jedná se o akumulaci do tepla (P2H2P) a technologii power to gas (P2G). Některé způsoby akumulace budou popsány blíže a technologie P2G bude podrobněji popsána v následujících kapitolách. [10][11]

1.2.1 Přečerpávací vodní elektrárny

Přečerpávací vodní elektrárny jsou hlavním představitelem ukládání elektrické energie pomocí energie mechanické. Jedná se o často využívaný způsob regulace elektrické sítě. Princip je relativně jednoduchý. Máme vybudované dvě nádrže, z toho jedna je umístěna výše než druhá. Nádrže jsou propojeny potrubím/přivaděči včetně veškerých potřebných armatur a reverzní turbínou připojenou na generátor. Pokud je v síti přebytek elektrické energie a chceme ji akumulovat, tak reverzní turbínu využijeme jako čerpadlo. Turbína je poháněna elektřinou ze sítě pomocí generátoru, který plní funkci elektromotoru. Ze spodní nádrže tak přečerpáme vodu do horní nádrže. V opačném případě, kdy je v síti nedostatek elektrické energie, je voda z horní nádrže pouštěna potrubím přes turbínu do spodní nádrže. Proudící vodou se turbína rotočí. Dochází k přeměně potenciální energie vody na mechanickou energii. Roztočená turbína pohání generátor a dochází k výrobě elektřiny. [11][12]



Obrázek 3 Princip PVE [13]

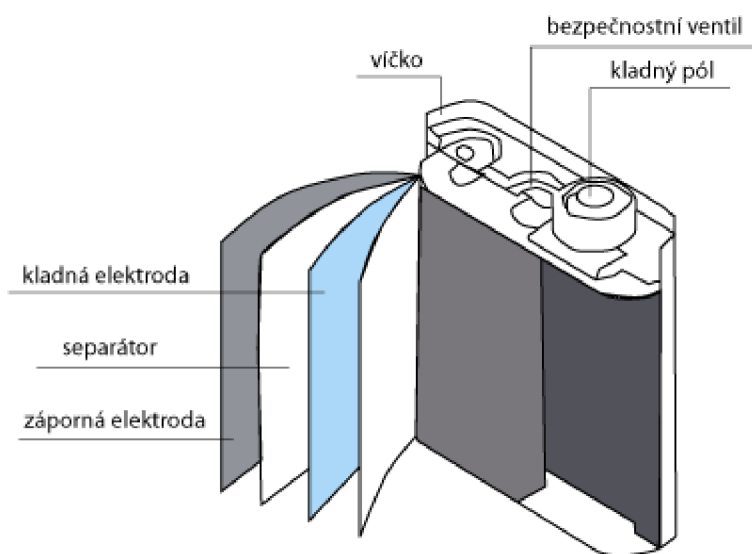
Výhodou PVE je rychlá regulace, v řádech minut je možné přecházet z čerpacího režimu na výrobní. Účinnost dosahuje až 75 %. V České republice jsou celkem tři PVE a to Dlouhé stráně, Štěchovice a Dalešice. [12]

1.2.2 Supravodivé indukční akumulátory

Princip této technologie spočívá v akumulaci elektrické energie pomocí supravodivosti. Supravodivost je stav látky, kdy skoro absolutně zmizí elektrický odpor. Jde o způsob akumulace, která se využívá teprve několik posledních let. Velkou výhodou je extrémně vysoká účinnost až 95 %. Dle různých výzkumů může účinnost v budoucnosti vzrůst až na 99 %. Doba nabíjení i vybíjení akumulátoru je velmi krátká. V současnosti je tato technologie dále rozvíjena, ale i přes to je již v malém množství provozována komerčně. [11][14]

1.2.3 Elektrochemická akumulátory

Jedná se o systém akumulace do tzv. baterií. Dochází ke střídání nabíjecí a vybíjecí fáze. Celý proces probíhá mezi dvěma elektrodami, které jsou ponořeny do elektrolytu. Podle materiálu elektrod a typu elektrolytu akumulátory dále rozdělujeme. Nejstarším typem jsou akumulátory olověné. Funkci elektrod plní dvě olověné desky, které jsou ponořeny do elektrolytu z kyseliny sírové. Jsou bezpečné, levné, ale mají negativní dopad na životní prostředí. Druhým typem jsou baterie na bázi niklu (Ni-Cd a Ni-MH). Nejvíce se využívají v oblasti elektromobility. Další jsou Li-ion akumulátory, které jsou nejpoužívanější. Mají až třikrát větší měrnou kapacitu než typy předchozí. Jsou však teplotně nestálé a velmi drahé. Posledním typem jsou sodíkovo-sírové akumulátory. Je možné je provozovat jen při vysokých teplotách cca 300 °C, ale jsou nejvíce vhodné pro dlouhodobé dodávání elektrické energie přímo do sítě. Jejich účinnost dosahuje až 89 %. [12][14][15]



Obrázek 4 Průřez Li-ionovým akumulátorem [16]

1.2.4 Akumulace do tepla

Elektrická energie lze také uložit ve formě tepla (P2H2P) případně i chladu. Využívá se toho především u slunečních tepelných elektráren, kde se elektrina akumuluje do roztavených solí a vzniká tzv. latentní teplo, které lze látce odebrat. Další možností je přebytek elektriny využít k ohřevu vody nebo předehřevu budov. Kromě tepla můžeme elektrickou energii uložit v podobě chladu, kdy vyrábíme led pro chladicí systémy. [14]

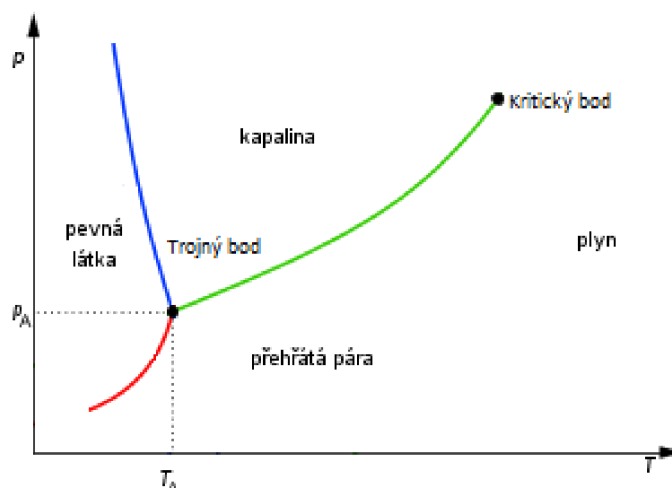
2 Voda – H₂O

Voda je jednou z nejdůležitějších sloučenin. Povrch země je z 98 % tvořen právě vodou. Z toho jsou pouhá 2,5 % čistá voda. Když budeme uvažovat pouze vodu pitnou, tak té je k dispozici na naší planetě pouze 0,007 % z celkového objemu. [17]

V energetice je voda velmi často využívána. Používá se především jako pracovní nebo chladicí médium. Dochází k používání vody sladké i slané. Slaná voda se uplatňuje např. při roztáčení turbín u přílivových elektráren. Častěji však dochází k využívání vody sladké. Pro své vhodné vlastnosti a dostupnost se používá např. při vytápění jako teplotonosné médium nebo jako chladicí médium. Dále její přímé využití je u vodních elektráren, ať už akumulčních nebo průtočných. V neposlední řadě je voda zbavená minerálů (tzv. deionizací) využívána při výrobě vodíku pomocí elektrolýzy vody. Toho využívá systém P2G.

2.1 Fyzikální a chemické vlastnosti

Voda je nejrozšířenější a nejvýznamnější sloučenina vodíku s kyslíkem. Jedná se o bezbarvou kapalinu bez chuti a zápachu. Za normálního atmosférického tlaku je její teplota varu při 100 °C a teplota tání při 0 °C. Hustota vody je 0,99997 g/cm³ a nejvyšší hustoty dosahuje při teplotě 3,95 °C. Tepelná kapacita je několikanásobně vyšší než u ostatních látek, z tohoto důvodu je využívána jako teplotonosné médium při vytápění. V přírodě se vyskytuje ve třech skupenstvích: v pevném, kapalném a plynném. Jednotlivá skupenství jsou znázorněna ve Fázovém diagramu na obrázku 5. [18]



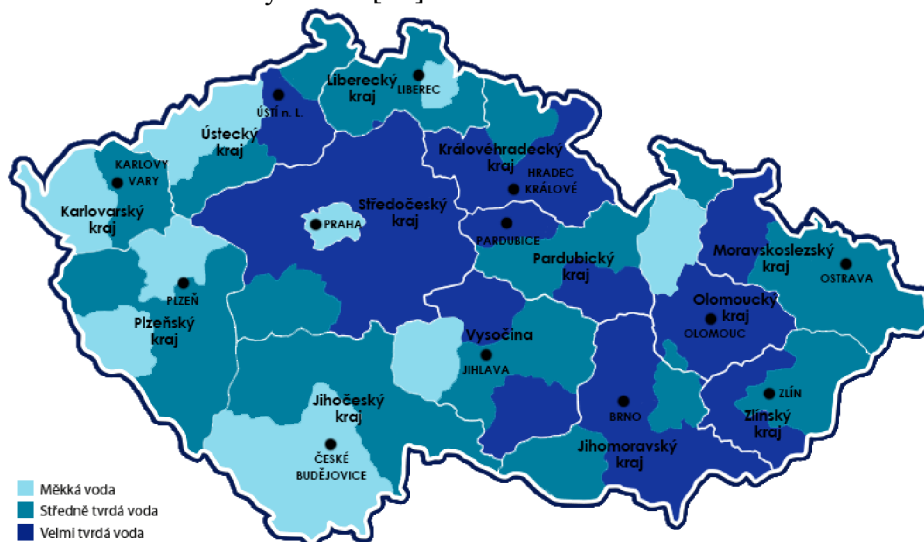
Obrázek 5 Fázový diagram vody [19]

Fázový diagram se skládá celkem ze tří křivek. Červená je křivka sublimace, zelená je křivka syté páry a modrá je křivka tání. Sublimační křivka popisuje stav látky, kdy se vedle sebe nachází v rovnovážném stavu pevná látka a sytá pára. Křivka tání popisuje stav, kdy se vedle sebe nachází v rovnovážném stavu pevné a kapalně skupenství vody. Křivka syté páry popisuje stav látky, kdy se vedle sebe nachází v rovnovážném stavu kapalná a plynná látka. V diagramu jsou 2 významné body. Prvním je trojný bod, který znázorňuje rovnovážný stav soustavy a voda zde existuje ve všech třech skupenstvích. Teplota toho bodu je 0,01 °C a tlak 610 Pa. Druhý významný bod je kritický bod, ve kterém mizí rozdíl mezi kapalnou a plynnou fází. [18][20]

2.2 Tvrdost vody

Tvrdost vody je vlastnost, kterou způsobují některé rozpustné soli vápníku a hořčíku. Podle množství rozpuštěných minerálních látek rozlišujeme vodu velmi měkkou, měkkou,

středně tvrdou, tvrdou a velmi tvrdou. Čím více vápníku se ve vodě nachází, tím je její tvrdost vyšší. Mezi pozitivní vlastnosti tvrdé pitné vody patří, že nám dodává potřebné minerály jako jsou vápník, hořčík, ale i třeba železo. Tyto látky jsou vhodné pro lidský organismus, protože napomáhají chránit srdce, cévy a mozek. Negativní vlastností je usazování vodního kamene všude, kde to jen jde. To má za příčinu sníženou životnost spotřebičů, zvýšenou spotřebu pracích prášků a snížení výkonu topných těles. V následujícím obrázku 6 lze pozorovat, jaké je přibližné rozložení tvrdosti vody v ČR. [18]



Obrázek 6 Mapa tvrdosti vody v ČR [18]

Podle charakteru přítomných sloučenin se rozlišují dva druhy tvrdosti. První je tzv. přechodná (karbonátová) tvrdost, která je způsobena hydrogenuhličitany. Přechodná tvrdost může být odstraněna zahříváním a vařením, kdy dochází ke změně rovnováhy mezi oxidem uhličitým a hydrogenuhličitany. Tento jev se nám projevuje tak, že když přechodně tvrdou vodu zahřejeme, tak se nám vodní kámen vysráží na stěnách nádoby. Druhá je tzv. trvalá (nekarbonátová) tvrdost, která je způsobena především sírany. Tato tvrdost je se změnou teploty a tlaku neměnná. [18][22]

Jednotkou tvrdosti je jeden milimol na litr (mmol/l). Dříve se používaly jednotky jako jsou německé stupně (°N, příp. °dH) nebo francouzské stupně (°fH). Stupnice tvrdosti vody je znázorněna v následující tabulce 1. [18]

Typ vody	mmol/l	°dH	°fH
velmi měkká	< 50	< 3,9	< 7
Měkká	0,70 - 1,25	3,9 - 7	7 - 12,5
středně tvrdá	1,26 - 2,50	7,01 - 14	12,51 - 25
Tvrdá	2,51 - 3,75	14,01-21	25,01 - 37,5
velmi tvrdá	> 3,76	> 21,01	> 37,51

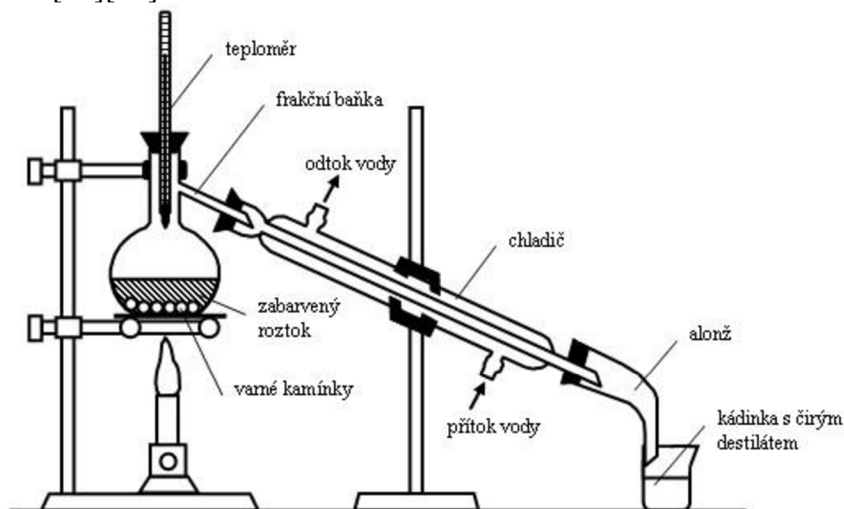
Tabulka 1 Tvrdost vody [18]

2.3 Čištění vody

Voda může obsahovat různé nečistoty jako například bakterie, anorganické a organické látky, pevné částice aj. Voda obsahující různé nečistoty ve větším množství není jednak pitná, ale také nemusí být vhodná k dalšímu použití v průmyslu, energetice apod. Pokud vodu používáme u energetických procesů, např. jako chladicí médium, tak příliš tvrdá voda může

zapříčinit rychlejší zanášení potrubí. U některých procesů, jako je například elektrolýza je vodu vhodnější před použitím vyčistit.

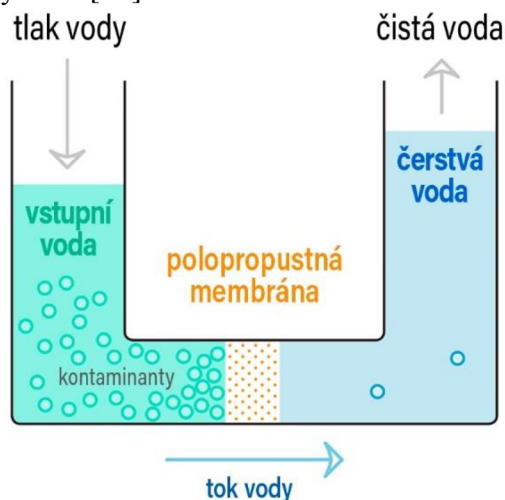
Čistících metod vody existuje hned několik. Jedná se o destilaci, deionizaci (demineralizaci) a reverzní osmózu. Dále lze vodu filtrovat, odplyňovat, dezinfikovat nebo přidávat různé látky např. chlór. Destilace je čistící metoda vody, kdy je voda ohřívána na bod varu a vznikající pára je sbírána/odváděna chladicími trubicemi a následně ochlazována až na kapalný stav. Nečistoty, soli, pesticidy, bakterie apod. zůstávají ve varné nádobě, odkud je lze snadno odstranit. [23][24]



Obrázek 7 Destilační aparatura [25]

Deionizace spočívá ve zbavení vody veškerých iontů, které jsou v ní rozpuštěny. Jedná se jak o kationty (např. železnatý, sodný, hořečnatý), tak i anionty (např. sírany, chloridy). Celý proces probíhá tzv. iontoměniči (katexy a anexy). Iontoměniče dokáží zachytit ionty solí ve vodě a vyměnit je za ionty vodíkové nebo hydroxidové. Dosáhneme tak upravené, velmi čisté vody, kterou lze využívat v elektronickém, farmaceutickém nebo i kosmetickém průmyslu. [24][26]

Reverzní osmóza je membránový proces. Membrána propouští pouze molekuly vody a nežádoucí anorganické nebo organické látky jsou zachyceny na již zmíněné membráně. Samotná osmóza je přirozený proces a od reverzní se liší v tom, že zde působíme větším tlakem než je tzv. osmotický tlak. [24]



Obrázek 8 Reverzní osmóza [27]

3 Vodík – H₂

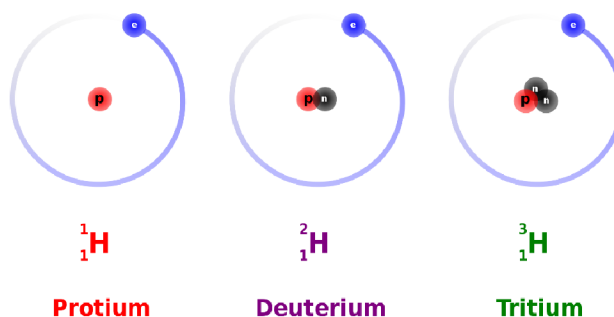
Vodík je využíván v řadě odvětví od energetiky, přes průmysl, až po potravinářství. V minulosti byl v energetice využíván především jako chladivo pro elektrické generátory. V současné době se upouští od fosilních paliv kvůli jejich vyčerpitelnosti a znečišťování životního prostředí. Z těchto důvodů se o vodíku začíná uvažovat jako o klíčovém médiu jak v energetice, tak i v dopravě. Perspektiva vodíku je především v tom, že je uhlíkově neutrální a dobrý nosič energie. V dopravě může přispět k čisté mobilitě, kdy palivový článek umístěný ve vozidlech vyrábí elektřinu pomocí reakce vodíku s kyslíkem. Palivový článek tak nahrazuje spalovací motory v automobilech, které produkují velkou uhlíkovou stopou. Další využití vodíku se předpokládá při akumulaci elektrické energie z obnovitelných zdrojů, která by napomohla k ústupu od fosilních paliv a docílení uhlíkové neutrality. [21][28]

3.1 Fyzikální a chemické vlastnosti

Vodík je bezbarvý, dvouatomový plyn bez chuti, zápachu a je lehčí než vzduch. Byl objeven vědcem Henrym Cavendischem roku 1766. V době objevení však nenašel téměř žádné uplatnění kvůli nástupu mnohem levnějších fosilních paliv v 19. století. Je to prvek 1. periody a 1. skupiny periodické soustavy prvků. I když patří do již zmíněné 1. skupiny, neřadí se mezi alkalické kovy, protože svými vlastnostmi se chová jako typický nekov. Jedná se o prvek s jedním valenčním elektronem a nejmenší relativní atomovou hmotností. [22][29][31]

V přírodě se vodík vyskytuje volný nebo vázaný. Volný vodík se nachází jako dvouatomová molekula H₂ např. v zemním plynu. Vázaný vodík je součástí organických sloučenin (tzv. biogenní prvek) nebo anorganických např. ve vodě. [22][29]

Vodík je nejrozšířenějším prvkem ve vesmíru a 9. nejrozšířenějším na Zemi. Známe jeho 3 izotopy. První izotop je ¹H protium (lehký vodík), který tvoří 99,9 % všech přírodních atomů vodíku. Další je ²H deuterium (těžký vodík) a posledním izotopem je ³H tritium, které je radioaktivní. Poločas rozpadu tritia je 12,32 let. [22][29]



Obrázek 9 Izotopy vodíku [30]

Vodík H ₂		
Protonové číslo	1	-
Relativní atomová hmotnost	1,00794	-
Teplota tání	-255,34	°C
Teplota varu	-255,18	°C
Kritická teplota	-240,18	°C
Teplota samovznícení	580	°C
Kritický tlak	1,293	Mpa
Elektronegativita	2,2	-

Tabulka 2 Vybrané vlastnosti vodíku [29]

Mezi další vlastnost, která je velmi důležitá při využívání vodíku je, jeho mez hořlavosti. Mez hořlavosti udává podíl hořlavých plynů ve směsi (vodík a vzduch). Hořlavost vodíku ve vzduchu je při obsahu 4–75 %. Jedná se o velmi široký rozsah hořlavosti v porovnání s jinými palivy. Pro porovnání u zemního plynu je mez hořlavosti se vzduchem v rozmezí pouze 4,4–15 %. [38][96]

3.2 Využití vodíku

Z energetického hlediska je vodík nejčistší palivo, které má nejvyšší energetický obsah. Při jeho spalování nedochází k produkci škodlivých látek včetně skleníkových plynů. Při reakci s kyslíkem vzniká jako vedlejší produkt pouze čistá voda. Když porovnáme uvolněné teplo při spálení 1 kg vodíku s 1 kg běžného paliva (dřevo, uhlí, plyn aj.), tak při spálení vodíku se uvolní až dvojnásobně více tepelné energie, což je jeho obrovská přednost. Mezi hlavní nevýhody vodíku jako paliva patří, že se vzduchem tvoří výbušnou směs ve velkém rozmezí koncentrací. Z tohoto důvodu se musí při manipulaci s ním dodržovat specifická pravidla. K dalším nedostatkům patří jeho vysoká výrobní cena, velká spotřeba energie na jeho stlačení a velikost molekul. Molekuly vodíku pronikají do mřížky běžné oceli a způsobují vodíkové křehnutí. Z tohoto důvodu musí být nádoby pro uložení vodíku z drahých a kvalitních materiálů. [28]

Vodík skrývá velké množství energie cca 33 kWh/kg, a proto je vhodný jako nosič energie. Má široké uplatnění v energetice, dopravě i průmyslu. V budoucnu má dojít k dekarbonizaci již zmíněných odvětví. Plánuje se vyrábět elektřinu především z obnovitelných zdrojů. V dopravě se vodík využívá jako palivo pro automobily. Stává se tak velkým konkurentem elektromobilům. Výhodou vodíkových automobilů je jejich dojezd cca 600 km a krátká doba plnění (cca 5 minut). Ve ztrátách dojezdu při vysoké rychlosti se vyrovnávají spalovacím motorům. Hlavní nevýhodou vodíkových automobilů je jejich vysoká pořizovací cena a malá infrastruktura plnicích stanic. V průmyslu se pomocí vodíků dá redukovat železo. Dále se využívá k výrobě amoniaku, výbušnin. Své využití našel i v potravinářství pro ztužování tuků. Využití vodíku v různých odvětvích je shrnuto v následující tabulce 3.[28][31][32]

Druh průmyslu	Aplikace
Chemický	Výroba amoniaku
	Přeměna cukrů na polyoly
Potravinářský	Přeměna tuků na potravu pro zvěř
	Ztužování tuků
Ropný	Odstraňování síry
	Krakování uhlovodíků na palivové destiláty
Sklářský	Řezání skla
	Leštění skla
	Tepelné zpracování optických vláken
Energetický	Chladící kapalina
	Zpracování jaderného paliva
Výroba elektroniky	Výroba elektronek
	Tepelné lepení materiálů
Hutnictví	Redukce železa, hořčíku
	Svařování
	Tepelné zpracování pro zlepšení vlastností (tažnost, pevnost aj.)
	Záchyt O ₂

Tabulka 3 Využití vodíku v různých průmyslových odvětvích [32]

3.3 Skladování vodíku

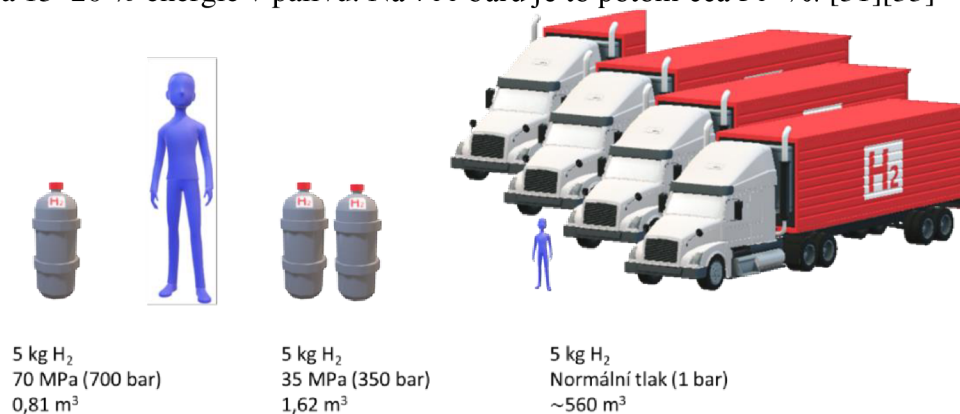
Vodík má ze všech plynů nejmenší hustotu, nejnižší bod varu, nejmenší atomový poloměr a jak již bylo zmíněné, jeho molekuly pronikají do mřížky běžné oceli a způsobují vodíkové křehnutí. Z těchto důvodů je velmi obtížné jeho skladování a transport. Vodík lze skladovat ve formě plynné, kapalné a pevné. [28][33]

Pro skladování vodíku je možné využít různých technologií. Tyto technologie se dělí na konvekční (fyzikální) a alternativní (chemické). Mezi konvekční metody patří skladování v tlakových lahvích (pro plynný vodík) a kryogenních nádobách (pro zkapalněný vodík). Existuje také kombinace obou technologií. Mezi alternativní technologie se řadí skladování vodíku v tzv. hydridech, jedná se o absorpci vodíku v nanostrukturách uhlíku nebo přeměna na jiné chemické látky např. metan. [33]

3.3.1 Skladování v plynné fázi

Skladování vodíku v plynné fázi je nejjednodušší způsob, protože nedochází k žádné fázové přeměně. Zároveň se jedná o nejspolehlivější a nejvyužívanější technologii. Problém nastává u volby vhodné nádoby. Při volbě nádoby je nutné znát pro jakou aplikaci bude vodík využíván, zda statickou nebo mobilní. Pro statické aplikace není důležitá hmotnost a objem nádob, protože se nepředpokládá transport vodíku. Využívá se ocelových lahví (především nízkouhlikaté a legované) o různém objemu. [31][33]

U mobilních aplikací se klade velký důraz na rozměry a váhu skladovací nádrže. Využívají se kompozitní tlakové nádoby, které se vyrábějí mnohonásobně menší než u statických aplikací. Nejčastějším provozním tlakem je 350 barů nebo 700 barů. Z provozního tlaku je patrné, že k uskladnění bude za potřeby vodík nejdříve stlačit. Tlak, na který stlačíme vodík, rozhoduje nejen o jeho objemu, ale také o množství energie, kterou bude nutné dodat k jeho stlačení. Energie potřebná na stlačení plynného vodíku na 350 barů dosahuje cca 15–20 % energie v palivu. Na 700 barů je to potom cca 30 %. [31][33]



Obrázek 10 Objem stejného množství vodíku při různých tlacích [33]

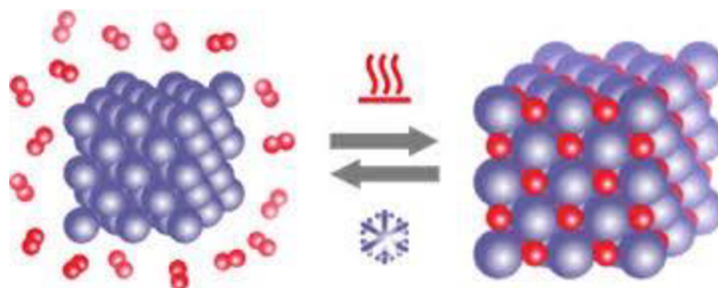
3.3.2 Skladování v kapalně fázi

Další možností jak vodík skladovat je v jeho kapalně fázi. Většinu ostatních paliv, jako např. zemní plyn, je možné v kapalně stavu skladovat při běžných okolních teplotách. Oproti tomu kapalně vodík kvůli nízkěmu bodu varu je nutné skladovat při teplotě -253 °C a tlaku cca 2 bary. Vzhledem k této teplotě je zapotřebí velké energie ke zkapalnění a použití vysoce kvalitních materiálů na nádoby, ve kterých vodík uskladníme. Tyto nádoby se nazývají kryogenní a jedná se o vícevrstvé nádoby, které mají velmi dobré izolační vlastnosti. Kvůli velkému rozdílu okolních teplot vůči teplotě uskladněného vodíku dochází v lahvích k přestupu tepla a kapalně vodík se postupně odpařuje a tlak v nádobě se zvyšuje. Aby nedošlo ke zničení lahve, je nutné plynně vodík pravidelně odpouštět. Odpouštěním vznikají ztráty, které činí cca 0,3–3 % za den. [28][33]

Zkapalňování vodíku je energeticky velmi náročné. Energie potřebná na zkapalnění vodíku je cca 40 % energie v palivu. Tato technologie má však největší uplatnění při přepravě vodíku na velké vzdálenosti. [33]

3.3.3 Skladování v pevné fázi

Skladování vodíku v pevné fázi (v tzv. hydridech) znamená jeho absorpci do materiálů na bázi kovů. Jak již bylo zmíněno, vodík má nejmenší atomový poloměr a díky tomu je schopný proniknout mezi atomy kovu. Jedná se o absorpci (exotermní reakce). Pokud chceme následně vodík z materiálu uvolnit, jde o desorpci při teplotě cca 120–200 °C (reakce endotermní). U předchozích způsobů skladování hrál důležitou roli tlak, ale v případě hydridů je nejdůležitější sledovat provozní teplotu, aby nedošlo k samovolnému uvolnění vodíku. Mezi materiály, vhodné k absorpci vodíku patří slitiny titanu, sodíku, hliníku, hořčíku a nebo jejich kombinace v různých poměrech. [32][33]



Obrázek 11 Ukládání vodíku v tzv. hydridech [33]

Výhodou tzv. hydridů je vysoký skladovací objem v porovnání s plynným a kapalným vodíkem. Dále vysoká bezpečnost, protože dosažení teploty potřebné k desorpci nedocílíme v běžném prostředí. Vodík uvolněný z pevné fáze dosahuje vysoké čistoty. [32]

3.3.4 Skladování v jeskyních

Skladování vodíku v jeskyních v plynné fázi umožňuje jeho uložení v podzemí. Podzemní jeskyně byly vytvořeny pro ukládání zemního plynu tímto způsobem. V případě vodíku se jedná o stejný princip. Jedná se o velmi slibný způsob uložení velkého množství vodíku, ať už v místě jeho spotřeby nebo jako dočasné úložiště. Aby se takové ukládání vyplatilo, vzhledem ke vznikajícím ztrátám případnou přepravou potrubím, musí být taková jeskyně v blízkosti výroby vodíku. V současnosti bylo v Německu úspěšně testováno uložení vodíku v jeskyni o celkovém objemu až 500 000 m³ při tlaku 200 barů. Předpoklad německou společností je, že v jeskyni v hloubce 1 000 m by bylo možné uchovat až 4 000 tun vodíku při tlaku 10 barů. [34]

3.4 Přeprava vodíku

V efektivní přepravě vodíku je ještě celkem dost nejasností. Přeprava na krátké vzdálenosti je relativně bezproblémová, ať už je vodík v plynné, kapalně nebo pevné fázi. Problém nastává při přepravě na větší vzdálenosti. Nejlépe by vycházela přeprava plynné fáze, ale zde je velká nevýhoda jeho velkého objemu. Proto se uvažuje především s přepravováním kapalného vodíku, kde již není problém s velkým objemem, ale je zde jiný problém a to především s jeho teplotou. Kapalným vodík se nedaří dlouhodobě udržet při teplotě -253 °C (jedná se o teplotu o 100 °C nižší než při přepravě zkapalněného zemního plynu). Je nutné tuto teplotu nepřekročit, protože jde o nejnižší hodnotu, kdy je vodík stabilní v kapalně formě a nehrozí prasknutí kryogenní nádoby nadměrným odpařováním vodíku. Vodík, který se i přes to odpaří, je postupně upouštěn a skladován v přídavné tlakové nádobě. [33][35]

K přepravě vodíku se uvažuje využívání lodí. První loď určenou výhradně pro přepravu kapalného vodíku postavili v Japonsku. Jde o loď dlouhou 116 m s nákladovým prostorem o objemu 1 250 m³, který je z dvojitéch stěn s vakuovou izolací. Ke konci roku 2021 by se měla uskutečnit první, devět tisíc kilometrů dlouhá, zkušební plavba. Mezi další pilotní projekty patří přeprava vodíku v kontejnerech. S tímto řešením přišla norská společnost, která testuje speciální kontejnery, které budou přepravovány na lodích. Tento projekt by měl být v provozu začátkem roku 2024. [35]

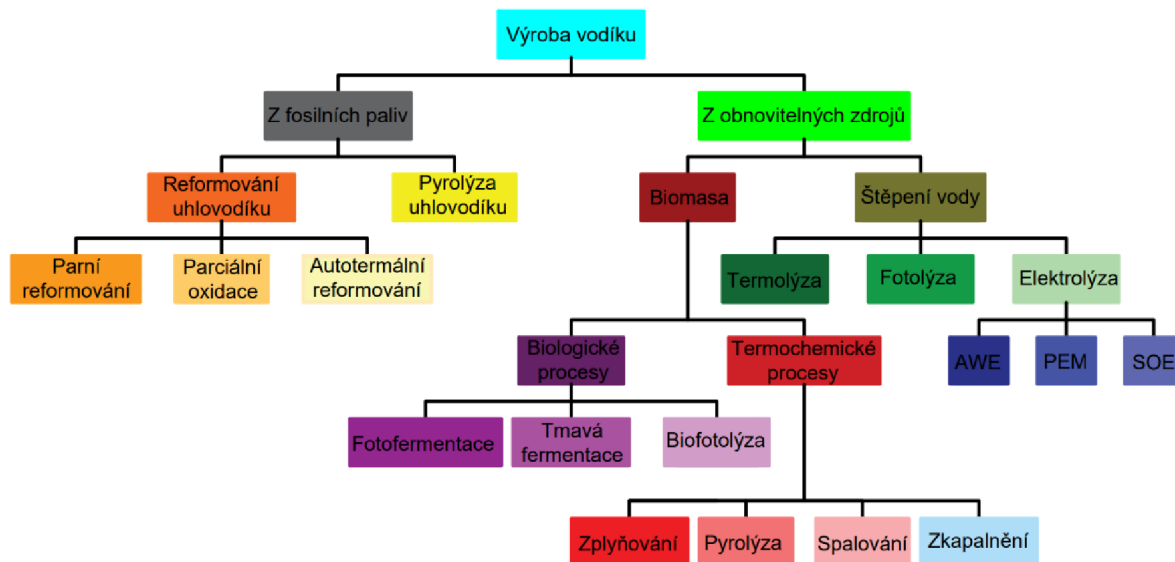


Obrázek 12 Vizualizace lodi určené k přepravě kapalného H₂ [36]

4 Výroba vodíku

V současnosti se vodík využívá především v chemickém průmyslu na výrobu amoniaku. Do budoucna se s ním však uvažuje jako s velmi žádaným palivem vzhledem k jeho vlastnostem a možnosti ekologického využití. Meziroční nárůst spotřeby vodíku se pohybuje okolo 6 %. Vodík lze vyrábět mnoha způsoby, a to jak z fosilních paliv, tak z obnovitelných zdrojů. V současnosti se nejvíce vodíku vyrábí z fosilních paliv (až 96 %) parním reformováním zemního plynu, což má za následek produkci skleníkových plynů. Druhý nejvíce využívaný způsob pro výrobu vodíku je elektrolýza vody. Jedná se o velmi účinný proces bez vzniku skleníkových plynů, který je však velmi energeticky náročný. Ostatní způsoby výroby H₂ se používají jen velmi okrajově a stále dochází k jejich výzkumu a vývoji. [32][37]

Jak již bylo zmíněno, vodík lze vyrábět různými způsoby a z různých paliv. Podle toho jakým způsobem byl vodík vyroben, se barevně označuje. Jsou tři barevná označení, a to šedý, modrý a zelený. Šedý vodík je tzv. „špinavý“ a vyrábí se právě z fosilních paliv jako uhlí a zemní plyn. Výhodou jsou nižší provozní náklady. Velkou nevýhodou jsou vysoké emise CO₂. Další je tzv. modrý vodík, který je také produkován z fosilních paliv, ale emise CO₂ jsou zachytávány pomocí metody CCS (Carbon Capture and Storage) nebo CCU (Carbon Capture and Use). Díky těmto metodám dostáváme ekologičtější variantu vodíku, který pochází z fosilních paliv. Poslední je zelený vodík, který vzniká z obnovitelných zdrojů a při jeho produkci nevznikají skleníkové plyny. Hlavním cílem vodíkového hospodářství je ústup od fosilních paliv a vyrábění právě zeleného vodíku. Velkou nevýhodou ekologické výroby vodíku je, že je velmi drahý v porovnání s modrým nebo šedým. Technologie k výrobě zeleného vodíku jsou většinou ve stádiu výzkumu nebo se potýkají s relativně nízkou účinností a energetickou náročností. [40][41]



Obrázek 13 Výroba vodíku

4.1 Produkce vodíku z fosilních paliv

Výroba šedého, případně modrého vodíku z fosilních paliv je nejvíce využívaná. Existuje několik technologií pro výrobu vodíku z fosilních paliv. Nejvíce využívaný je parní reforming a pyrolýza. Tyto procesy pokryjí dosavadní spotřebu vodíku ve světě. Z fosilních

paliv se pro výrobu vodíku ze 48 % využívá zemního plynu, z 30 % těžkých olejů a z 18 % uhlí. [42]

4.1.1 Parní reforming

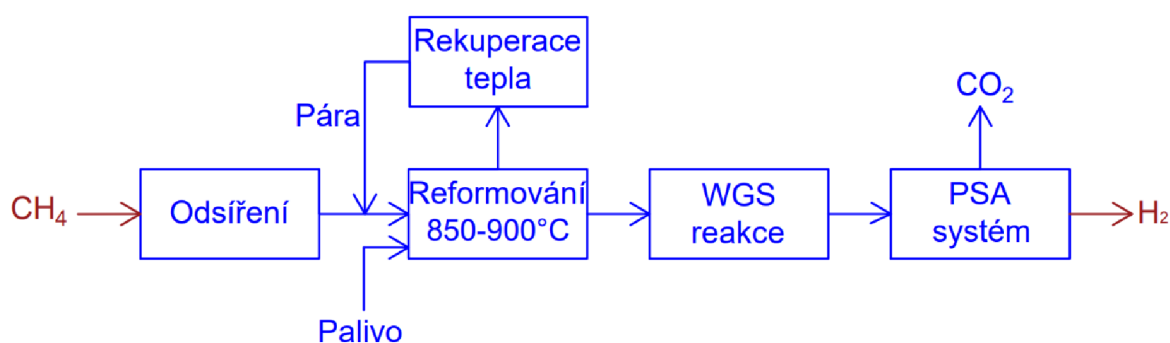
Metoda parního reformování (SR) spočívá v reakci zemního plynu (methanu, ale i lehkých uhlovodíků jako ethan, propan, butan atd.) a páry za vzniku vodíku. Jedná se o nejpoužívanější metodu ve výrobě vodíku s účinností až 85 %. Tento proces se skládá z následujících hlavních kroků: primární parní reforming, reakce WGS (water gas shift) a metanizace nebo čištění plynu. Veškeré reakce probíhají uvnitř reaktorů. Primární parní reforming probíhá za vysokých teplot okolo 700–900 °C při tlaku cca 3,5 MPa. Jako katalyzátor se využívá nikl. Vodní pára a methan (případně jiný uhlovodík) jsou zavedeny do reaktoru, kde probíhá reakce dle následující rovnice 4.1. [42][43]



Po primárním parním reformingu následuje reakce WGS. Plynná směs CO a H₂ je následně ochlazená a zavedena do nízkoteplotního reaktoru, kde při teplotě 180–230 °C probíhá WGS reakce. Při WGS reakci CO reaguje s vodní párou a vzniká další vodík. Na závěr vzniklá směs prochází buď zachytávačem CO₂ s metanizací nebo adsorpcí při kolísání tlaku a zůstává nám tak vodík s čistotou blízkou 100 %. [42][43]



Reformovací zařízení se skládá z odsiřovací jednotky, reformovací a čistící sekce a různých pomocných zařízení, jako jsou čerpadla, kompresory, výměníky tepla, spalovací komora apod. Výhodou SR metody je její pokročilý vývoj, dostupná technologie a vysoká účinnost. Z těchto důvodů se jedná o nejrozšířenější metodu. Mezi nevýhody patří vysoké emise CO₂. Na 1 kg vyrobeného vodíku připadá 5,5 kg emisí CO₂. [98] Vysoké emise je možné řešit zachytáváním CO₂ např. pomocí metody CCS (Carbon capture and storage). Další nevýhodou tohoto procesu je nutnost odsíření, aby nedošlo k poškození katalyzátoru. [42][43]

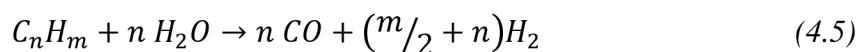
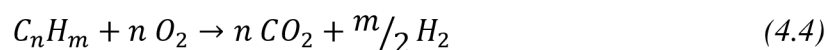
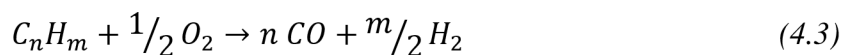


Obrázek 14 Parní reforming (přepracováno[42])

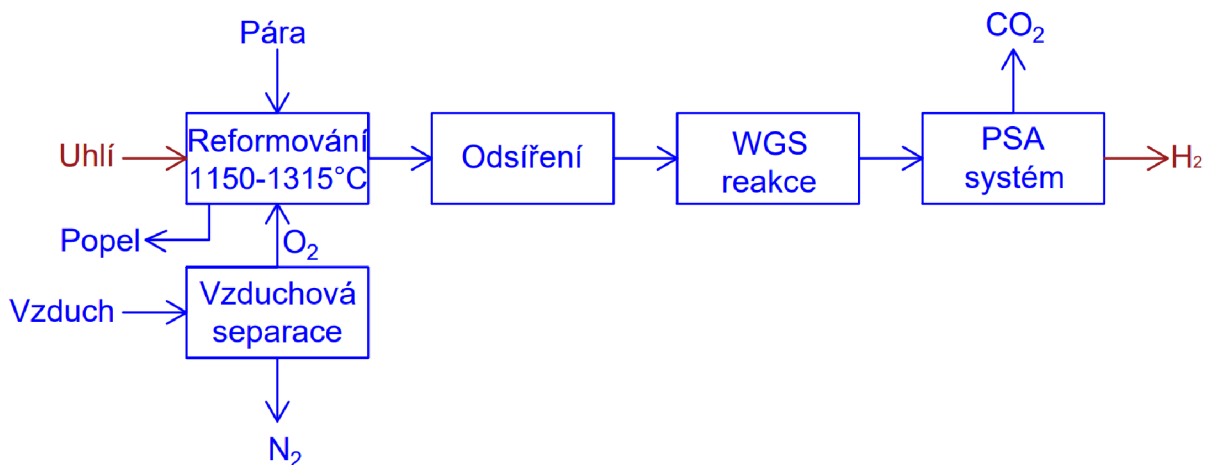
Klasické parní reformování lze vylepšit, když využijeme membránový reaktor, který se využíval dříve především v chemickém průmyslu. Membrána je struktura, díky které je možný přenos hmoty pod gradientem hnacích sil (tlak, teplota, koncentrace atd.). Membrány se dělí na biologické a syntetické. Syntetické membrány se dále dělí na organické a anorganické. K výrobě vodíku lze za vhodnou membránu považovat takovou, která má velkou propustnost, dobrou chemickou a strukturální stabilitu. Výhodou membránového reaktoru je větší množství vyrobeného vodíku za nižších teplot 450–550 °C. [42]

4.1.2 Parciální oxidace

Parciální oxidace (POX) je metoda, která spočívá v přeměně páry, kyslíku a uhlovodíku na vodík a různé oxidy uhlíku. Hlavní surovinou na bázi uhlovodíku je zemní plyn nebo ropa. Jedná se o nekatalytický proces, který probíhá v reaktoru s nedostatečným množstvím kyslíku při tlaku 8 MPa a teplotě 1 150–1 400 °C. Jedná se o exotermní reakce dle následujících rovnic 4.3 a 4.4. Dochází k zahřívání, proto je nutné rostoucí teplotu regulovat přidáváním vodní páry dle rovnice 4.5. Za koeficienty m a n v rovnicích se dosazují čísla podle toho, o jakou surovinu se jedná. [42][43]



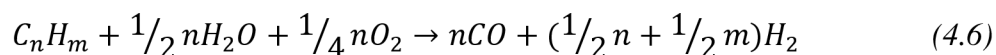
Metoda parciální oxidace se používá jako účinná technologie pro výrobu vodíku z těžkých surovin (ropa, uhlí). U těchto surovin je nízký poměr vodíku k uhlíku, takže ve srovnání výroby vodíku z metanu se velké množství vodíku vyrábí právě z vodní páry. Pokud jako hlavní surovinu použijeme ropu, tak voda dodává až 69 % vyrobeného vodíku, v případě použití uhlí dodává dokonce 83 %. Výhodou této metody je, že se nepoužívá katalyzátor, ale na úkor toho je potřeba vyšších teplot. [42][43]



Obrázek 15 Metoda POX v případě uhlí tzv. zplyňování uhlí (přepřacováno [42])

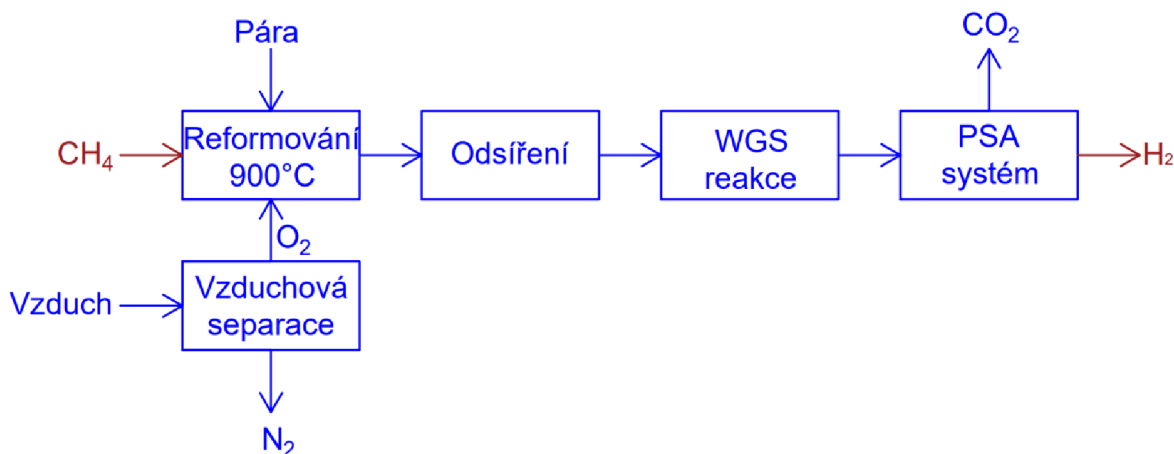
4.1.3 Autotermální reformování

Metoda autotermálního reformování (ATR) využívá exotermní parciální oxidace. Dochází k reakci, při které se uvolňuje teplo. Toto teplo zajišťuje endotermické reformování párou, které zvyšuje produkci vodíku. Celý princip spočívá ve vstřikování páry s kyslíkem nebo vzduchem do tzv. reformátoru. Celá reakce probíhá dle následující rovnice 4.6. [42]



Pokud jako palivo použijeme zemní plyn (methan), na rovnici aplikujeme $n=1$ a $m=4$. Při provozní teplotě 700 °C dosáhneme tepelné účinnosti až 75 %. Celkové investiční náklady

na ATR metodu jsou až o 50 % nižší než při metodě SR. Moderní ATR elektrárny dokáží zachytávat cca 90 % uvolnění oxid uhličitýho. [42]



Obrázek 16 Metoda ATR (přepřacováno [42])

4.1.4 Pyrolýza uhlovodíku

Pyrolýza uhlovodíku je proces, při kterém je uhlovodík (jako jediný zdroj vodíku) tepelně rozkládán. Může se jednat o rozklad lehkých kapalných uhlovodíků při teplotě varu 50–200 °C za vzniku elementárního uhlíku a vodíku. Pokud reagují těžší zbytkové frakce s bodem varu vyšším než 350 °C vodík se vyrábí hydro zplyňováním s následným krakováním. [42]



4.2 Produkce vodíku z biomasy

Vodík lze také vyrábět přeměnou z biomasy. Biomasa je jedním z nejvýznamnějších udržitelných zdrojů. K výrobě vodíku lze použít biomasu v různých formách, jako jsou energetické plodiny (rychle rostoucí dřeviny, byliny, trávy atd.), vodní rostliny (např. řasy a rákosí) a odpady z různých odvětví, jako je zemědělství, lesnictví nebo průmysl. Je možné také využít komunální odpad. Produkci vodíku z různých druhů biomasy lze rozdělit do dvou kategorií: termochemická a biologická produkce H₂. [32][39]

4.2.1 Termochemické procesy

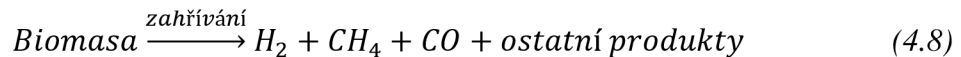
Termochemický proces je technika, při které se získává vodík z plynů bohatých na vodík pomocí přeměny biomasy. Mezi termochemické procesy patří pyrolýza, zkapalňování, spalování a zplyňování. Pro výrobu vodíku se využívá nejvíce pyrolýzy a zplyňování. [32]

Pyrolýza

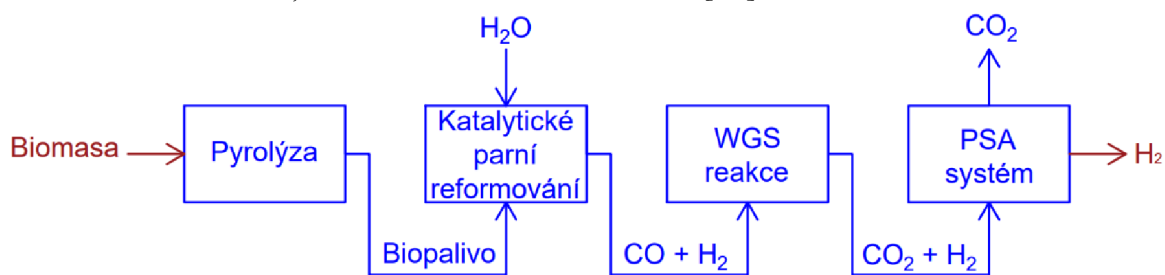
Pyrolýza je fyzikálně chemický děj, kdy se vyrábí pevné dřevěné uhlí, plynné sloučeniny a kapalný produkt (tzv. bio-olej) z biomasy. Jedná se o termický rozklad organických materiálů bez média obsahující kyslík. Hlavním cílem je získání bio-oleje a dřevěného uhlí. Při pyrolýze se biomasa ohřívá na teplotu přibližně 650–800 °C při tlaku 0,1–0,5 MPa. Vše probíhá v atmosféře bez přítomnosti vzduchu a dochází k získávání kapalného produktu ve formě oleje, který je dále zdrojem pro různá zpracování. Ze zbylé nevyhořelé biomasy vzniká dřevěné uhlí a dochází k uvolnění plynných sloučenin. [32][44]

Pyrolýza se podle průběhu dělí na pomalou a rychlou. Při pomalé pyrolýze dochází k tvorbě především dřevěného uhlí, takže není vhodná pro výrobu vodíku. U rychlé pyrolýzy dochází k velmi rychlému zahřátí biomasy na požadovanou teplotu a vzniká tak pára, která

následně zkondenzuje na tmavě hnědou kapalinu tzv. bio-olej. Vznik vodíku pomocí rychlé pyrolýzy lze popsat pomocí následující rovnice 4.8. [32][44]



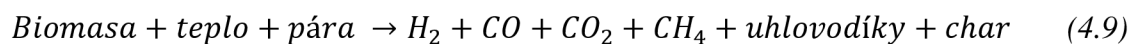
Na produkci vodíku mají u pyrolýzy zásadní vliv řídicí veličiny, jako je teplota děje, rychlost ohřevu, rychlost chlazení, typ katalyzátoru a doba zdržení. Tyto řídicí veličiny lze regulovat na základě vhodně zvoleného typu reaktoru a způsobů přenosu tepla. Každý reaktor má typický způsob přenosu tepla. Velmi často se využívá cirkulující fluidní lože, které zvyšuje rychlost přenosu tepla. Jedná se však o složitý systém, je nutná recyklace pevných částic a vysoká abraze biomasy. Přenos tepla u fluidního lože je rozdělen následovně: 80 % vodivost, 19 % konvekce a 1 % radiace. Mezi jeden z jednodušších reaktorů patří tzv. unášený tok. Ten má nízkou rychlost přenosu tepla. Způsob přenosu tepla je rozdělen následovně: 4 % vedení, 95 % konvekce a 1 % radiace. [32]



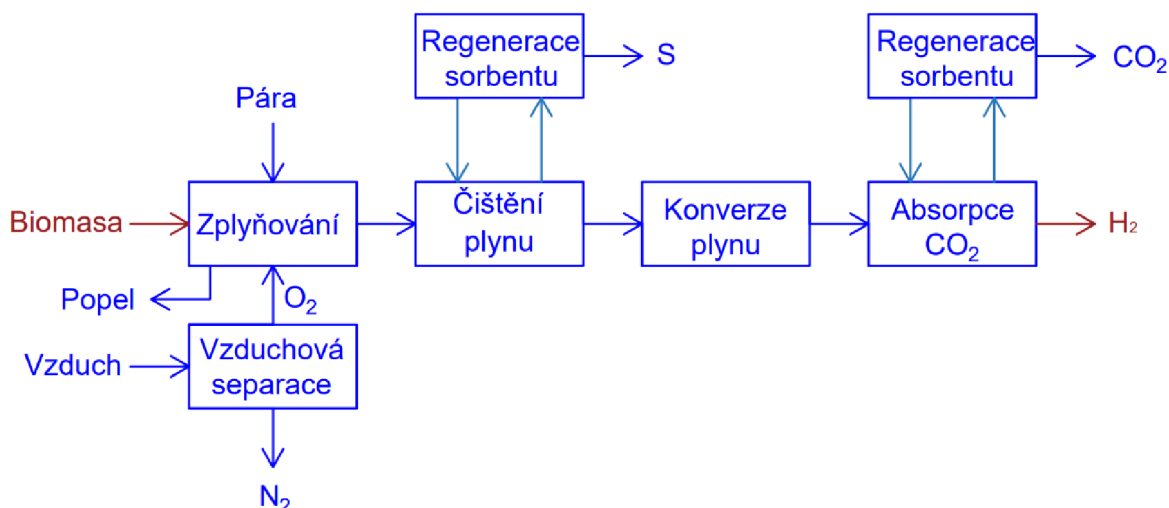
Obrázek 17 Pyrolýza (přepřacováno[42])

Zplyňování

Jedná se o proces, kdy dochází k přeměně organických látek na látky plynné. Zplyňování probíhá při teplotách nad 1 000 °C. Díky vysokým teplotám lze biomasu měnit na plyn. Ke zplyňování pevné biomasy je potřeba kyslík. Dochází k částečné oxidaci, při které vzniká vodík a dřevěné uhlí. Hlavní reakce tohoto chemického procesu je popsána následující rovnicí 4.9. [32][39]



Hlavním cílem zplyňování je získání plyných produktů. Nevýhodou je nízká tepelná účinnost a nutnost hlídat obsah vlhkosti v biomase. Lze použít pouze biomasu o vlhkosti nižší než 35 %, protože při procesu musí být veškerá vlhkost zcela odpařena. U biomasy s vyšší vlhkostí by značně klesala účinnost. Zplyňování probíhá v generátorech s pevným nebo fluidním ložem při atmosférickém tlaku nebo v tlakových generátorech při tlaku 1,5–2,5 MPa. [32]



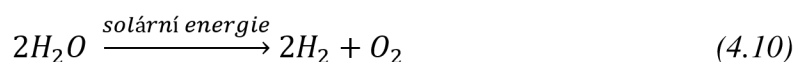
Obrázek 18 Zplyňování biomasy (přepřacováno[42])

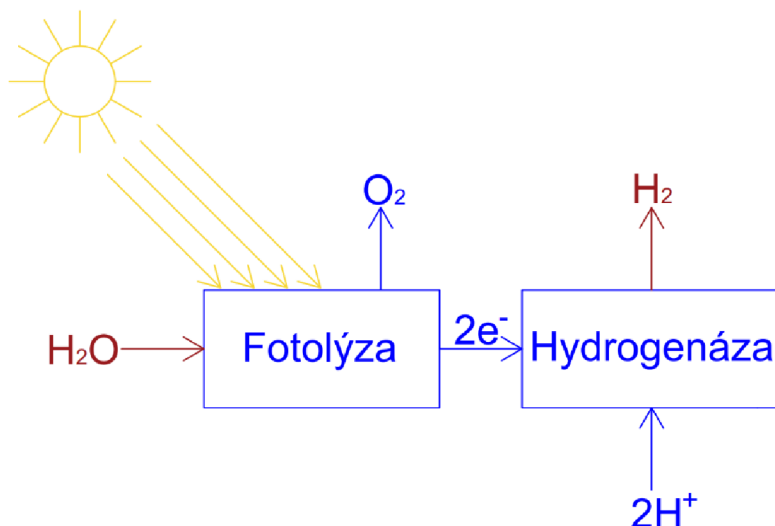
4.2.2 Biologické procesy

Biologická výroba vodíku z biomasy má velkou výhodu, protože jednotlivé procesy probíhají většinou při okolním tlaku a teplotě. Tím lze ušetřit velké množství energie. Veškeré biologické procesy jsou klasifikovány jako obnovitelný zdroj energie. Lze jich využít především v místech, kde je snadno dostupný nějaký zdroj biomasy. Může se jednat i o biomasu v podobě odpadu. Veškeré procesy obvykle pracují s různými anaerobními bakteriemi nebo řasami. Biologické procesy se dělí na přímou bio-fotolýzu, nepřímou bio-fotolýzu, biologickou WGS reakci, fermentaci a foto-fermentaci. [32][37]

Přímá bio-fotolýza

Tento proces spočívá v přeměně sluneční energie na energii chemickou pomocí řas. Touto reakcí dochází ke vzniku vodíku viz rovnice 4.10. Jedná se o složitý soubor reakcí, ke kterým dochází díky fotosyntéze. Využívá se mikroorganismů jako jsou řasy a sinice. Pomocí řas a sinic dochází ke generování iontů vodíku a kyslíku. Systémem absorbované světlo slouží ke štěpení molekul vody a kyslíku na protony a elektrony. Elektrony se využívají k tvorbě hydrogenázy enzymu bez tvorby skleníkového plynu CO_2 . Aby došlo k tvorbě vodíku musí být koncentrace kyslíku udržována pod 0,1 %, protože hydrogenáza je na jeho množství velmi citlivá. Výhoda přímé bio-fotolýzy je, že máme levný zdroj k tvorbě vodíku. Nevýhodou je její nízká účinnost, která i přes veškeré výzkumy má pouhých 5 %. [32][37]

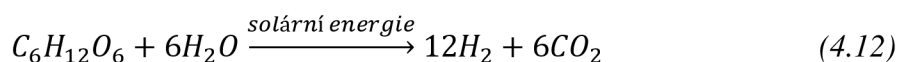
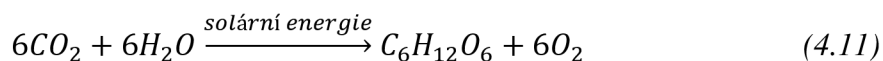




Obrázek 19 Přímá bio-fotolýza (přepřacováno [42])

Nepřímá bio-fotolýza

Proces nepřímé bio-fotolýza se skládá ze čtyř základních kroků. Prvním krokem je fotosyntéza biomasy (řas a sinic), poté následuje koncentrace biomasy a tmavá fermentace. Poslední krok je konverze 2 molů acetátu na vodík. Produkci vodíku nepřímou bio-fotolýzou lze popsat pomocí následujících rovnic 4.11 a 4.12. Hlavní výhodou této metody je, že se vodík díky solární energii produkuje jak z vody, tak i z oxidu uhličitého. [32][37]



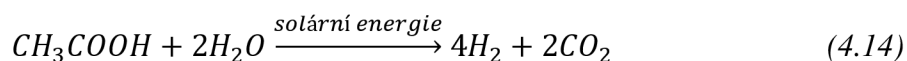
Biologická WGS reakce

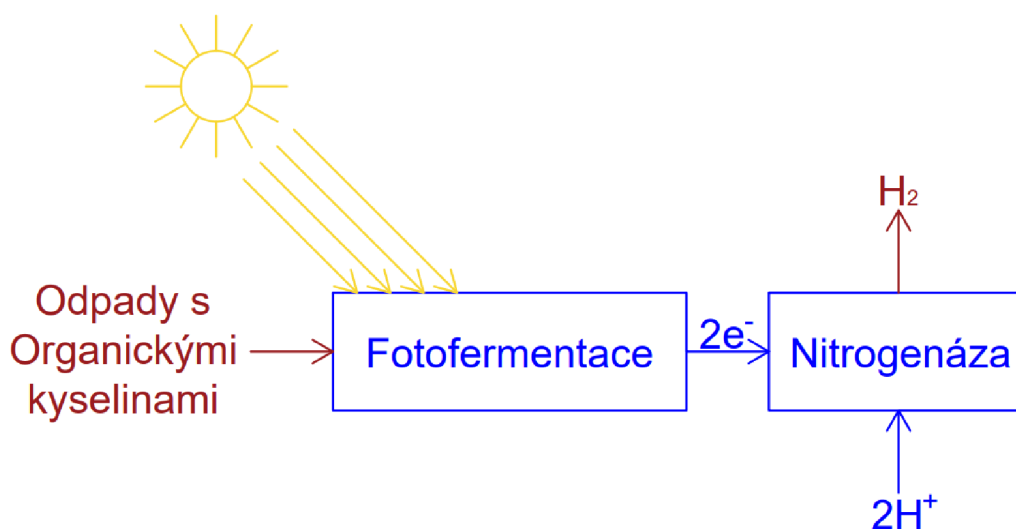
Jedná se o biologickou reakci vodního plynu (H_2 a CO). Existují bakterie, které při použití CO jako jediného zdroje uhlíku přežijí ve tmě a tvoří tzv. ATP. Při tvorbě ATP dochází zároveň k oxidaci CO a redukci H^+ na H_2 . Celkový proces probíhá za nízkých teplot a tlaků. Reakce je nejrychlejší ze všech biologických procesů, což je velkou výhodou. Nevýhodou je potřeba CO a v podstatě absolutní tma. [32][37]



Foto-fermentace

Jedná se o proces, kdy je biomasa přeměňována na oxid uhličitý a vodík pomocí fotosyntetických bakterií za přítomnosti solární energie. Reakce probíhá za anaerobních podmínek. Výhodou foto-fermentace je schopnost bakterií produkovat 100 % elektronů z biomasy, které vytváří H_2 a CO_2 bez produkce O_2 . Tímto procesem vyrobíme o poznání méně vodíku než při využití foto-biologických procesů (přímá/nepřímá bio-fotolýza, WGS reakce). Jedná se však o energeticky náročný proces. Výhodou je, že se vodík začíná produkovat i bez vhodných světelných podmínek. [32][37]





Obrázek 20 Foto-fermentace (přepřacováno [42])

Tmavá fermentace

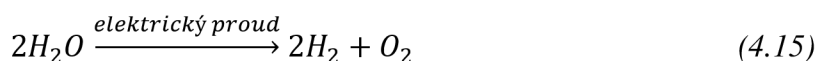
Tmavá fermentace, neboli tmavé kvašení, využívá anaerobní bakterie pro pěstování substrátu s vysokým obsahem sacharidů ve tmě. Vhodným materiálem pro tento proces je suchá biomasa. Ta je levná, dobře biologicky odbouratelná, dostupná ve velkém množství a je bohatá na sacharidy. Takovou biomasu nalezneme v zemědělských zbytcích a potravinářském odpadu. Fermentační reakce se dle teploty, při které je prováděna, dělí na: mezofilní (25–40 °C), termofilní (40–65 °C), extrémně termofilní (65–80 °C) a hypertermofilní (nad 80 °C). [32][37]

4.3 Štěpení vody

Voda je jednou z nejvíce rozšířených surovin na zemi i ve vesmíru. V energetice se využívá jako chladicí nebo pracovní médium. Vodu lze také využít k výrobě zeleného vodíku. Štěpení vody probíhá bez vzniku emisí CO₂. To je velká přednost. Emise by vznikaly jedině tehdy, pokud by k výrobě vodíku byla využita elektrická energie z fosilních paliv. Štěpení vody může probíhat pomocí elektrolýzy, termolýzy nebo foto-elektrolýzy. [42]

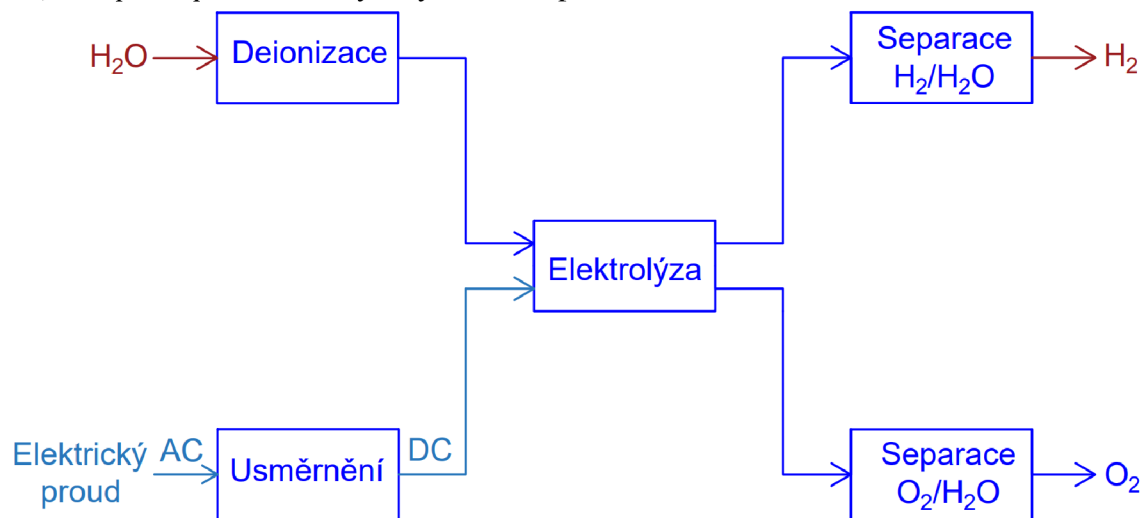
4.3.1 Elektrolýza

Elektrolýza je velmi účinná a je jednou z nejkologičtějších metod výroby vodíku, protože nevzniká žádná uhlíková stopa. Jedná se o elektrochemické štěpení vody. Celková reakce je endotermická a probíhá v tzv. elektrolyzáru. Elektrolyzáru je složen z katody a anody, které jsou ponořeny do elektrolytu. Při použití elektrického proudu se na katodě začíná štěpit voda a na anodě vzniká vodík. Reakce probíhá dle následující rovnice 4.15. [42][45]



Při elektrolýze vody se využívá stejnosměrného elektrického proudu především z obnovitelných zdrojů (voda, vítr, slunce a biomasa). Metodu elektrolýzy lze rozdělit dle skupenství vody, kterou používáme, a to na nízkoteplotní (voda je kapalina) a vysokoteplotní (voda je pára). Dále ji lze dělit podle použitého elektrolyzáru na: alkalickou (AWE), vysokoteplotní (SOE) a s proton-výměnnou membránou (PEM). Ideální elektrolyzáru by měl

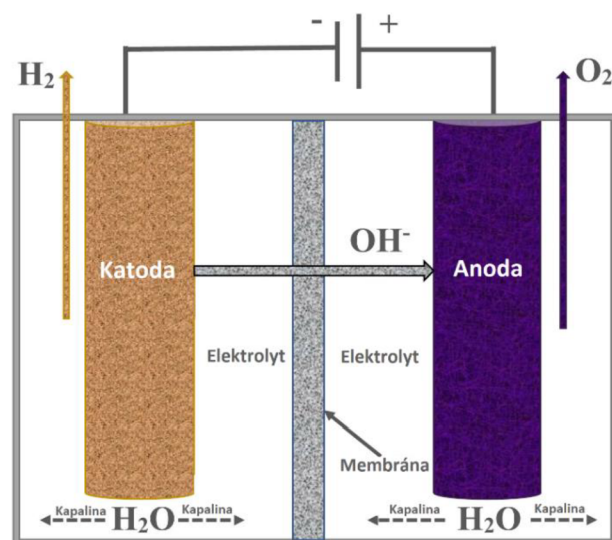
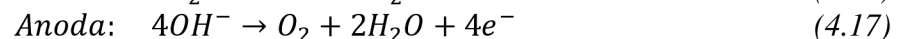
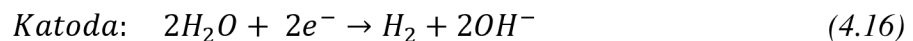
mít vysokou účinnost, minimální ztráty, dlouhou životnost, dynamicky reagovat na změny okolí, schopnost provozu za vysokých tlaků apod. [45][46]



Obrázek 21 Schéma elektrolýzy (přepřacováno[42])

Alkalická elektrolýza

Alkalická elektrolýza je průmyslově nejstarší, nejpokročilejší a nejběžnější technologií výroby vodíku pomocí elektrolýzy. Provozní teploty se pohybují od 40 do 90 °C a při tlaku až do 3,5 MPa. Elektrolyty pro AWE jsou na bázi KOH nebo NaOH s koncentrací do 30 % a dosahují účinnosti výroby vodíku 70–80 %. Při AWE metodě dochází k elektrolýze vody na katodě, vzniká OH⁻ (hydroxidový iont), který jde směrem k anodě. K zastavení míchání vyrobených plynů se používá niklový materiál. [45][46][47]



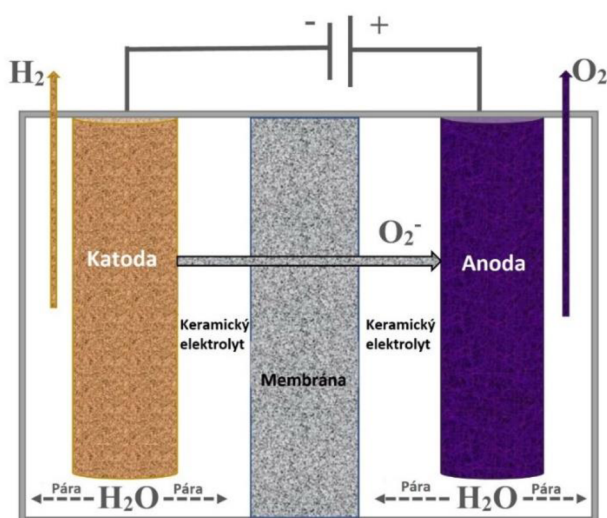
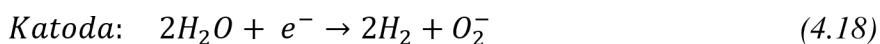
Obrázek 22 Schématický diagram AWE [45]

Výhodou alkalické elektrolýzy jsou nízké teploty, jednoduchost procesu, spolehlivost zařízení, nízká cena a komerční využití. Proti tomu nevýhodou jsou velké rozměry zařízení,

velká energetická náročnost a využívání azbestové membrány, která se používá k oddělení anodové smyčky od katodové. Další nevýhodou je usazování karbonu na elektrodách a náchylnost elektrolytu na korozi. [45][46][47]

Vysokoteplotní elektrolýza

Vysokoteplotní elektrolýza, neboli elektrolýza pevných oxidů, probíhá při teplotách od 700 do 900 °C a tlaku do 3 MPa. Jedná se o nejméně pokročilý typ elektrolýzy kvůli materiálové náročnosti, ale účinnost se pohybuje nad 90 %. Používá se keramický elektrolyzér, ten je odolný vysokým teplotám a má rychlou odezvu, ale je náchylný na teplotní změny. Molekuly vody se redukují na katodě a vznikají dvě molekuly vodíku a dvě molekuly iontů kyslíku. Molekuly kyslíku se poté pohybují k anodě a vzniká kyslík. [45][47]

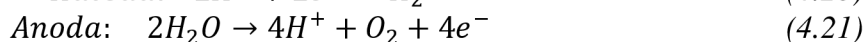


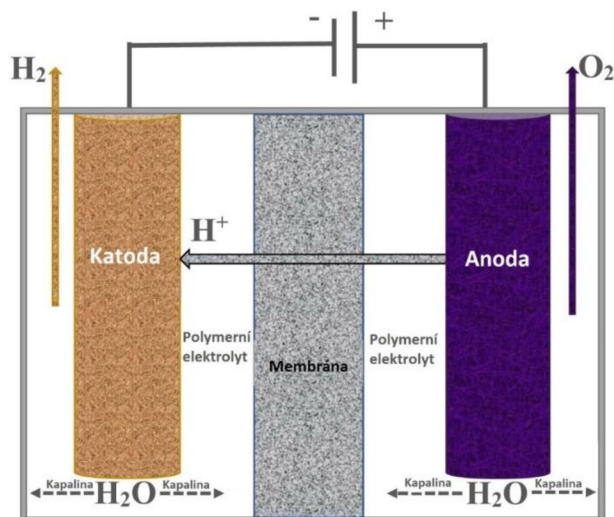
Obrázek 23 Schéma SOE [45]

Výhodou této metody je, že ke štěpení vody se využívá energie v podobě tepla (cca 1/3) a to snižuje potřebné množství elektrické energie. Využívá se neušlechtilých katalyzátorů a dosahuje se vysokých výkonů. Nevýhodou je křehkost keramiky, nízká životnost a v současnosti pouze laboratorní využití. [45][47]

Elektrolýza s proton-výměnnou membránou

Elektrolýza s proton-výměnnou membránou byla vyvinuta, aby eliminovala nevýhody AWE elektrolýzy. Jedná se o kyselou elektrolýzu. Tato metoda využívá pevnou polymerní membránu jako elektrolyt. Pracuje při teplotách od 20 °C do 100 °C a tlaku až 40 MPa. PEM metoda dosahuje účinnosti 80–90 %. Proton elektronová membrána umožňuje protonu (nosič energie) přes ni procházet a zároveň zamezit průchodu jiných látek. Na anodě dochází k oxidaci dvou molekul H₂O a vzniká jedna molekula O₂ a čtyři molekuly iontů H⁺. Dvě molekuly iontů H⁺ jsou na katodě redukovány a vzniká jedna molekula H₂. [45][46][47]





Obrázek 24 PEM metoda [45]

Výhodou této metody je kompaktní rozměr zařízení a především flexibilita procesu. Elektrolyzátor je možné provozovat od 0 % do 100 % svého výkonu, takže by bylo možné tento typ elektrolyzy využívat ke stabilizaci elektrizační sítě. Hlavní nevýhodou této metody je její finanční nákladnost a korozivní elektrolyt. [45][47]

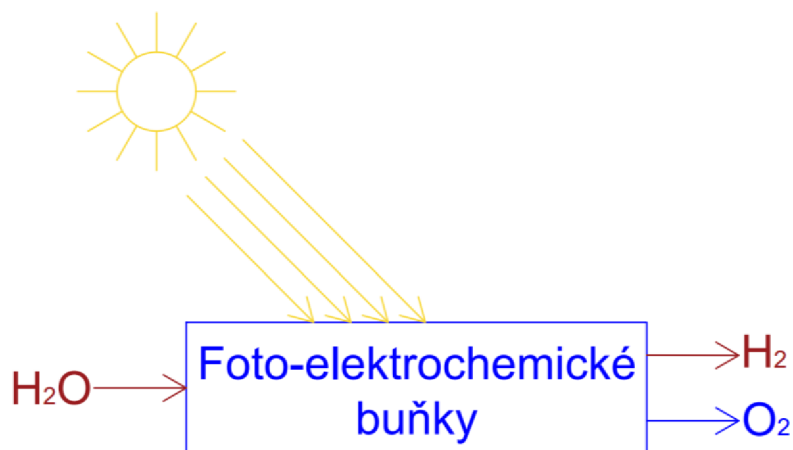
4.3.2 Termolýza

Termolýza, neboli termochemické štěpení, je chemický rozklad vody způsobený teplem. Jedná se o nejjednodušší metodu výroby vodíku a kyslíku. Prakticky by přímý rozklad vody proběhl až při vysoké teplotě nad 2 500 °C. Takových teplot nelze běžnými tepelnými zdroji dosáhnout. Z tohoto důvodu se termolýza skládá z několika termochemických cyklů štěpení vody, které snižují teplotu reakce a zvyšují její účinnost. Při použití dvoustupňového SnO₂/SnO cyklu probíhá reakce štěpení SnO₂ při teplotě 1 600 °C a vodík následně vzniká reakcí SnO a H₂O při teplotě 550 °C. I tak se jedná o vysokou teplotu, která lze dodat solární nebo jadernou energií. [42]

4.3.3 Foto-elektrolýza

Produkce vodíku foto-elektrolýzou probíhá i volně v přírodě ve dvou fázích. Fotosyntéza pomocí světelného ozáření zelených řas nebo sinic a následnou produkcí vodíku pomocí katalýzy enzymy. [34]

Průmyslová foto-elektrolýza spočívá v podobném principu. Provádí se pomocí foto-katalyzátorů (polovodičové materiály), které absorbují viditelné světlo a následně probíhá štěpení vody podobné elektrolyze. Rozkladem vody vzniká H₂ a O₂. Tato metoda však slibuje levnější výrobu vodíku než samotná elektrolyza. Odlišností je právě foto-katalyzátor (představuje povrch elektrody), který je nejčastěji z polovodičů, konkrétně z oxidů titanu. Dále se využívá speciálních mikroorganismů, jako jsou řasy a sinice. Je zde několik nevýhod jako např. že produkce kyslíku snižuje aktivitu enzymů. [34][42]



Obrázek 25 Foto-elektrolýza (přepřacováno [42])

4.4 Porovnání jednotlivých procesů

V následující tabulce 4 je provedeno jednoduché porovnání všech metod výroby vodíku, které byly zmíněny. Jako nejúčinnější se jeví metoda SOE elektrolýzy, která dosahuje účinnosti přes 90 %. Jedná se o elektrolýzu vody, která probíhá při vysokých teplotách (700–900 °C). Katalyzátor je z keramiky, je velmi křehký a má nízkou životnost. Kromě vysoké účinnosti výroby vodíku má tato metoda další výhody jako např. že ke štěpení vody využívá tepelné energie, a to snižuje potřebu energie elektrické. V současné době je tato metoda provozována, a především zkoumána pouze v laboratořích. Zbylé dva typy elektrolýzy mají také velmi vysokou účinnost výroby vodíku. Z ostatních procesů velmi dobré účinnosti dosahuje metoda parního reformování (SR) a to až 85 %. Jedná se o nejrozšířenější metodou současnosti, ale kvůli závislosti na fosilních palivech a uhlíkové neutralitě se od ní začíná ustupovat. [42][45][47]

Proces výroby H ₂	Účinnost [%]	Cena ¹ [\$/kg]	Hlavní výhody	Hlavní nevýhody
SR	70–85	2,27	Nejrozšířenější, prozkoumaná technologie, stávající infrastruktura	Závislost na fosilních palivech, produkce CO ₂
POX	60–75	1,48	Prozkoumaná technologie, stávající infrastruktura	Závislost na fosilních palivech, produkce CO ₂
ATR	60–75	1,48	Prozkoumaná technologie, stávající infrastruktura	Závislost na fosilních palivech, produkce CO ₂
Pyrolýza uhlovodíku	-	-	Bezemisní postup o méně krocích	Závislost na fosilních palivech, vedlejší uhlíkový produkt
Pyrolýza z biomasy	35–50	1,59–1,70	CO ₂ -neutrální, levná a bohatá surovin	Vznik dehtu, obsah H ₂ se mění v průběhu sezóny a znečištění
Zplyňování	-	1,70–2,05	CO ₂ -neutrální, levná a bohatá surovin	Vznik dehtu, obsah H ₂ se mění v průběhu sezóny a znečištění
Bio fotolýza	10	2,13	Spotřebává CO ₂ , vedlejší produkt O ₂	Potřeba sluneční záření, velký reaktor a nízký výtěžek H ₂
Foto-fermentace	0,1	2,83	CO ₂ -neutrální, využití odpadů	Potřeba sluneční záření, velký reaktor a nízký výtěžek H ₂
Tmavá fermentace	60–80	2,57	CO ₂ -neutrální, produkce H ₂ bez světla	Vyžaduje tmavé prostředí
AWE elektrolýza	70–80	10,3	Konvekční, levný a neušlechtilý katalyzátor	Usazování karbonu na elektrodách, elektrolyt je náchylný ke korozi
SOE elektrolýza	90–100	10,3	Neušlechtilé katalyzátory, vysoká účinnost	Nízká životnost, křehké (keramika), pouze v laboratořích
PEM elektrolýza	80–90	10,3	Malé a kompaktní zařízení, výroba velmi vysokého H ₂ , dynamický provoz	Drahé katalyzátory, elektrolyt je náchylný ke korozi, drahé
Termolýza	20–45	7,98–8,40	Čistá, udržitelná, O ₂ jediný vedlejší produkt	Drahé, toxické prvky, koroze
Foto-elektrolýza	0,06	8–10	Bezemisní, O ₂ jediný vedlejší produkt	Potřeba slunečního záření, nízká účinnost

Tabulka 4 Porovnání procesů výroby vodíku [42][45]

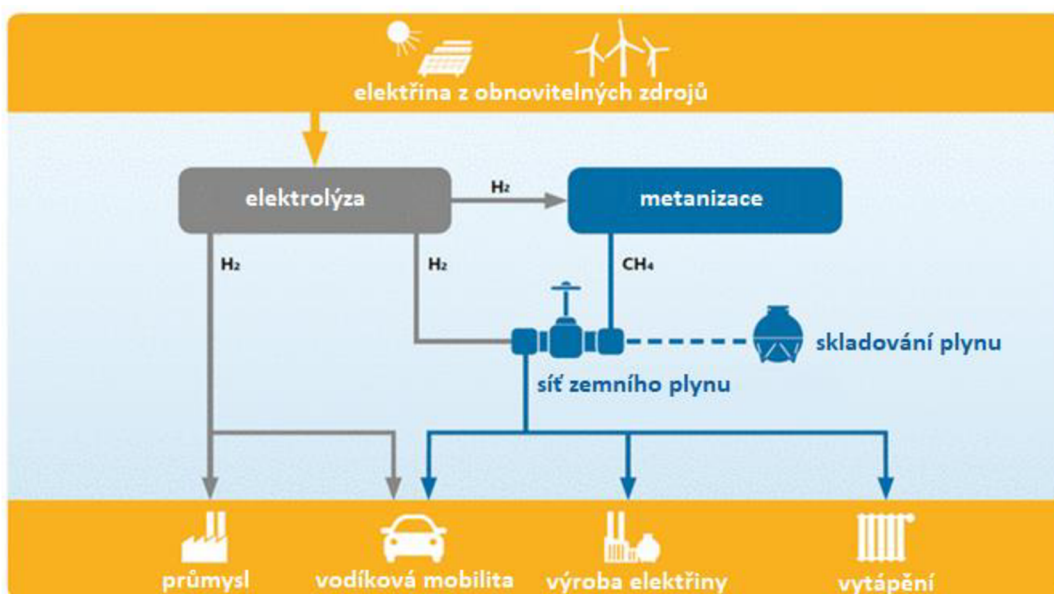
¹ Cena je stanovena na základě zdroje [97] z roku 2019

V této kapitole byly rozebrány veškeré procesy výroby vodíku, které se využívají, ať už průmyslově, tak i pouze laboratorně. Diplomová práce se zabývá systémem P2G, kde je vodík vyráběn pomocí elektrolýzy vody. Ostatní metody produkce vodíku byly zmíněny především pro uvedení do kontextu a případné porovnání. U systému P2G by některé způsoby výroby vodíku (z fosilních paliv, konkrétně zemního plynu) nedávaly smysl. U P2G se uvažuje, že z vyrobeného vodíku lze pomocí metanizace získat syntetický metan. Z tohoto důvodu by výroba ze zemního plynu byla vlastně přeměna metanu na vodík a následně zase na metan, což by z energetického hlediska znamenalo obrovské ztráty a především by to bylo nelogické.

5 Power to gas

Princip technologie power to gas spočívá ve využití přebytečné energie z obnovitelných zdrojů k akumulaci. Především v letních měsících se často stává, že je vyrobeno více elektrické energie, než je právě potřeba. Technologie P2G využívá tuto přebytečnou energii k výrobě vodíku, který můžeme dále skladovat, přímo využít nebo z něj vyrobit syntetický metan. Vodík se vyrábí pomocí elektrolýzy, která umožňuje disociaci vody na vodík a kyslík. Elektrolýza může být trojího typu, jak již bylo vysvětleno v minulé kapitole (PEM, AWE, SOE). [34][48]

Přebytečná energie je využívána na výrobu vodíku pomocí elektrolýzy vody. Vodík, který vyrobíme, můžeme využít několika způsoby dle následujícího obrázku 26. Může být využit přímo v průmyslu (petrochemický, chemický atd.) nebo jej můžeme využít pro pohon automobilů. Další přímé využití vodíku je takové, že jej vtlačíme do sítě pro rozvod zemního plynu. Pokud nechceme využít samotný vodík, můžeme z něj tzv. metanizací vyrobit syntetický methan, který dále použijeme. Lze ho využít stejně jako vodík vtlačení do sítě se zemním plynem. Zde je velká výhoda oproti čistému vodíku, protože v případě methanu se nemusí stávající infrastruktura nijak upravovat. Další využití syntetického methanu je v automobilovém průmyslu, k výrobě elektřiny a k vytápění. [34]



Obrázek 26 Příklad využití P2G [48]

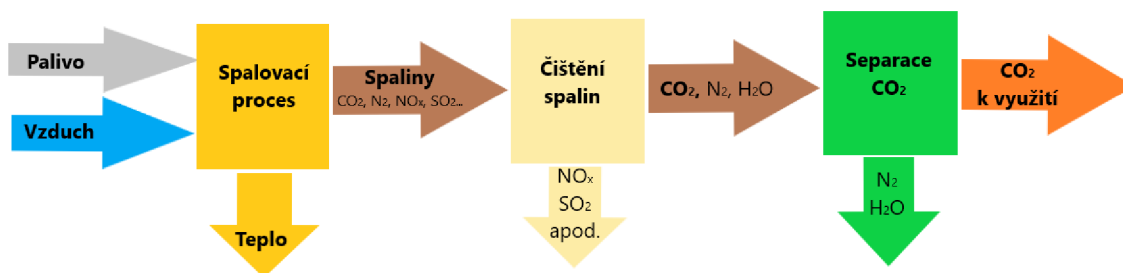
5.1 Metanizace

Metanizace je exotermická reakce přeměny vodíku s CO₂ na syntetický metan. Probíhá v přítomnosti katalyzátoru, který je většinou ve formě pelet, mezi kterými plyny proudí. Maximální chemická účinnost přeměny vodíku na metan je 78 %. Celý proces je doprovázen vznikem velkého množství tepla, které je v tomto případě odpadní produkt. Aby byly sníženy ztráty na minimum, dochází k využívání tohoto tepla. Reakci můžeme zapsat dle následující rovnice 5.1. [34][49][50]



Výhodou a důvodem proč provádíme po výrobě vodíku metanizaci je, že metan lze dodávat do plynárenské sítě bez omezení. Nemusí docházet k žádným úpravám již vzniklých rozvodů. Dále lze metanizaci považovat za vhodný způsob využití nežádoucího CO₂. Oxid

uhlíčitý by měl být dodáván s nízkými energetickými a ekonomickými náklady. Velmi výhodné se jeví používat zachycený CO₂ ze spalin zařízení spalujících fosilní paliva nebo případně biomasu. Dochází tak ke značnému snížení výsledných vyprodukovaných emisí. Přibližně od 80. let minulého století se mluví o dvou metodách a to Carbon Capture and Use (CCU) a Carbon Capture and Storage (CCS). Celý proces zachytávání CO₂ probíhá ve dvou fázích při rozdílných teplotách. Při nižších teplotách se váže do roztoku a při vyšších teplotách je z tohoto roztoku uvolněn. Samotné zachycení není v dnešní době tak velký problém, ale problémové je jeho ukládání. [34][49][50]



Obrázek 27 Zachytávání CO₂ (přepřacováno[50])

Dalším způsobem, jak zachytit CO₂ je přímo ze vzduchu. Jedná se o technologii známou jako Direct Air Capture (DAC). Technologii lze umístit i v lokalitách, kde není v blízkosti žádný bodový zdroj CO₂. DAC může probíhat buď jako vysokoteplotní (HT) nebo nízkoteplotní (LT) desorpční proces. Tato technologie je vhodná pro metanizaci, ale především by se mohla stát zásadní technologií pro zmírnění změn klimatu. [49][51]

Pokud máme veškeré potřebné „suroviny“ na výrobu metanu, může být provedena metanizace, která je dvojího typu. Může být katalytická nebo biologická.

Katalytická metanizace

Jedná se o metodu výroby syntetického metanu pomocí katalytické hydrogenace oxidu uhličitého. Nejčastěji se používají s katalyzátory na bázi Ni, Mo nebo Ru. Reakce probíhá za zvýšeného tlaku při teplotách 250–400 °C, jedná se tedy o silně exotermickou reakci s účinností cca 78 %. [34][50]

Biologická metanizace

Tento proces je založen na výměně chemických katalyzátorů za biologické. Katalyzátorem jsou vybrané mikroorganismy (enzymy), které využívají vodík a oxid uhličitý k produkci metanu a vody. Reakce probíhá za atmosférického tlaku při nízkých teplotách cca 40–70 °C. Zdrojem CO₂ je většinou bioplyn. Biologická metanizace dosahuje stejné účinnosti jako katalytická a to 78 %. [34][50]

5.2 Použití vyrobeného vodíku nebo methanu

Vodík i metan se využívají v různých průmyslových odvětvích, od potravinářství přes hutnictví až po energetiku. Případné navýšení výroby vodíku pomocí technologie P2G přináší výhody využití vodíku/metanu a má vliv na stávající trh s těmito komoditami. Konkrétně ovlivňuje jejich cenu a rozvoj používání v nových sektorech. Výroba vodíku z přebytku elektřiny z obnovitelných zdrojů by měla nahradit část vodíku, který je vyráběn z fosilních paliv pomocí parního reformování, parciální oxidace a autotermálního reformování. Tyto metody mají dobrou účinnost při výrobě vodíku (60–85 %), ale produkují emise CO₂. [34][42]

Vodík a metan vyrobený pomocí technologie P2G lze využít v průmyslu, jako palivo pro automobily, v palivových článcích nebo ho přidávat do rozvodné sítě zemního plynu.

Další možností je uskladnění vodíku (metanu) a jeho následné pozdější využití jako zdroje elektrické energie (Power to gas to power – P2G2P) nebo jako zdroj tepelné energie (Power to gas to heat – P2G2H).[34][50]

5.2.1 Průmysl

Vodík je cenná surovina pro průmysl. Především pro chemický, petrochemický a metalurgický. Ročně se v průmyslu spotřebuje cca 600 miliard m³ vodíku. Hlavním odběratelem vodíku je petrochemický průmysl kvůli odsíření. Významné využití vodíku je při výrobě čpavku pro hnojiva. Dále slouží jako základ pro mnoho sektorů, od výroby oceli po jemnou chemii a elektroniku. Vodík dodávaný do všech těchto sektorů v současnosti pochází především z fosilních paliv a to konkrétně z parního reformování. [34][52]

Díky výrobě vodíku pomocí elektrolýzy jsme schopni vyrobit i malé množství vodíku o velmi vysoké čistotě, to je velkou výhodou u jemné chemie a elektroniky. Vodík lze také vyrábět lokálně nebo dokonce přímo v místě jeho spotřeby, což je jeho další pozitivum. [34]

5.2.2 Přidávání do zemního plynu

Vodík případně metan vznikající elektrolýzou (metanizací) pomocí P2G konceptu by měl být přednostně dopravován a skladován v plynárenské síti zemního plynu. Z pohledu skladování se jedná se o velkokapacitní zařízení. Vstřikování vodíku nebo metanu do zemního plynu lze pouze v určitém složení a objemu, aby se celý proces obešel bez problémů. [52]

Přidávání metanu, který vznikl metanizací vodíku vyrobeného pomocí elektrolýzy vody do plynárenské sítě zemního plynu, je v podstatě bezproblémové oproti přidávání vstřikování samotného vodíku. Zemní plyn je z velké části tvořen právě metanem. Proto je možné prakticky neomezeně přidávat metan vzniklý metanizací vodíku do plynárenské sítě. [52]

Vstřikování vodíku do rozvodné sítě zemního plynu s sebou nese spoustu úskalí, která byla již zkoumána v několika studiích. Problém nastává v tom jak vodík v zemním plynu (v budoucnu se uvažuje dokonce jen čistý vodík) ovlivňuje vlastnosti směsi, potrubí a spotřebičů, které jej následně využívají. Vodík může při určité koncentraci, tlaku a při určitých vnějších podmínkách napadnout kovovou strukturu potrubí. Může zeslabit trubky a zvýšit tak riziko úniku. Tento jev se nazývá tzv. vodíkové křehnutí. Dále hoření vodíku je velmi odlišné od zemního plynu. Hoření čistého vodíku připomíná spíš výbuch. To má sice velkou výhodu v přeměně plynu na teplo, ale přináší to bezpečnostní a technické problémy spalovacího zařízení. [52][53]

Vliv obsahu vodíku přimíchaného do zemního plynu můžeme porovnat pomocí tzv. Wobbeho čísla² a změny výhřevnosti. Základem pro toto porovnání jsou stávající předpisy sítě zemního plynu. S rostoucím množstvím vstřikovaného vodíku se snižuje Wobbeho číslo a také klesá výhřevnost směsi. Přípustné množství vodíku, který lze vstřikovat, závisí na kvalitě zemního plynu. Příměs, která je pro stávající rozvody přípustná, je 5 až 15 %. Při použití kvalitního zemního plynu to může být až 20 %. Potrubí, ovládací prvky, těsnění a armatury vydrží bez poškození příměs vodíku do 30 %. Aby mohla být přepravována směs se stejným množstvím energie, musí být přepravováno větší množství směsi (vodík + zemní plyn), než když je přepravován čistý zemní plyn. Větší přepravované množství má za následek vyšší tlakové ztráty, vyšší výkon a navýšení počtu kompresorů. [52][53]

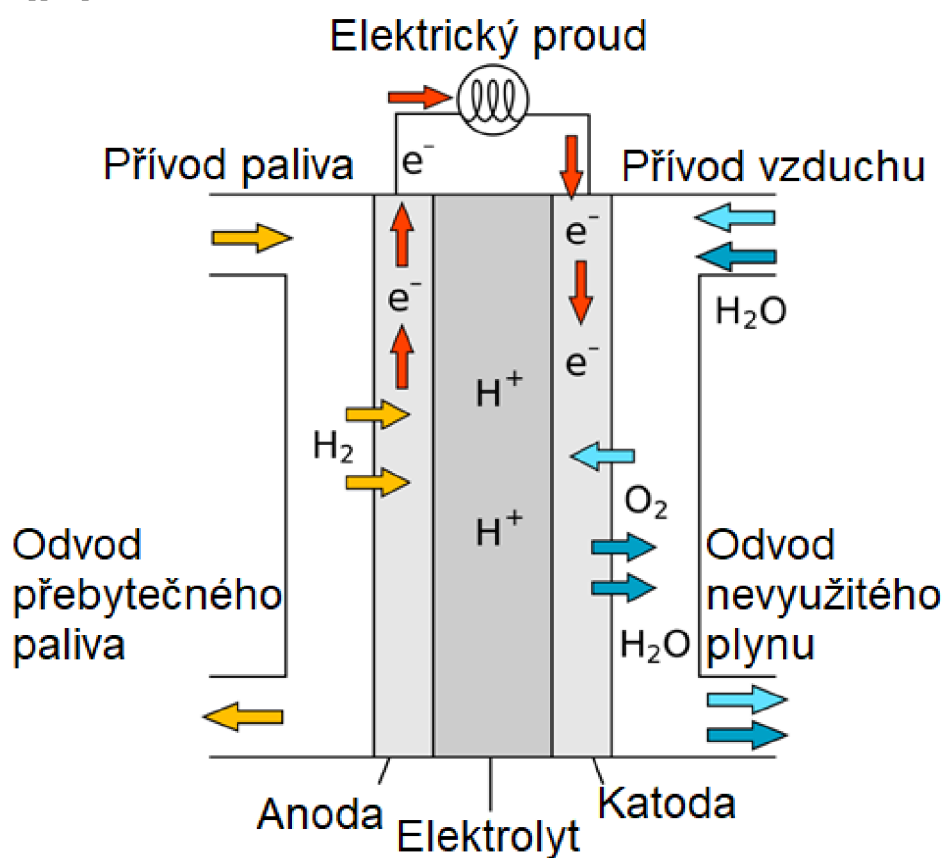
Přidávání vodíku do plynárenské sítě zemního plynu přináší i několik výhod. Hlavní výhodou je snížení emisí skleníkových plynů, protože v P2G konceptu je vodík vyráběn pomocí přebytečné energie z obnovitelných zdrojů. Zemní plyn s příměsí vodíku se stane

² Wobbeho číslo je základní kritériem záměnnosti druhů zemního plynu [54]

„ekologičtější“. Dojde ke zvýšení podílu obnovitelných zdrojů na energetickém mixu. Oproti tomu nevýhody jsou ve vyšší ceně směsi a hlídání obsahu vodíku ve směsi, aby nedošlo k poškození potrubí nebo případnému výbuchu. [52][55]

5.2.3 Palivové články

Palivový článek funguje na stejném principu jako PEM elektrolýza. Rozdílem je, že vodík reaguje s kyslíkem (nebo vzduchem) za vzniku elektřiny, tepla a vody. Princip výroby elektřiny pomocí tzv. palivového článku byl objeven již v roce 1838. Teprve v polovině 60. let 20 století byla technologie vyvinuta organizací NASA pro první lety do vesmíru. Princip výroby elektřiny pomocí palivového článku je znázorněn na následujícím obrázku 28. Vodík s kyslíkem (nebo vzduchem) reaguje na proton vodivé membráně s vrstvou platiny, která slouží jako katalyzátor reakce. Membrána se nachází mezi dvěma elektrodami. Vodík je přiváděn k anodě (záporná elektroda) a kyslík je přiváděn ke katodě (kladná elektroda). Protony pronikají skrz membránu a elektrony prochází přes vnější okruh za vzniku elektrické energie. [34][56]



Obrázek 28 Princip palivového článku [57]

Existují různé typy palivových článků. Odlišují se především jejich provozní teplotou a typem elektrolytu. Na základě provozní teploty lze palivové články rozdělit na nízkoteplotní (60–130°C), středně teplotní (160–220 °C) a vysokoteplotní (600–1050 °C). Podle typu elektrolytu palivové články dělíme na alkalické (AFC), s polymerní elektrolytickou membránou (PEMFC), s tuhými oxidy (SOFC), s kyselinou fosforečnou (PAFC) a s taveninou alkalických uhličitánů (MCFC). [58]

Alkalické palivové články

Alkalické palivové články jsou nízkoteplotní palivové články, kde funkci elektrolytu plní sloučeniny alkalických kovů. Nejčastější elektrolyt je na bázi hydroxidu draselného

(KOH). Palivové články typu AFC se využívají především v oblasti kosmonautiky a letectví. Dosahují vysokých výkonů a účinnosti cca 60 %. Jejich výrobní a následně provozní náklady jsou nízké. Nevýhodou jsou jejich velké rozměry a jako tzv. palivo se využívá čistý vodík a kyslík. Nelze využívat vzduch kvůli obsahu CO₂, který by jej poškodil. [58][59]

Palivové články s polymerní elektrolytickou membránou

Palivové články s polymerní elektrolytickou membránou se řadí mezi nízkoteplotní palivové články, kde se využívá polymerní elektrolyt (PEM) neboli tzv. proton vodivá membrána. Tento elektrolyt je nejčastěji pevný z kyseliny sulfonové a je vložen mezi dvě porézní elektrody. [58]

Tento typ palivového článku pracuje při nízkých teplotách, a to mu umožňuje rychlé najíždění, odezvu a změnu výkonu. Pracuje s účinností až 60 %. Jsou to jedny z nejvíce vyvinutých a využívaných palivových článků. Jejich nejčastější využití je jako pohon automobilů, dále mohou být využity jako stacionární baterie nebo jako přenosný zdroj energie, díky jejich kompaktním rozměrům. Nevýhodou jsou jejich vysoké výrobní náklady a složitý systém regulace vody. Prvním problémem může být nedostatek vody v elektrolytu, takže se musí doplňovat. Opačným problémem je nadbytek vody, který způsobí tzv. zaplavení. Při nízkých teplotách dochází k zamrznutí vody, která může palivový článek poškodit. [58][59]

Speciálním typem palivového článku s polymerní membránou je článek pro přímou reakci metanolu (DMFC). Jedná se o velmi malé, levné a praktické palivové články, které místo vodíku využívají jako palivo metan. Výhodou je právě palivo ve formě metanu, které se oproti vodíku bezproblémově skladuje a přepravuje. [58][59]

Palivové články s tuhými oxidy

Palivové články s tuhými oxidy lze definovat jako vysokoteplotní palivové články s pevným elektrolytem. SOFC je nejméně vyvinutý typ palivových článků, protože díky vysokým provozním teplotám (800–1000°C) se používají velmi drahé keramické materiály. Materiálový výzkum objevil keramické materiály, které snižují provozní teplotu na cca 600 °C. Tato teplota již umožňuje využití běžných materiálů na ostatní díly palivového článku. U tohoto typu je velmi důležité, aby veškeré použité materiály měly podobný koeficient roztažnosti při vysokých teplotách. [58][59]

Palivové články s kyselinou fosforečnou

Jedná se o středně teplotní palivové články, kde je elektrolyt tvořen kyselinou fosforečnou. Jsou již delší dobu komerčně využívány. Dosahují účinnosti cca 40 %. Při jejich použití musí být zajištěn odvod tepla. [58]

Palivové články s tavenými uhličitany

Jedná se o vysokoteplotní palivové články s elektrolytem ve formě taveniny alkalických uhličitánů. Mohou dosahovat vysokých výkonů s účinností až 50 %. Hlavní výhodou tohoto typu je, že umožňuje vnitřní reforming paliva. [58][59]

Typ palivového článku	Palivo	Provozní teplota [°C]	Účinnost [%]	Výhody	Nevýhody
AFC	H ₂	90–100	60	Levný, rychle reaguje na změny	Velké, citlivé na znečištění paliva
PEMFC	H ₂ , methanol	50–100	35–60	Kompaktní, dlouhá životnost, rychlý náběh	Chemicky čisté palivo, složitá regulace, drahý katalyzátor
SOFC	H ₂ , ZP	650–1000	60	Nemá vysoké nároky na palivo	Koroze, vysoká teplota, krátká životnost
PAFC	H ₂ , ZP, CO	150–200	40	Nevadí nečistoty v palivu, kogenerace	Omezená životnost, drahý katalyzátor, nízká účinnost
MCFC	H ₂ , ZP, CO	600–700	45–50	Variabilita paliv, kogenerace	Koroze, vysoká teplota, krátká životnost

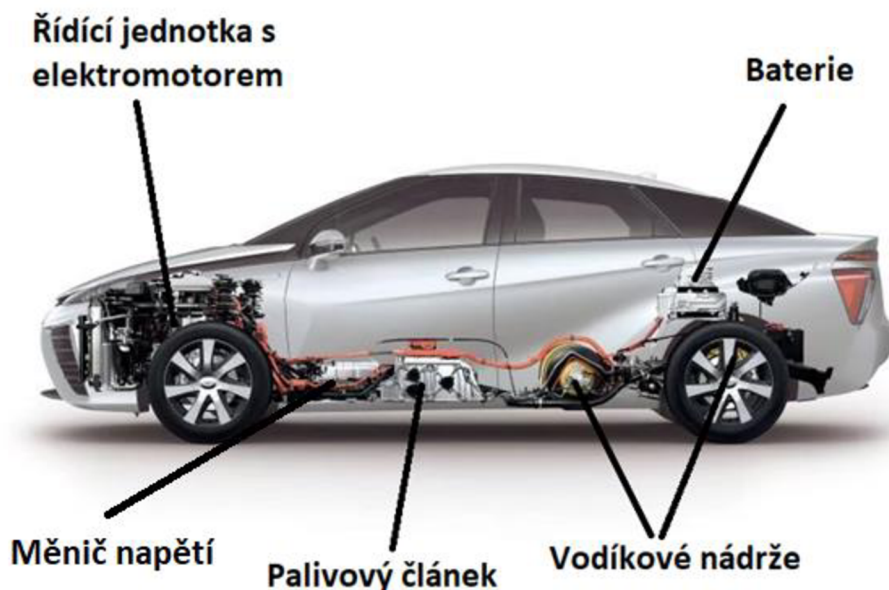
Tabulka 5 Porovnání palivových článků [58][59]

5.2.4 Vodíková mobilita

Vodík je slibný nosič energie, z tohoto důvodu je s ním uvažováno jako s palivem u automobilů. Vodíkem poháněný automobil existuje dvojího typu. Prvním typem je vůz se spalovacím motorem, kde se místo benzínu nebo nafty jako palivo používá vodík. Tento prototyp byl sestaven již v roce 1807. Jednalo se o první vůz se spalovacím motorem. Ačkoliv se jednalo o významný milník pro spalovací motor, tak vodíkem poháněný spalovací motor zůstal pouze u prototypu a nebyl nikdy vyráběn. Druhým typem je automobil, který má zabudované palivové články a elektrobaterii. Baterie je bohužel nezbytnou součástí. Kdyby se využíval pouze samostatný palivový článek, tak by vůz nebyl schopný dynamické jízdy (zrychlování, předjíždění), protože palivový článek nedokáže vyvinout dostatečné množství energie. [60]

První osobní automobil na vodík s palivovými články, který se vyráběl ve větším množství, byl na trh uveden v roce 2013. Jednalo se o vůz značky Hyundai. Další značky, které vyrábí vodíkové vozy, jsou Toyota nebo Honda. Ke konci roku 2019 bylo celosvětově provozováno cca 25 000 automobilů na vodík. Důvodů, proč jich je tak malé množství, je hned několik. Prvním je jejich vysoká pořizovací cena. Dalším důvodem je nedostatek čerpacích stanic. V USA jich v roce 2019 bylo pouze 64 (v ČR nejsou žádné). Když provedeme porovnání s klasickým elektromobilem, kterých v roce 2020 jezdilo po světě cca 7,2 milionů a počet čerpacích stanic roste každým dnem. Využití vodíkových automobilů se v současné době nejeví zrovna příznivě a budoucnost bude spíše patřit klasickým elektromobilům, které jsou levnější, praktičtější a mají již relativně širokou infrastrukturu čerpacích stanic. [61]

Automobil na elektrický pohon s palivovými články musí být vybaven vodíkovými nádržemi (většinou jsou dvě) a soustavou palivových článků, které z vodíku z nádrží a vzduchu vyrábějí elektrický proud. Dále je součástí pohonné soustavy baterie, měnič napětí, řídicí jednotka a elektrický motor. Baterie podporuje palivové články při dynamické jízdě a uchovává rekuperovanou energii z brzdění. Měnič napětí zvyšuje napětí získané z palivových článků, kdyby zde nebyl, bylo by za potřeby větší množství palivových článků k dosažení požadovaného napětí. Nedílnou součástí je řídicí jednotka, která řídí napájení elektromotoru buď přímo z palivových článků anebo z baterií. Dále řídí dobíjení baterie. [62][63]



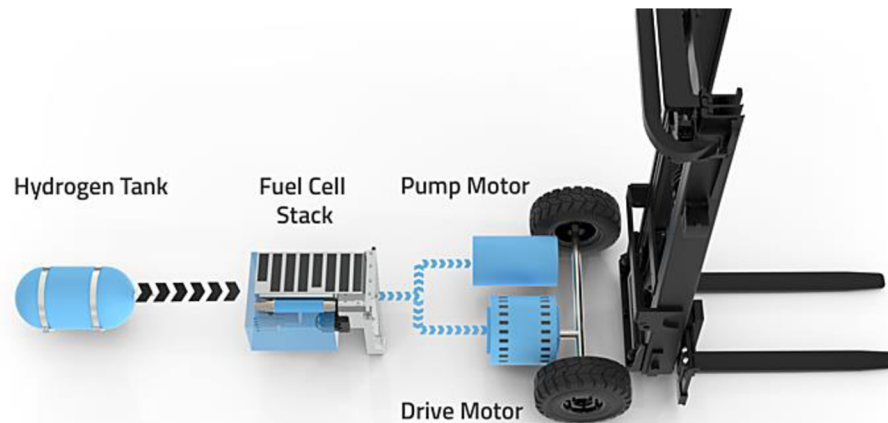
Obrázek 29 Pohonný systém vodíkového automobilu [64]

Výhod vodíkového pohonu je hned několik. Především se jedná o bezemisní jízdu, automobil vylučuje jako odpadní produkt pouze vodu. V současné době rostou nároky na nízké emise u automobilů se spalovacím motorem a automobilky musí neustále vylepšovat své technologie. Další výhodou je tichý provoz, který je však i u elektromobilů. Výhodou oproti již zmíněným elektromobilům je rychlé tankování a dlouhý dojezd. Nevýhodou je vysoká pořizovací cena, vysoká hmotnost, velké rozměry palivového článku s baterií a především nedostatečná infrastruktura čerpacích stanic. [60][61]

Elektromobily značně převyšují vodíkové automobily hlavně z ekonomického hlediska. Automobilky, které vyrábějí auta s vodíkovými palivovými články, ustupují od jejich propagace. Stále však existují určité aplikace, kde může vodíková strategie dávat smysl. Na rozdíl od trhu s lehkými vozidly (osobní automobily), pro trh s těžkými vozidly (autobusy, vojenská technika, vlaky, nákladní vozidla atd.) může vodíkový pohon najít využití. Hlavním důvodem, proč by zde vodík mohl být efektivní, je krátká doba tankování v porovnání s hodinami nabíjení elektrického pohonu. Tyto vozidla (ať už nákladní nebo např. autobusy) jsou v provozu celý den a nemohou si dovolit dlouhé prostoje spojené s nabíjením. Těžká vozidla na rozdíl od osobních automobilů nejsou tolik závislá na distribuční síti čerpacích stanic. Autobusy, lodě či vojenská vozidla jezdí poměrně často předem určené a stejné trasy, takže by bylo možné zajistit jejich tankování v centrálních uzlech. [61]

Vodíkový pohon u těžkých vozidel už je v současnosti provozován. V železničním sektoru byl prototyp vodíkového vlaku použit v dole v USA. Až v roce 2017 se podařilo certifikovat první vlak na pravidelné lince a to konkrétně v Německu. V roce 2011 v USA

upravili elektrické nákladní vozidlo pomocí palivových článků na poháněné vodíkem. Následovaly další prototypy od známých automobilek, jako je Toyota nebo třeba Tesla. Využívání palivových článků v námořním a leteckém sektoru je ve fázi výzkumu. V současné době neexistuje komerčně využívané plavidlo nebo letadlo. Jeden z mála sektorů, kde se již komerčně využívá vodíkový pohon, je logistika. První experimenty proběhly již v roce 1960 a v současnosti je v provozu několik tisíc vysokozdvížných vozíků na vodík. Využívají je např. firmy jako Walmart (obchodní řetězec v USA), BMW (továrna), FedEx aj. [34][61]



Obrázek 30 Pohonná soustava vysokozdvížného vozíku [65]

6 Energetická účinnost jednotlivých přeměn

Power to gas metodou vyrobíme tzv. zelený vodík. Ten lze využít přímo nebo jej můžeme přeměnit na složitější uhlovodíky např. metan, který dále využíváme. Z principu se jedná o způsob akumulace přebytečné elektrické energie. Tato metoda má jisté výhody, ale i nevýhody. Početně se může zdát, že výhod je více než nevýhod. To je do jisté míry pravda, ale jakákoliv metoda nebo technologie musí být ekonomicky a z pohledu účinnosti výhodná. [66]

Výhody:

- Uhlíkově neutrální technologie tzv. zelená.
- Předpokládá se, že může přispět k dekarbonizaci sektorů, které bez fosilních paliv nemohou fungovat.
- Jedná se o čistý zdroj energie bez nežádoucích příměsí.
- Vhodným způsobem přepravy a uložením lze skladovat elektřinu dlouhodobě.

Nevýhody:

- Nízká energetická účinnost – každým dalším mezistupněm přeměny dochází ke ztrátám, které v součtu mohou být tak vysoké, že se akumulace danou technologií nevyplatí.
- Drahé zařízení.

V této kapitole budou rozebrány jednotlivé mezistupně přeměn. Jejich princip, výsledné ztráty a použité technologie. V závěru bude vybráno několik konkrétních aplikací vyrobeného vodíku, které budou mezi sebou porovnány.

6.1 Společné zásady

Výsledné využití vyrobeného vodíku může být různé. Lze ho využívat v průmyslu nebo v palivovém článku. Přidáním baterie k palivovému článku vznikne vodíkový automobil. Metanizací lze vyrobit metan, který lze následně neomezeně vtlačit do sítě zemního plynu.

U P2G systému vždy potřebujeme elektřinu z OZE, kterou přeneseme k odběrateli sítí. Dále ji využijeme pomocí elektrolýzy vody k výrobě vodíku. Vyrobený vodík musíme uskladnit, případně přepravit. V této podkapitole budou tyto tři procesy podrobněji rozebrány, jaký mají vliv na celkové ztráty, jakých technologií využíváme a jak je jejich provoz náročný z technologického hlediska.

6.1.1 Přenos elektrické energie

Základem je elektřina z obnovitelných zdrojů (slunce, voda, vítr, biomasa), kterou musíme dopravit do místa spotřeby. Právě dopravou (přenosem) elektřiny vznikají ztráty. Proud ze zdroje je v řádu desítek tisíc ampérů. K přenosu takhle silného proudu musí být elektřina přenášena velmi silnými vodiči, které unesou velké napětí a velké magnetické síly. Tyto vodiče zvládnou velké napětí, ale kladou velký odpor, který se projevuje v podobě ztrát. K eliminaci ztrát se zvyšuje napětí a díky tomu je soustava schopná přenést stejný výkon při využití menšího proudu. Ztráty lze rozdělit na technické a obchodní. Bude uvažováno pouze s technickými ztrátami, které vznikají fyzikálními účinky elektrické energie. Konkrétně mezi tyto ztráty přenosem patří: ztráty svodem, Joulovy ztráty a ztráty korónou. [67][68]

Ztráty svodem vznikají především u venkovních vedení. Jedná se o tzv. pronikavost proudu, která je způsobena nedostatečnou izolací vedení. [68]

Joulovy ztráty neboli tzv. Joulovo teplo vzniká ve vodičích průchodem elektrického proudu. Jakmile vodičem prochází proud, jsou elektrony urychlovány a při svém pohybu

narážejí do mřížky atomů a předají jí část své kinetické energie a tím dochází k tzv. zahřívání. Tento jev lze vyjádřit jednoduchým vzorcem viz rovnice 6.1. [68][69]

$$Q = R \times I^2 \times t \quad (6.1)$$

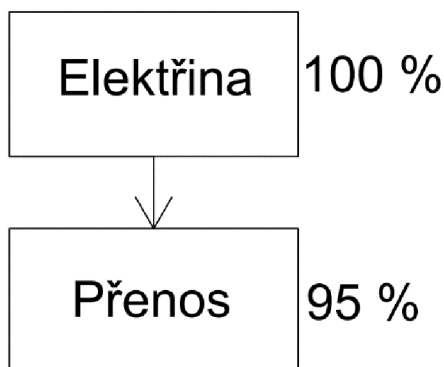
$$I = \frac{U}{R} \quad (6.2)$$

Kde:

Q	Jouleovo teplo [J]
R	Odpor [Ω]
I	Elektrický proud [A]
U	Napětí [V]
t	Čas [s]

Ztráty korónou neboli tzv. sršením, vznikají mezi jednotlivými vodiči, které nejsou dokonale izolované. Jedná se o výboj, kdy dochází k přeskoku mezi vodiči. Koróna vzniká za určitých okolních podmínek (teplota, vlhkost, tlak atd.). Jedná se o zvukový jev doprovázený světelným efektem, který je viditelný pouze pod UV světlem. [68][70]

Celkový výpočet ztrát přenosem elektrické energie vedením je komplikovaný a není předmětem této diplomové práce. Z tohoto důvodu budou ztráty způsobené přenosem elektrické energie stanovené na 5 %. [68] Celková účinnost přenesené elektrické energie je tedy 95 %.



Obrázek 31 Účinnost přenesené elektrické energie

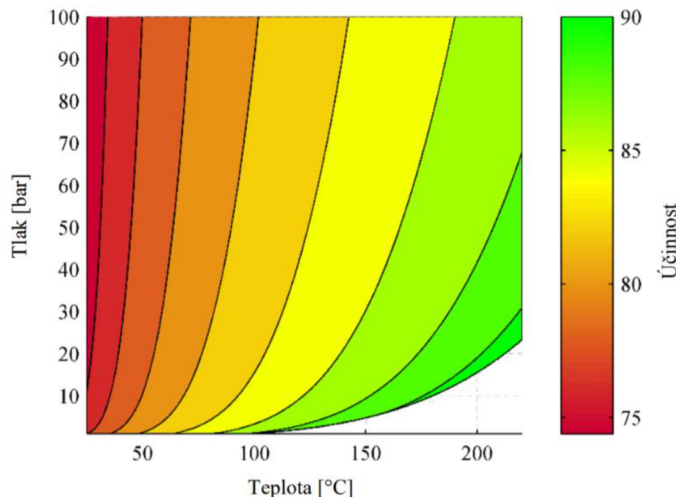
6.1.2 Výroba vodíku

U technologie power to gas se uvažuje s výrobou vodíku pomocí elektrolýzy vody. Elektrolýza může být trojího typu: alkalická (AWE), vysokoteplotní (SOE) a s proton výměnnou membránou (PEM). Jednotlivé typy byly podrobně popsány ve 4. kapitole - Výroba vodíku a konkrétně v části 4.3.1 Elektrolýza.

Celý proces probíhá v tzv. elektrolyzáru. Elektrolyzáru je zařízení, ve kterém dochází k rozkladu vody pomocí stejnosměrného proudu. Skládá se ze zdroje stejnosměrného proudu, katody a anody ponořené v elektrolytu. Katoda s anodou jsou od sebe odděleny pomocí membrány. Součástí musí být ještě zařízení (nádrž, nádoba, láhev) na skladování vyrobeného vodíku.

Část energie je spotřebována na výrobu vodíku. Celková účinnost elektrolýzy je ovlivněna několika faktory. Velkou roli má tlak a teplota, při které elektrolýza probíhá. Dále materiál elektrod, vzdálenost elektrod, typ elektrolytu, napětí článku a pulzující napětí. S rostoucím tlakem roste spotřeba elektrické energie potřebná na výrobu vodíku, a tím klesá

účinnost. Vyšší tlak má však i výhody. Snižuje odporové ztráty a množství plynu zabírá menší objem. Dle teploty můžeme elektrolýzu rozdělit na nízkoteplotní (voda je kapalina) a vysokoteplotní (voda jako pára). Při vyšších teplotách roste účinnost. Je tomu tak, protože se zvyšující se teplotou klesá Gibbsova energie ΔG^3 a entalpie reakce ΔH je v podstatě beze změny. [45][46][71]



Obrázek 32 Vliv tlaku a teploty na celkovou účinnost AWE elektrolýzy [71]

Materiál elektrod a jejich vzdálenost má vliv na celkový elektrický odpor a následně na účinnost. Jednoduše řečeno, s menším elektrickým odporem je třeba menšího napětí k rozkladu vody a účinnost je vyšší. Volba materiálu elektrod je důležitá, protože každý materiál má různou vodivost a tím pádem i odpor. Na celkový odpor má také vliv vzdálenost elektrod. Čím blíže máme elektrody, tím menší je odpor. Toto platí do určité vzdálenosti (cca 0,8 mm), pak odpor s větší vzdáleností roste. Ideální vzdálenost elektrod se pohybuje v rozmezí 0,8 až 3 mm. [71]

Na odpor má vliv také elektrolyt, který zvolíme. U AWE elektrolýzy se jako elektrolyt používá roztok na bázi KOH nebo NaOH s koncentrací do 30 %. U SOE elektrolýzy se využívá pevných oxidů. U PEM elektrolýzy se používá pevná polymerní membrána. Hlavní parametry, které u elektrolytů sledujeme, je jeho vodivost (případně její změna s koncentrací a teplotou) [45][46]

Při působení pulzujícího napětí vzniká vodík především, když pulz působí. Bylo však objeveno, že i po uplynutí pulzu vzniká na elektrodě určité množství vodíku. Toto množství vodíku je sice mnohonásobně menší, ale vzniká i když je zdroj vypnutý. To má za následek zvyšování účinnosti. Když bychom k výrobě vodíku využili konstantní proud o stejném množství jako pulzující, množství vyrobeného vodíku bude menší než u pulzního proudu. [71]

Účinnost elektrolýzy je vyšší, když na dvou sousedních člancích je napětí nižší. Nejvyšší účinnosti dosáhneme při tzv. termoneutralním napětím 1,48 V. Toto je však pouze teoretická hodnota, protože k překonání odporu v elektrolytu je za potřebí napětí cca 2 V. Dále s vyšším napětím dochází k efektivnímu štěpení vody. [71][72]

Celková účinnost elektrolyzéry se vypočítá jako energie získaná (vodík) ku energii spotřebované k jeho výrobě viz rovnice 6.3. [72]

³ Maximální možná práce (bez objemové), kterou systém vykoná. [73]

$$\eta = \frac{E_{zisk}}{E_{spotř}} \quad (6.3)$$

$$E_{zisk} = V_h \times H_t \quad (6.4)$$

$$E_{spotř} = P \times t \quad (6.5)$$

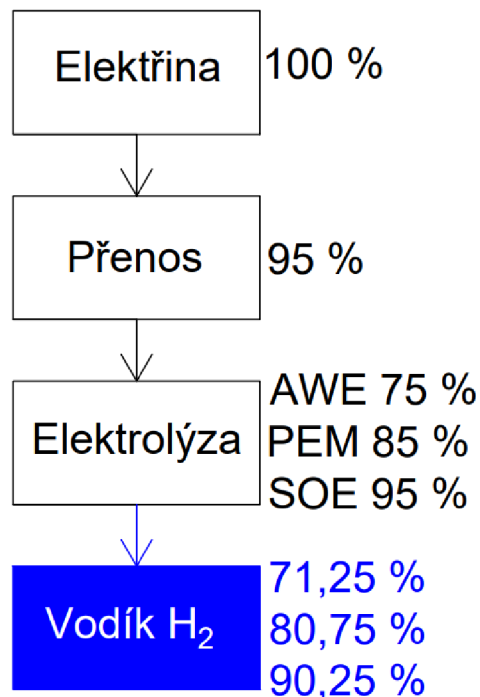
Kde:

η	Účinnost [-]
E_{zisk}	Energie získaná (vodík) [J]
$E_{spotř}$	Energie potřebná k výrobě vodíku [J]
V_h	Objem vyprodukovaného vodíku [m ³]
H_t	Spalné teplo pro vodík [J/m ³]
P	Příkon [W]
t	Čas [s]

Celková účinnost se značně liší podle toho, který typ elektrolýzy použijeme. Nejběžnější je alkalická elektrolýza. Jedná se o průmyslově používaný typ elektrolýzy a zároveň nejlevnější. Využívá neušlechtilé katalyzátory (levné), ale dochází zde k usazování. Ze všech dostupných typů elektrolýz má AWE nejnižší účinnost. Účinnost se pohybuje mezi 70–80 %. Bude uvažováno s účinností 75 %. Když započítáme účinnost přenosové soustavy a účinnost elektrolýzy, tak vyrobíme vodík s účinností 71,25 %.

Výroba vodíku elektrolýzou s proton výměnnou membránou má účinnost 80–90 %. Byla vyvinuta, aby eliminovala nedostatky AWE elektrolýzy. Elektrolýzátor může mít velmi kompaktní rozměry a celý proces je flexibilní. Regulovat výkon elektrolýzátoru lze od 0 % do 100 %. Na druhou stranu se jedná o drahou metodu. Bude uvažováno s účinností 85 %. Když započítáme účinnost přenosové soustavy a účinnost elektrolýzy, tak vyrobíme vodík s účinností 80,75 %.

Při využití vysokoteplotní elektrolýzy k výrobě vodíku dosáhneme účinnosti více než 90 %. Jedná se však o elektrolýzu, která je v současné době provozována pouze v laboratorním měřítku a využívá křehké materiály (keramika) a velmi vysoké teploty. Bude uvažováno s účinností 95 %. Když započítáme účinnost přenosové soustavy a účinnost elektrolýzy, tak vyrobíme vodík s účinností 90,25 %. V následujícím obrázku 33 jsou zakresleny jednotlivé účinnosti všech třech typů elektrolýzy včetně celkové účinnosti vyrobeného vodíku. Jsou řazeny postupně od AWE přes PEM po SOE elektrolýzu. Všechny další výsledky budou toto řazení dodržovat.



Obrázek 33 Účinnost vyrobeného vodíku jednotlivými typy elektrolýzy

6.1.3 Přeprava a skladování vodíku

Vodík vyrobený elektrolýzou vody musíme vhodně uskladnit, protože kvůli jeho vlastnostem by při atmosférickém tlaku uniknul do okolí. Vodík lze skladovat v plynné, kapalně nebo pevné fázi. Skladování vodíku v plynné podobě je nejjednodušší způsob, protože nedochází k fázové přeměně. Jedná se o nejjednodušší a nejvyužívanější technologii. Další možností je vodík skladovat v kapalně formě, abychom toho dosáhli, tak ho musíme tzv. zkapalnit. Zkapalněný vodík má teplotu $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$. Skladování vodíku v pevné podobě je založeno na absorpci vodíku do materiálů na bázi kovů.

Vodík má energetický obsah $33,3\text{ kWh/kg}$, např. ropa obsahuje jen cca $12,5\text{ kWh/kg}$, což je 3x víc než právě zmíněná ropa. Mohlo by se zdát, že se jedná o dokonalé palivo. Vodík má velkou nevýhodu ve své nízké objemové hustotě. Pokud bychom vyrobený vodík nijak neuskladnili, tak by unikl do atmosféry, protože je velmi lehký. V následující tabulce 6 je znázorněna hustota vodíku a jeho objemová energetická hustota za různého tlaku (při teplotě $25\text{ }^{\circ}\text{C}$). [74]

Tlak [bar]	ρ [kg/m ³]	Energetická hustota [Wh/litr]
1	0,081	3,2
10	0,808	31,8
100	7,671	301,5
350	23,351	917,7
700	38,256	1 503,5

Tabulka 6 Energetická hustota plynného vodíku [74]

V energetické bilanci bude uvažováno se stlačením vodíku na 350 a 700 barů a jeho zkapalněním. Účinnost těchto postupů bude započítána pro vodík vyrobený pomocí všech typů elektrolýzy.

Stlačení na 350 a 700 barů

Stlačování plynů na vysoké tlaky probíhá obecně pomocí kompresorů. Kompresory můžeme různě dělit např. dle provozního tlaku, dále podle stupňů na jednostupňové, dvoustupňové a vícestupňové. Rozlišujeme je také podle jejich činnosti na rotační a pístové. Rotační kompresory stlačují plyn rotačním pohybem. Plyn je stlačován na základě zmenšujícího se prostoru mezi skříní a rotačním prvkem. S menším prostorem nám stoupá tlak. Pístové kompresory stlačují plyn pomocí pohyblivého se pístu. Vodík je stlačován pomocí speciálního kompresoru, protože má velmi nízkou hustotu a potřebujeme dosáhnout velmi vysokého tlaku. Většina běžně dostupných kompresorů by takové tlaky nezvládla. Jedná se o pístové kompresory. Ty však zvládnou stlačovat pouze malé množství vodíku a mají pohyblivé části, které se mohou poškodit. Pro účely stlačování vodíku existují speciální kompresory, které nemají žádné pohyblivé části. Jedná se o elektrochemické, membránové a hydridové typy. [75][76]

Na stlačení vodíku na 350 barů je potřeba 15–20 % energie v palivu (bude uvažováno 17 %). Jedná se o energii vynaloženou na stlačení vodíku pomocí kompresorů. Vodík pomocí AWE elektrolýzy vyrobíme s účinností 71,25 %. Stlačením se dostaneme na celkovou účinnost 59,14 %. Když bychom uvažovali vodík vyrobený pomocí PEM elektrolýzy dostaneme se na účinnost 67,02 %. U SOE elektrolýzy to bude 74,91 %.

Na stlačení vodíku na 700 barů je potřeba až 30 % energie v palivu. Je to energie, která se spotřebuje na provoz kompresorů. Vodík pomocí AWE elektrolýzy vyrobíme s účinností 71,25 %. Stlačením se dostaneme na celkovou účinnost 49,88 %. Když bychom uvažovali vodík vyrobený pomocí PEM elektrolýzy dostaneme se na účinnost 56,53 %. U SOE elektrolýzy to bude 63,18 %.

Stlačování vodíku a jeho ponechání v plynné fázi má výhodu s ohledem na přepravu. Při použití kvalitních tlakových lahví nám již nevznikají další ztráty. Nevýhodou je však menší přepravené množství. S nižším tlakem kvůli nízké objemové hustotě klesá jeho přepravené množství. V porovnání se zkapalněným vodíkem stlačený vodík zabere větší množství.

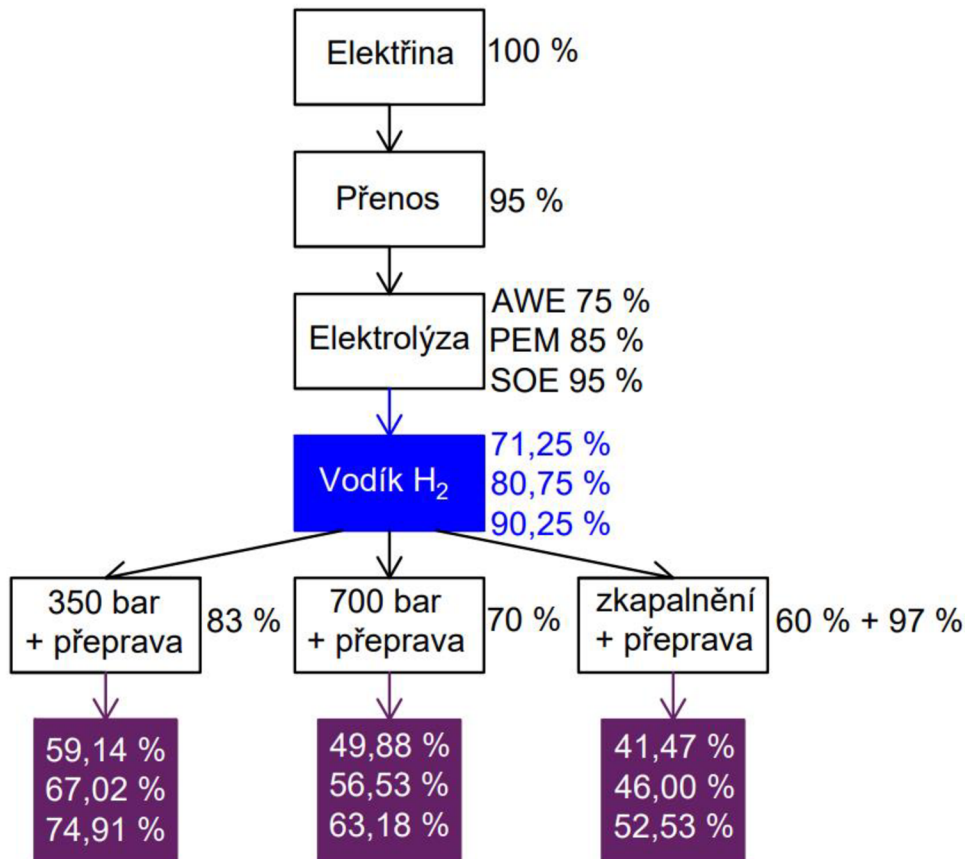
Zkapalnění

Zkapalnění je obecně změna skupenství z plynného na kapalné. Probíhá snížením teploty a případným zvýšením tlaku. Postup zkapalňování vodíku je následovný. Plynný vodík lze stlačit, pokud je to potřeba, a ten následně vstupuje do tzv. cold boxu, kde je ochlazován kapalným dusíkem nebo héliem. Ochlazený vodík poté proudí přes ventil, kde je expandován a vytvoří se dvoufázový proud. Dvoufázový vodík proudí do skladovací nádrže. Zde se oddělí kapalina a pára. Kapalný vodík zůstává v nádrži a studený plynný vodík se vrací zpět do cold boxu, kde napomáhá ochlazování přívodního proudu. Celý systém na zkapalňování vodíku obsahuje vakuový cold box s výměníkem tepla, který je hlavní součástí systému. Obsahuje také expandéry, adsorbéry, ventily, potrubí a skladovací nádrž. [77]

Na zkapalnění vodíku je potřeba cca 40 % energie v palivu. Jedná se o energii, kterou je třeba vynaložit na zkapalnění (chlazení, kompresory atd.). Vodík pomocí AWE elektrolýzy vyrobíme s účinností 71,25 %. Zkapalněním se tedy dostaneme na celkovou účinnost 42,75 %. Když bychom uvažovali vodík vyrobený pomocí PEM elektrolýzy, dostaneme se na účinnost 48,45 %. U SOE elektrolýzy to bude 54,15 %.

Přepřevou zkapalněného vodíku dochází k dalším ztrátám. Kvůli velkému rozdílu okolní teploty vůči teplotě uskladněného vodíku (-253 °C) dochází v lahvích k přestupu tepla a kapalný vodík se postupně odpařuje a tlak v nádobě se zvyšuje. Aby nedošlo ke zničení lahve, je nutné plynný vodík průběžně odpouštět. Odpouštěním vznikají ztráty, které činí cca

0,3–3 % za den. Protože nemáme přesně stanovenou délku trasy pro přepravu kapalného vodíku, bude uvažováno s maximální denní ztrátou a to 3 %. Tím se u vodíku vyrobeného AWE elektrolýzou dostáváme na celkovou účinnost 41,47 %. Pokud bychom uvažovali vodík vyrobený pomocí PEM elektrolýzy, dostaneme se na účinnost 46,00 %. U SOE elektrolýzy to bude 52,53 %.

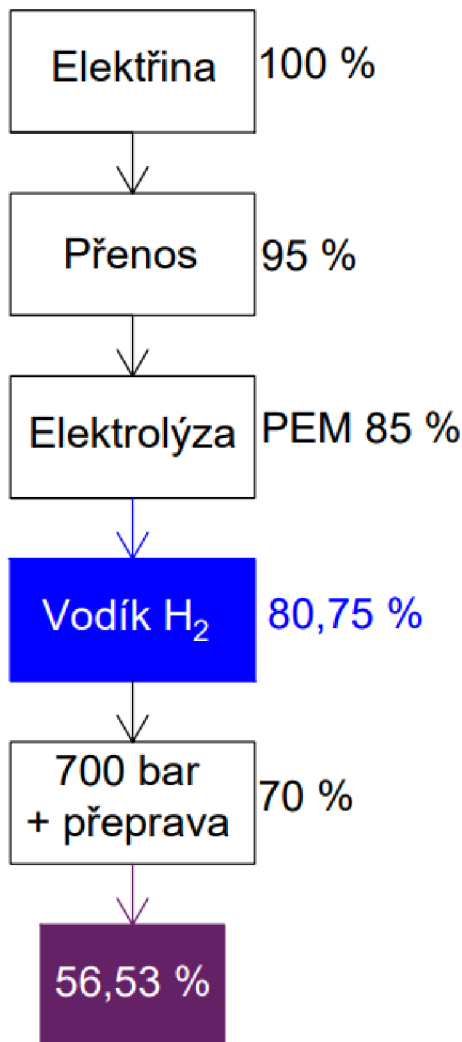


Obrázek 34 Celková účinnost procesu výroby vodíku včetně uskladnění a přepravy

Z obrázku 34 vychází nejvýhodněji vyrobit vodík pomocí SOE elektrolýzy a k uskladnění a následné přepravě zvolit stlačení vodíku na 350 barů. Z čistě energetického hlediska zde dosáhneme celkové účinnosti se započítáním všech dílčích procesů 74,91 %. Když bychom brali v úvahu současné technologie a jejich využití a používání v praxi, tak SOE elektrolýza je nejnáročnější a množství vyrobeného vodíku je v současné době především v laboratorním měřítku. Je tedy pouze dobrým ukazatelem, kam by se celková účinnost s vývojem technologie mohla vyšplhat. Použití AWE elektrolýzy by bylo bezproblémové. Jedná se o komerční technologii, která se již nějakou dobu využívá, ale celková účinnost by byla nejnižší. V následujících energetických bilancích bude uvažováno s PEM elektrolýzou, protože se jedná o technologii, která eliminuje nevýhody AWE elektrolýzy a již ji umíme používat i ve větším měřítku. Elektrolyzátor lze snadno regulovat a účinnost je cca 85 %.

Z pohledu uskladnění a přepravy vodíku energeticky vychází nejlépe stlačení na 350 barů. Když bychom uvažovali množství, které dokážeme přepravit v jedné tlakové nádobě, tak stlačením na 350 barů ho přepravíme nejméně. Jak již bylo zmíněno, je to způsobeno nízkou energetickou hustotou. Z toho vyplývá, že s ohledem na přepravené množství je nejvýhodnější přepravovat vodík v kapalné formě. Zde však máme nejvyšší ztráty při zkapalnění, a ještě při následné přepravě. V následujících energetických bilancích bude

uvažováno se stlačením na 700 barů. Jedná se o tzv. zlatou střední cestu, přepravené množství bude mnohem větší než při 350 barech a nedochází ke vzniku ztrát při přepravě. Celková účinnost s uvažováním PEM elektrolýzy a následným stlačením na 700 barů je tedy 56,53 %. S touto hodnotou bude uvažováno při jednotlivých aplikacích.



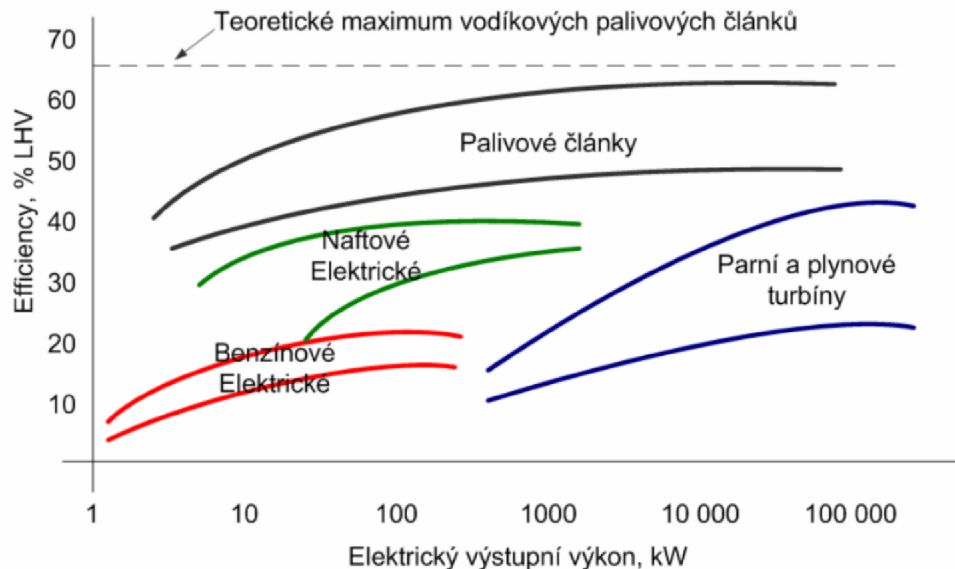
Obrázek 35 Celková účinnost s PEM elektrolýzou a stlačením na 700 bar

6.2 Palivový článek

Z vyrobeného vodíku můžeme pomocí palivových článků vyrobit zpětně elektrickou energii. Palivových článků je hned několik typů. Odlišují se především jejich provozní teplotou a typem elektrolytu. Na základě provozní teploty lze palivové články rozdělit na nízkoteplotní (60–130 °C), středně teplotní (160–220 °C) a vysokoteplotní (600–1 050 °C). Podle typu elektrolytu palivové články dělíme na alkalické (AFC), s polymerní elektrolytickou membránou (PEMFC), s tuhými oxidy (SOFC), s kyselinou fosforečnou (PAFC) a s taveninou alkalických uhličitánů (MCFC). Veškeré typy byly podrobněji rozepsány v 5. kapitole.

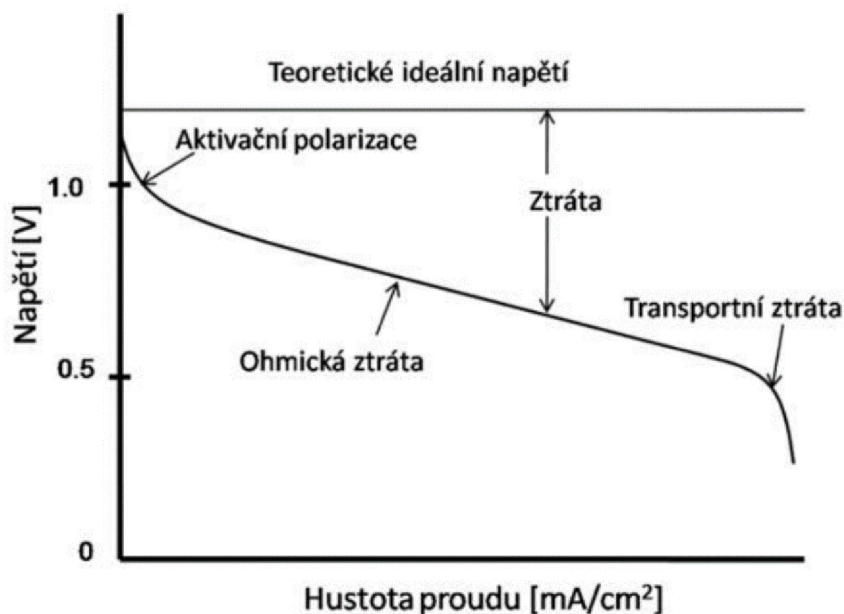
Palivový článek je elektrochemické zařízení, které přeměňuje chemickou energii (vodík) na energii elektrickou (opačný proces jak elektrolýza). Skládá se ze dvou elektrod: anody a katody, které jsou ponořeny v tzv. elektrolytu. Dle typu elektrolytu jednotlivé palivové články dělíme. Při nízkých provozních teplotách může být na elektrody

nanesena látka tzv. katalyzátor, který napomáhá reakcím. Nejčastěji se jedná o platinu. Rozměry zařízení se mohou velmi lišit od malých palivových článků až po velké průmyslové. Stejně velké rozpětí je i v množství vyrobené elektřiny od jednotek kW až po statisíce kW viz obrázek 36. Zde lze pozorovat závislost účinnost na množství vyrobené elektrické energie palivových článků v porovnání s jinými technologiemi. [78]



Obrázek 36 Účinnost a množství vyrobené elektrické energie různými technologiemi [78]

Provoz palivových článků je doprovázen určitými ztrátami. Především se jedná o aktivační ztráty (polarizaci), ohmické ztráty a transportní (koncentrační) ztráty. Jednotlivé ztráty se liší svým průběhem v závislosti na hustotě proudu palivového článku. Aktivační ztráty jsou typické logaritmickým průběhem a značně ovlivňují napětí na článku při nízkém proudu. Ohmické ztráty mají lineární průběh. Závisí na teplotě článku a obsahu vody. Transportní ztráty mají exponenciální průběh pro vysoký proud od cca 50 A. Můžeme je snížit s rostoucí teplotou a tlakem. [78][79]



Obrázek 37 Závislost napětí na hustotě proudu [78]

Teoretická účinnost palivového článku se určí jako podíl změny Gibbsovy energie ke změně entalpie. Z jednoho molu vodíku dosáhneme teoreticky napětí 1,229 V. Jedná se však pouze o ideální případ. [79]

$$\eta_{ideál} = \frac{\Delta G}{\Delta H} \quad (6.6)$$

Kde:

$\eta_{ideál}$	Ideální účinnost palivového článku [-]
ΔG	Změna Gibbsovy energie [J]
ΔH	Změna entalpie [J]

Účinnost, případně napětí, je stanoveno za ideálních podmínek (tzn. konstantní tlak a teplota). V reálném prostředí nejsou tyto veličiny nikdy konstantní. Na reálnou účinnost mají mimo jiné vliv koncentrace reakčních plynů (v tomto případě vodíku a vzduchu). Reálná účinnost se poté spočítá následovně: [79]

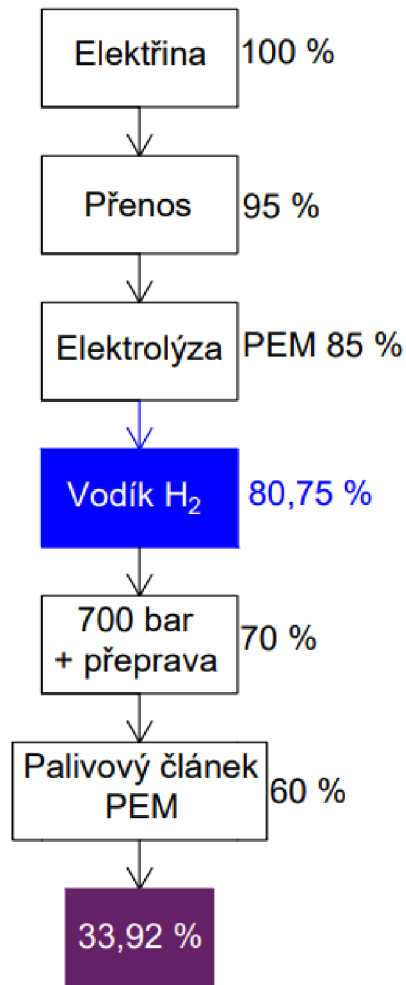
$$\eta = \eta_{ideál} \times \frac{U}{U_{ideál}} \quad (6.7)$$

Kde:

η	Skutečná účinnost palivového článku [-]
$\eta_{ideál}$	Ideální účinnost palivového článku [-]
U	Skutečné napětí palivového článku [V]
$U_{ideál}$	Ideální napětí palivového článku [V]

Ideální účinnost palivového článku může dosahovat až cca 83 % (79). Reálná účinnost je poté různá podle toho, jaký palivový článek uvažujeme. V energetické bilanci bude uvažováno s nízkoteplotním palivovým článkem s polymerní elektrolytickou membránou. Jeho provozní teplota je cca 50–100 °C. Je kompaktní, má dlouhou životnost a rychlý náběh, ale potřebuje velmi čisté palivo, složitě se reguluje a má drahý katalyzátor. Jeho účinnost bude uvažována 60 %.

Když budeme uvažovat energetickou bilanci, kde vodík vyrobíme pomocí PEM elektrolýzy a následně jej stlačíme na 700 barů, tak se dostáváme na účinnost 56,53 %. Vodík vyrobený a uskladněný s účinností 56,53 % použijeme v PEM palivovém článku, který má účinnost 60 %. Dostáváme se na celkovou účinnost 33,92 % využití vodíku vyrobeného z elektřiny z obnovitelných zdrojů pomocí technologie P2G. Celková účinnost je zakreslena v následujícím obrázku 38.



Obrázek 38 Výsledná účinnost využití vodíku vyrobeného P2G technologií v palivovém článku

Touto kombinací jednotlivých technologií je navrženo teoretické zařízení, které by mohlo sloužit k akumulaci elektrické energie. S tímto zařízením bude dále uvažováno v energetické bilanci. Bude porovnáno s dostupným, již provozovaným zařízením na akumulaci elektrické energie.

6.3 Vodíkový automobil

Pohonná soustava vodíkového automobilu neboli elektrického automobilu s palivovými články na vodík, se skládá z několika základních komponent. Základem jsou palivové články, baterie (lithium-iontový typ), která pohání elektromotor a potřebné komponenty, jako měnič napětí, řídicí jednotka apod. Nesmí také chybět nádrž pro vodík. Jednotlivé komponenty, které jsou součástí pohonné soustavy mají určité ztráty, které snižují celkovou účinnost provozu. Největší ztráty vznikají v palivových člancích. Ztráty a výsledná uvažovaná účinnost u palivových článků byla popsána v podkapitole 6.2. Účinnost palivového článku bude uvažována stejná, a to 60 %. [62][63][80]

Druhé největší jsou ztráty elektromotoru. Ty můžeme rozdělit do 5 kategorií. Jedná se o ztráty mechanické, v železe, ve vinutí statoru/rotoru a ztráty přídavné. K největším ztrátám dochází ve vinutí statoru. Následují ztráty ve vinutí rotoru, v železe a přídavné. Nejmenší jsou mechanické ztráty. V případě mechanických ztrát jde především o tření jednotlivých částí (především ložiska) a ventilační ztráty. Ztráty v železe závisí na druhu materiálu, ze kterého je

část motoru a jeho vlastnostech. Přídavné ztráty mají vířivý charakter a jsou způsobeny nerovnoměrností proudu ve vzduchové mezeře. [81]

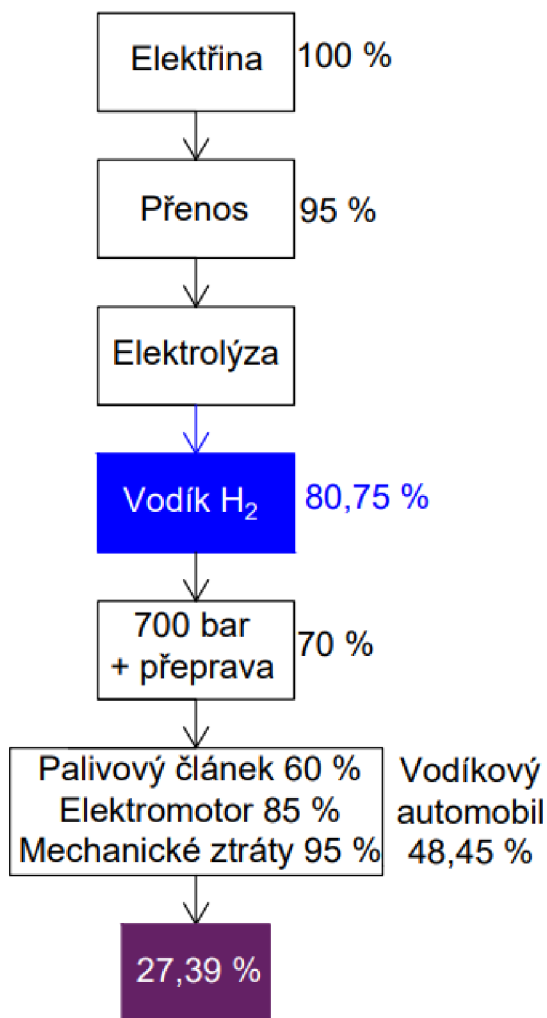
Účinnost elektromotoru se vypočítá jako poměr mezi mechanickým výkonem na hřídeli a elektrickým příkonem na svorkách statorového vinutí viz následující rovnice. [81]

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad (6.8)$$

Kde:

- η celková účinnost elektromotoru [-]
- P_2 Mechanická výkon na hřídeli [W]
- P_1 Elektrický příkon na statoru [W]

Při uvažování výše zmíněných ztrát u elektromotoru bude jeho účinnost stanovena na 85 %. Jako poslední ztráty budou uvažované mechanické ztráty vozidla. Mechanické ztráty budou uvažovány s účinností 95 %. Samotný vodíkový automobil má celkovou účinnost 48,45 %. Výsledná účinnost celého P2G procesu, kde se vyrobený vodík využil na pohon automobilu je pouhých 27,39 %.



Obrázek 39 Výsledná účinnost využití vodíku vyrobeného P2G technologií vodíkovým automobilem

6.4 Metanizace a následné vtažení do sítě zemního plynu

Součástí P2G může být metanizace, kdy z vodíku a oxidů uhlíku (nejčastěji CO_2) se vyrobí syntetický metan. Syntetický metan lze uložit nebo vhodně přímo využít. Uložení metanu oproti samostatnému vodíku má určité výhody. Metan se díky svým vlastnostem ukládá mnohem jednodušeji a za nižší energetické ztráty. Využití metanu může být v průmyslu, ke spalování a nebo jej přidávat do sítě zemního plynu.

Přidávání syntetického metanu vyrobeného z přebytečné elektrické energie P2G systémem do sítě se zemním plynem a v budoucnu možná i sítě pouze se syntetickým metanem jsou jednou z možností, jak nahradit fosilní paliva. I samotný vodík lze přimíchávat do zemního plynu, ale pouze v koncentraci 5–15 % kvůli vodíkovému křehnutí. Tato koncentrace je pro stávající rozvody bezpečná a není značně ovlivněna výsledná výhřevnost. Oproti tomu syntetický metan můžeme přimíchávat neomezeně, protože samotný zemní plyn je z cca 96 % tvořený právě metanem. To je velká výhoda, protože lze využít stávající plynové rozvodny. Spotřebiče, které fungují na zemní plyn, budou bez jakýchkoliv technologických úprav fungovat i na syntetický metan vyrobený z vodíku.

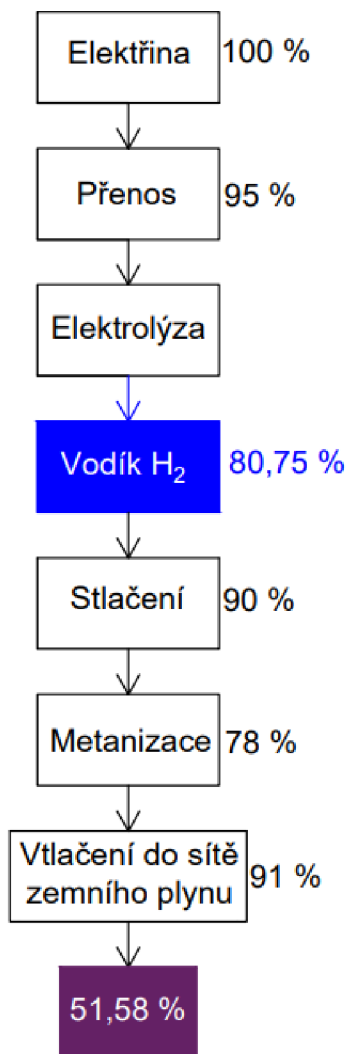
Celý proces se provádí v tzv. metanizačním reaktoru. Využívá se reaktorů s pevným nebo fluidním ložem. Po celou dobu průběhu reakce musí být z reaktoru odváděno přebytečné teplo. Reakce probíhá s využitím metanizačního katalyzátoru. Ideální katalyzátor by měl být dostatečně aktivní při nízkých teplotách (cca $250\text{ }^\circ\text{C}$) a stabilní při vysokých teplotách (cca $650\text{ }^\circ\text{C}$). Obvykle se využívá aktivních kovových částic na nosičích oxidů kovů. Za nejideálnější aktivní kovový katalyzátor je považován nikl. [82]

Celá jednotka by se dala rozdělit na dvě části. První část slouží pro samotnou výrobu vodíku pomocí elektrolýzy. Druhá část se skládá ze zařízení potřebných pro samotnou metanizaci. Patří sem zásobník CO_2 . CO_2 lze zachytit pomocí metody CCS, např. z fosilních paliv, a následně ho ve vhodné nádobě převézt na místo, kde probíhá metanizace. Druhou variantou je zachytávat CO_2 přímo na místě pomocí metody DAC. V tomto případě by k zásobníku bylo přidáno přídatné zařízení na zachytávání CO_2 . Dále je zde umístěn metanizační reaktor, eventuálně několik takových reaktorů. Celý soubor zařízení je doplněn o spalovací komín, případně úpravu plynu, když je to zapotřebí. Na metanizační proces je dohlíženo z velínu, kde je možné jednotlivé reakce také řídit. Příklad metanizačního zařízení je na následujícím obrázku 40. [82][83]



Obrázek 40 Zařízení na výrobu SNG metanizací v Německu [83]

Bude uvažováno, že vodík je vyráběn v místě spotřeby, tím pádem není nutné stačení na 700 bar a následná přeprava. Odpadají nám tyto ztráty. Vodík z největší pravděpodobností bude nutné i tak stačit, záleží však jaký bude výstupní tlak z elektrolyzátoru. Tyto skutečnosti závisí na vybrání konkrétního elektrolyzátoru a metanizační jednotky. Z tohoto důvodu bude uvažována účinnost 90 % na stlačení H₂. Účinnost samotné katalytické metanizace se udává cca 78 %. Abychom mohli metan vtláčet do sítě zemního plynu musí být stlačený na 80 barů. Celý proces vtláčení metanu do sítě zemního plynu dosahuje účinnosti cca 91 %. [50]



Obrázek 41 Výsledná účinnost využití vodíku vyrobeného P2G technologií s následnou metanizací a vtláčením do sítě zemního plynu

6.5 Zhodnocení

Koncept P2G technologie spočívá ve výrobě vodíku pomocí elektrolyzy vody a jeho následné využití. Aby bylo možné jednotlivé využití mezi sebou porovnat, byla napřed určena účinnost přenosové soustavy. Dále účinnost výroby vodíku pomocí tří typů elektrolyzy AWE, PEM a SOE. K výslednému porovnání byla následně zvolena PEM elektrolyza, protože se jedná o technologii, která eliminuje nevýhody AWE elektrolyzy, již ji umíme používat i ve větším měřítku a lze ji snadno regulovat.

K uskladnění vyrobeného vodíku byly původně uvažovány tři varianty, a to stlačení na 350 barů, stlačení na 700 barů a zkapalnění. Z pohledu účinnosti vycházelo nejlépe stlačení

na 350 barů, ale vzhledem k vlastnostem vodíku a možnosti přepravit jeho větší množství bylo vybráno stlačení na 700 barů. Tímto procesem se dostáváme na účinnost 56,52 %

Jako následné využití vodíku byla vybrána akumulace elektrické energie pomocí palivových článků, vodíkový automobil a metanizace s následným vtlačení syntetického metanu do sítě zemního plynu.

Akumulace elektrické energie pomocí palivových článků má účinnost celkem 33,92 %. Jedná se o teoretický způsob akumulace elektrické energie s následnou přeměnou zpět na elektřinu. Dalo by se s takovým zařízením uvažovat jako např. s PVE. Porovnání těchto akumulčních prvků bude provedeno v následující kapitole.

Celková účinnost vodíku vyrobeného pomocí P2G s následným využitím vodíku ve vodíkovém automobilu dosahuje účinnosti pouhých 27,39 %. S přihlédnutím na nedostatečnou infrastrukturu čerpacích stanic nebo nevyřešenou odpadní vodu z automobilů, která v zimních měsících může přimrzat, v současné době nepovažuji tuto variantu za perspektivní.

Poslední využití vodíku bylo pomocí metanizace s následným vtlačení do sítě zemního plynu. Pokud je vodík vyráběný v místě spotřeby nebo se přepravuje na menší vzdálenosti, není nutné jej stlačovat na 700 barů, stačí stlačení na nižší tlaky. Díky této úvaze je stanovena účinnosti stlačení vodíku na 90 %. Celková účinnost toho využití vodíku je 51,58 %. V tomto procesu vidím velký potenciál. Samotný vodík lze také vtlačit do sítě zemního plynu, ale to má však své omezení, která již byla diskutována. Syntetický metan můžeme vtlačit do sítě zemního plynu bez omezení a výsledná účinnost celého procesu přesahující 50 % je v porovnání s ostatními využitími řádově vyšší a s aktuální situací se zemním plynem se tato varianta jeví jako velmi perspektivní.

V následující tabulce 7 je provedeno porovnání výsledných účinností u vybraných aplikací.

PEM palivové články
33,92 %
Vodíkový automobil
27,39 %
Metanizace + vtlačení do sítě zemního plynu
51,58 %

Tabulka 7 Účinnosti vodíku vyrobeného P2G na vybraných aplikacích

7 Energetická bilance v porovnání s PVE Dlouhé stráně

Využití vodíku vyrobeného systémem P2G je velmi široké. V předchozí kapitole byla znázorněna celková energetická účinnost v případě akumulace elektrické energie pomocí palivových článků, vodíkového automobilu a metanizace s následným vtlačení do sítě zemního plynu. V této kapitole bude uvažováno využití P2G systému s palivovými články k akumulaci elektrické energie. Při využití PEM elektrolýzy a následným stlačením vodíku na 700 barů, který využijeme k výrobě elektřiny v PEM palivových člancích, dosáhneme celkové účinnosti systému 33,92 %. Jak by takový systém musel vypadat, abychom dokázali akumulovat stejné množství elektrické energie jako v systémech, které jsou k tomu v současné době využívány? Pro porovnání bude uvažováno s PVE Dlouhé stráně.

7.1 Energetická bilance PVE Dlouhé stráně

PVE Dlouhé stráně je řešena jako podzemní dílo, protože se nachází v CHKO Jeseník. Do provozu byla uvedena v roce 1996. Je konstruována pomocí 2 reverzních Francisových turbín (největší v Evropě) o výkonu 2 x 325 MW. Při reverzním výkonu (čerpadlovém) je výkon 312 MW. Celková spád této PVE je 510,7 m. Jedná se o elektrárnu s největším spádem v ČR. Horní nádrž je v nadmořské výšce 1 350 m o objemu 2,72 mil. m³. Z horní nádrže vedou dva přivaděče (potrubí) o průměru 3,6 m a délkách 1 547 m a 1 499 m. Při maximálním výkonu je průtok každým přivaděčem 68,5 m³. Dolní nádrž je umístěna na řece Divoká Desná a má objem 3,4 mil. m³. Maximálního výkonu je PVE schopná dosáhnout do 100 s a zvládne dodávat elektřinu po dobu 6 hodin. Přechod z turbínového režimu na čerpadlový je možný do 150 s. [84][85]

Výkon [MW]	Typ turbíny	Spád [m]	Max. průtok [m ³ /s]	Průměr oběžného kola [m]	Objem horní nádrže [mil.m ³]	Objem dolní nádrže [mil.m ³]	Dosažení max. výkonu [s]	Rychlost změny chodu [s]	Načerpání horní nádrže [h]
650 (2x325)	Francis reverzní	534,3	68,5	4,54	2,72	3,4	100	150	7

Tabulka 8 Parametry PVE Dlouhé stráně [84][85]

PVE se skládá ze stavební části, technologické části, elektrické části a ostatních prvků. Do stavební části patří především přivaděče, strojovna a akumulací nádrž. Akumulací nádrž může vzniknout pouze přehrazením údolí nebo vyhloubením hrází. Nádrže se rozdělují dle materiálu, který byl na jejich stavbu použit (hlína, beton, balvany atd.). Technologickou částí se rozumí především turbína a čerpadlo (u PVE Dlouhé stráně reverzní turbína). Do elektrické části patří motorgenerátor a transformátor. Dále jsou součástí závěsná a vodící ložiska. [89]



Obrázek 42 Horní nádrž PVE Dlouhé stráně [86]

Účinnost PVE se pohybuje v rozmezí 70 % až 85 %. Výsledná účinnost je ovlivněna dílčími ztrátami čerpadlové a turbínové části. U PVE můžeme rozlišovat dva cykly a to velký a malý. Velký cyklus znamená, že uvažujeme i účinnost zařízení, které do PVE dodává elektrickou energii. Malý cyklus, který budeme uvažovat, se zabývá pouze samotnou PVE. Účinnost lze vypočítat dle následující rovnice jako výkon ku příkonu. [87]

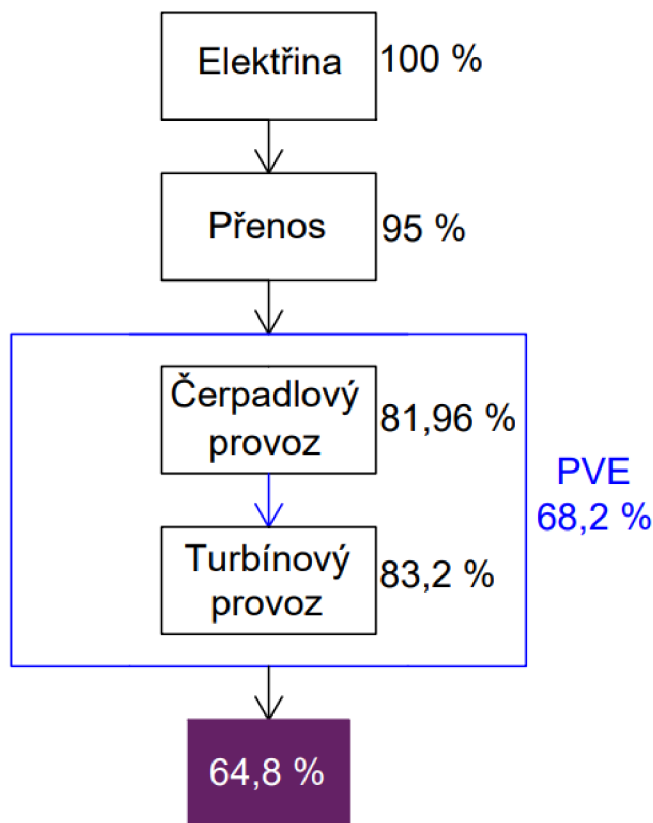
$$\eta = \frac{P_v}{P_d} \quad (7.1)$$

Kde:

η	Účinnost PVE [-]
P_v	Vyrobený výkon [W]
P_d	Příkon (dodaný výkon) [W]

Celkový provoz lze rozdělit na čerpadlový, turbínový a kompenzační. U čerpadlového provozu se spotřebovává elektrická energie na čerpání vody z dolní nádrže do horní. U turbínového provozu se vypouští voda z horní nádrže přivaděčem (potrubím). Přivaděčem je voda dovedena k turbíně, kde se potenciální energie mění na mechanickou (turbína se roztáčí). Turbína je hřídelí spojena s alternátorem, který vyrábí elektrickou energii. Kompenzační provoz je využíván pouze při zavzdušněním oběžném kole turbíny. [87]

Akumulace elektrické energie PVE je doprovázena určitými ztrátami. Čerpadlový provoz je doprovázen ztrátami v tlakovém potrubí, čerpadle, na hydroalternátoru a ostatními. Ztráty v potrubí jsou 1,5 %. V čerpadle jsou ztráty 12,5 %. Hydroalternátor je využíván jako motor a dosahuje 2% ztrát. Do ostatních ztrát se řadí ztráty na ložiscích, pomocných pohonů a transformace napětí. Celkem tyto ztráty jsou 3 %. Čerpadlový provoz má tím pádem účinnost 81,96 %. U turbínového provozu vznikají ztráty v tlakovém potrubí, na turbíně, na hydroalternátoru a ostatní. Ztráty v potrubí jsou 3,9 %. Ztráty na turbíně jsou 8,4 %. Ztráty hydroalternátoru jsou 2,5 %. Ostatní ztráty jsou totožné jako u čerpadlového provozu. Celkem činí 3 %. Turbínový provoz má účinnost 83,2 %. Celková účinnost čerpadlového a turbínového procesu u PVE je 68,2 %. Kromě zmíněných ztrát vznikají ještě ztráty výparem a průsakem. Tyto ztráty nebudou uvažované, protože vůči ostatním ztrátám jsou zanedbatelné. [87]



Obrázek 43 Účinnost PVE

Abychom mohli jednotlivé způsoby akumulace mezi sebou porovnat, bude třeba ještě stanovit energetickou bilanci PVE Dlouhé stráně. Energetická bilance je vypočítána pomocí následujících rovnic. Vyrobenou energii lze stanovit dle následující rovnice 7.2. [87]

$$E_g = Q \times g \times H_u \times \eta_T \times \eta_P \times \eta_G \times t \quad (7.2)$$

Kde:

E_g	Elektrická energie [kWh]
Q	Průtokové množství [m^3/s]
g	Tíhové zrychlení [m/s^2]
H_u	Užitečný spád [m]
η_T	Účinnost turbíny [-]
η_P	účinnost spojky [-]
η_G	Účinnost generátoru [-]

Jakmile načerpáme vodu do horní nádrže, stává se z ní zásobárna potenciální energie, kterou má PVE k dispozici. Tato energie lze spočítat po úpravě následujících rovnic. Pro zjednodušení budeme uvažovat, že celý užitý objem V_u proteče Francisovou turbínou za 1 hodinu (3 600 s). Celkový užitý objem V_u bude roven průtokovému množství (hltnost turbíny) viz rovnice 7.3. [87]

$$Q = \frac{V_u}{t} = \frac{V_u}{3600} \quad (7.3)$$

Kde:

Q	Průtokové množství (hltnost turbíny) [m ³ /s]
V_u	Užitý objem horní nádrže [m ³]
t	Čas [s]

Za jednu hodinu se vyrobí elektrická energie, která je rovna potenciální energii uložené v nádrži. Následně hltnost turbíny dosadíme do rovnice 7.2 a dostaneme tzv. Energetický ekvivalent nádrže E_n . [87]

$$E_n = \frac{V_u}{3600} \times g \times H_u \times \eta_T \times \eta_P \times \eta_G \times t \quad (7.4)$$

Následně dosadíme $t = 1$ a za $g = 9,81$ provedeme úpravu a dostaneme rovnici ve finální podobě. [87]

$$E_n = \frac{V_u}{367} \times H_u \times \eta_T \times \eta_P \times \eta_G \quad (7.5)$$

Z rovnice 7.5 můžeme vypočítat potřebný objem vody, abychom vyrobili 1 kW nebo jakou energii vyrobíme z 1 m³. V případě zjištění potřebného objemu vody na výrobu 1 kW dosadíme za $E_n = 1$. Kolik energie vyrobíme z 1 m³ dostaneme, tak že dosadíme za $V_u = 1$. Za užitečnou spád dosadíme $H_u = 534,3$ m. Účinnosti dosadíme následující: turbíny = 0,916, spojky = 0,99 a generátoru = 0,975. [87]

$$E_n = \frac{V_u}{367} \times H_u \times \eta_T \times \eta_P \times \eta_G = \frac{1}{367} \times 534,3 \times 0,916 \times 0,99 \times 0,975 \quad (7.6)$$

$$E_n = 1,29 \text{ kWh/m}^3$$

Z 1 m³ horní nádrže PVE Dlouhé stráně vyrobíme 1,29 kWh, abychom mohli stanovit, kolik energie jsme schopni vyrobit z celého objemu nádrže, vynásobíme tuto hodnotu jejím objemem. Objem horní nádrže PVE Dlouhé stráně je 2,72 mil. m³. [87]

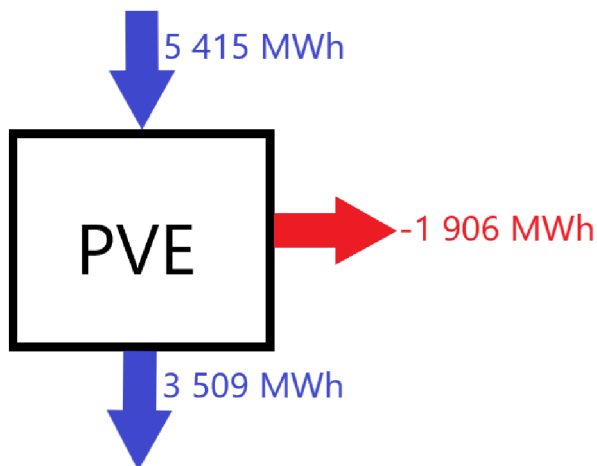
$$E_{PVE} = E_n \times V_{horní} \quad (7.7)$$

Kde:

E_{PVE}	Energie vyrobená PVE Dlouhé stráně [kWh]
E_n	Energetický ekvivalent nádrže [kWh/m ³]
$V_{horní}$	Objem horní nádrže PVE Dlouhé stráně [m ³]

$$E_{PVE} = 1,29 \times 2\,720\,000 = 3\,508\,800 \text{ kWh} = \mathbf{3\,509 \text{ MWh}}$$

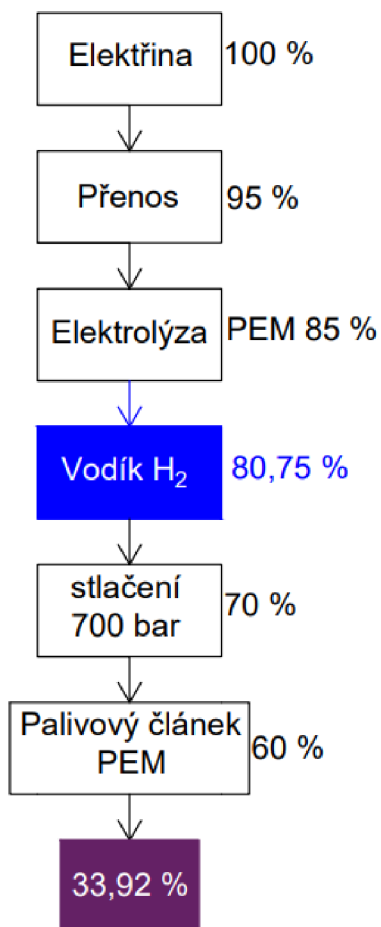
Známe celkovou účinnost PVE, která včetně ztrát přenosem v soustavě je stanovena na 64,8 % a známe množství vyrobené elektrické energie PVE Dlouhé stráně. PVE vyrobí jedním cyklem cca 3 509 MWh elektrické energie. Zbývá nám stanovit, kolik elektrické energie bylo potřeba dodat PVE, aby takové množství elektrické energie vyrobila. Pro vyrobení 3 509 MWh je třeba na začátku PVE Dlouhé stráně dodat elektřinu v množství 5 415 MWh. Energetická bilance viz následující obrázek 44.



Obrázek 44 Energetická bilance PVE Dlouhé stráně

7.2 Energetická bilance systému P2G

V předchozí kapitole byl vodík vyrobený P2G využit palivovým článkem ke zpětné přeměně na elektřinu. Jedná se vlastně o akumulační zařízení podobně jako PVE. Celková účinnost celého tohoto systému akumulace byla stanovena na 33,92 %. Jednotlivé účinnosti systému můžeme vidět v následujícím obrázku 45. Tyto účinnosti byly podrobně rozebrány v předchozí kapitole 6.3.



Obrázek 45 Akumulace elektrické energie systém P2G a palivovými články

Kdybychom chtěli naakumulovat a následně vyrobit stejné množství elektrické energie jako PVE Dlouhé stráně, což je 3 509 MWh, museli bychom do akumulčního systému P2G s palivovými články na začátku dát elektrickou energii v množství 10 345 MWh. Jak již bylo patrné z účinnosti, která je u P2G systému skoro poloviční jak u PVE, tak množství elektrické energie, které je potřebné dodat do systému P2G je skoro dvojnásobné.

Z energetického hlediska to není tak výhodné jako PVE Dlouhé stráně, ale je to možné. Otázkou zůstává, za jakých podmínek jsme schopni docílit takového množství vyrobené elektrické energie. Jaký celkový objem vodíku budeme muset vyrobit? Kolik palivových článků budeme muset použít, abychom se aspoň přiblížili rychlosti přeměně jako je u PVE? Jaké množství elektrolyzérů budeme muset teoreticky použít, abychom vyrobili dané množství elektřiny? Jednotlivé otázky budou podrobněji rozebrány a celý systém P2G s palivovými články bude nastaven tak, aby akumulace byla reálně proveditelná a co nejvíce se vyrovnala akumulaci PVE. Na závěr bude celý systém zhodnocen.

7.2.1 Jednotlivé komponenty systému P2G

Jednotlivé komponenty byly určeny postupně. Jako první byl vybrán soubor palivových článků od firmy Nedstack. Konkrétně soubor palivových článků CHP-FCP-1000 o výkonu 1 MW. Celý systém se skládá ze 120 ks modelových palivových článků typu Nedstack FCS13-XXL. Každý tento palivový článek je poté složen z 96 samostatných palivových článků. Přesné specifikace tohoto systému palivových článků jsou v tabulce 9. Abychom dosáhli stejného výkonu jako PVE bude těchto souborů palivových článků potřeba celkem 650 ks. [88]

Typ pal. článku	Jmenovitý výkon [MW]	Hmotnost [kg]	Rozměry (dxšxv) [m]	Provozní teplota [°C]	Max spotřeba H ₂ [kg/h]
LT-PEM	1	29 000	12,19 x 2,44 x 2,9	- 5–40	80

Tabulka 9 Parametry systému CHP-FCP-1000 [88]

Plochou jeden soubor palivových článků zabírá cca 29,74 m². Objemově je to poté 86,26 m³. Když bychom soubory palivových článků naskládali těsně k sobě, zabraly by cca 19 331 m². Pro porovnání plocha fotbalového hřiště pro mezinárodní utkání je cca 7 350 m² (105 x 70 m) [95]. Palivové články by zabraly cca 2,6 fotbalových hřišť. Pořád je však tato plocha mnohonásobně menší než plocha horní nádrže PVE Dlouhé stráně, která zabírá cca 154 000 m².



Obrázek 46 Systém palivových článků CHP-FCP-1000 o výkonu 1 MW [90]

Jeden soubor palivových článků dle katalogového listu od výrobce má maximální spotřebu vodíku 80 kg/h o přivodním tlaku v rozmezí 0,3–6 bar. 1 MWh je systém schopen vyrobit z 59 kg. Z toho vyplývá, že jeden soubor palivových článků při maximálním přívodu vodíku vyrobí 1,36 MWh. Abychom dosáhli stejného množství vyrobené elektrické energie jak PVE, je nutný provoz všech 650 souborů palivových článků v délce cca 4 hodiny. Celkem dojde ke spotřebě 208 000 kg H₂.

Jako tlakové lahve pro uskladnění vodíku při tlaku 700 barů byla vybrána láhev 4. generace od firmy NPROXX. Jedná se o lahve z kompozitu. Parametry tlakových lahví jsou uvedeny v následující tabulce 10. [91][92]

Provozní tlak [bar]	Zkušební tlak [bar]	Životnost [cyklus]	Objem [l]	Výška [mm]	Průměr [mm]
700	875	45 000	244	2 011	506

Tabulka 10 Parametry tlakové lahve NPROXX [91]

Objem jedné lahve je 244 litrů. Hustota vodíku při tlaku 700 barů je 38,256 kg/m³. Do jedné lahve se tím pádem vejde 9,33 kg H₂. Na výrobu potřebného množství elektrické energie je zapotřebí 208 000 kg H₂. Celkem bude potřeba cca 22 294 kusů lahví naplněných vodíkem. Budeme uvažovat, že láhev bude stát na kruhové ploše. Tato plocha u jedné lahve činí 1,59 m². Při daném počtu lahví zaberou celkem plochu o výměře 35 447 m². V porovnání s fotbalovým hřištěm (7 350 m²) lahve zaberou celkem 4,8 fotbalových hřišť.



Obrázek 47 Kompozitní tlakové lahve firmy NPROXX [91]

Kompresor byl vybrán od firmy Sollant. Jedná se o membránový vzduchový kompresor se speciální konstrukcí. Je vhodný ke kompresi vzácných, korozivních, toxických, radioaktivních nebo výbušných plynů např. H_2 , He, Cl, Ar, F, NF aj. Válec kompresoru není třeba mazat a má velmi dobré těsnění. Stlačované médium (vodík), díky těsnění čistota komprese dosahuje 100 %. V našem případě chceme H_2 stačit na 700 barů. K tomu je vhodný membránový kompresor typu Z. Jeho podrobnější parametry jsou v následující tabulce 11. [93]

Typ konstrukce	Zdvih pístu [mm]	Max. síla pístu [kN]	Výtlačný tlak [bar]	Průtok [Nm^3/h^4]	Výkon motoru [Kw]
Z	70–180	10–90	700	0,5–500	2,2–45

Tabulka 11 Parametry membránového kompresoru typu Z [93]

Kompresor typu Z dokáže za hodinu stlačit $0,5\text{--}500 Nm^3$. Jelikož se na stránkách výrobce nedají dohledat detailnější informace, pro jaké plyny je konkrétní průtok, bude uvažováno se střední hodnotou tedy $250 Nm^3/h$. Potřebujeme stlačit celkem 208 000 kg H_2 . Při úvaze hustoty vodíku za normálních podmínek $0,0899 kg/m^3$ nám vychází, že za normálních podmínek bude potřeba $2\,313\,682 m^3$ vodíku. Jeden kompresor s průtokem $250 Nm^3/h$ by takové množství vyráběl cca 9255 hodin (1 rok a 20 dní). Když bychom toto množství chtěli stlačit za cca 6 hodin, bylo by za potřebí 1 543 kompresorů typu Z. Přesné rozměry nejsou výrobcem veřejně udávány, ale dle fotografií kompresor typu V je velký jako běžný automobil. Bude uvažováno s plochou cca $7,3 m^2$. Všechny kompresory naskládané těsně vedle sebe by poté zabrali plochu cca $11\,264 m^2$. V porovnání s fotbalovým hřištěm ($7\,350 m^2$) kompresory zaberou celkem 1,53 fotbalových hřišť.

⁴ Nm^3/h je vázán na normální podmínky tj. $0^\circ C$ (273,15 K) a 101,325 Pa



Obrázek 48 Membránový vzduchový kompresor typ Z [93]

Za elektrolyzátor byl vybrán PEM elektrolyzátor od firmy NELHYDROGEN a konkrétně kontejnerová řada M a model MC500. Jedná se o elektrolyzátor, který umožňuje snadnou instalaci i do venkovních prostor, jednoduše se udržuje, lze jej provozovat v rozmezí výkonu 0–100 %. Veškeré potřebné komponenty se nachází ve 2 kontejnerech. V prvním kontejneru je elektrolyzátor s potřebnými doplňujícími komponenty (chladič, detektor hořlavých plynů, výměník tepla, tepelný řídicí systém apod.) a ve druhém usměrňovač s transformátorem. Přesné specifikace tohoto elektrolyzátoru jsou v následující tabulce 12. [94]

Model	Elektrolyt	Okolní teplota [°C]	Produkční rychlost [kg/24h]	Rozsah [%]	Výstup. tlak [bar]	Rozměry 1. kontejner (šxhxv) [m]	Rozměry 2. kontejner (šxhxv) [m]
MC500	PEM	-20–40	531	10–100	30	12,2x2,5x3	12,2x2,5x3

Tabulka 12 Parametry elektrolyzátoru MC500 od firmy NELHYDROGEN [94]

Jeden elektrolyzátor dokáže za 24 hodin vyrobit 1 068 kg H₂. Celkem je zapotřebí 208 000 kg H₂. Abychom se pohybovali v přibližně stejném čase jako je úplné načerpání horní nádrže (cca 7 hodin), potřebujeme toto množství vyrobit za přibližně stejný čas. Při produkci H₂ za 6 hodin bude na toto množství zapotřebí cca 780 ks těchto elektrolyzátorů. Každý elektrolyzátor se skládá ze 2 kontejnerů o celkové ploše 61 m². Všechny elektrolyzátor vedle sebe by zabraly celkem plochu 47 580 m². V porovnání s fotbalovým hřištěm (7 350 m²) elektrolyzátor zaberou celkem 6,5 fotbalových hřišť.



Obrázek 49 PEM elektrolyzér model MC500 [94]

Abychom dané množství vodíku vyrobili, potřebujeme k tomu vodu. Konkrétně se jedná o demineralizovanou vodu. Elektrolyzou vody vzniká vodík a odpadním produktem je v tomto případě kyslík, který lze dále využívat. Na výrobu 1 kg vodíku a 8 kg kyslíku je třeba 8,92 litrů demineralizované vody.[31] V tomto případě potřebujeme celkem 208 000 kg H₂, vyrobením takového množství vodíku nám vznikne 1 664 000 kg O₂. Celkem je potřeba 1 855 360 litrů vody. Vodu budeme muset někde uskladnit. Pro jednodušší obsluhu byla navržena nádrž o hloubce 2 metry a ploše 930 m².

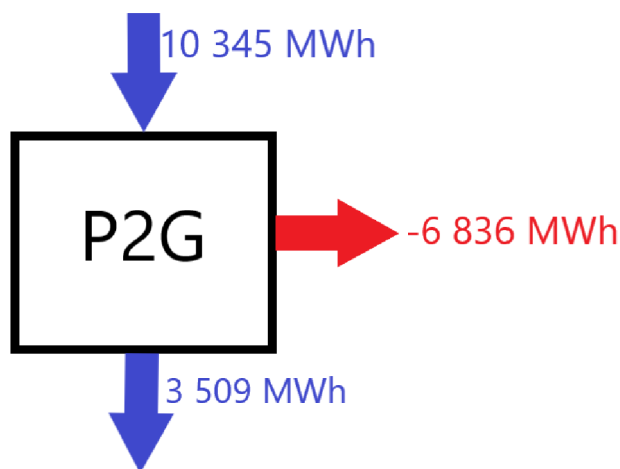
V této kapitole byly popsány jednotlivé komponenty systému P2G na akumulaci elektrické energie pomocí palivových článků. Podrobně byly popsány pouze stěžejní komponenty jako je elektrolyzér, nádrž na vodu, kompresor, tlakové lahve a palivové články. Nebylo uvažováno s případným propojením pomocí potrubí nebo mezi skladovacím prostorem vodíku apod. Počet jednotlivých komponent a případná plocha, kterou by zabírali je popsána v následující tabulce 13.

Elektrolyzér NELHYDROGEN MC 500		
780 ks	Plocha 47 580 m ²	6,5 hřiště
Membránový kompresor SOLLANT typ Z		
1 543 ks	Plocha 11 264 m ²	1,53 hřiště
Kompozitní tlaková lahev NPROXX		
22 294 ks	Plocha 35 447 m ²	4,8 hřiště
Systém palivových článků CHP-FCP-1000 NEDSTACK		
650 ks	Plocha 19 331 m ²	2,6 hřišť
Nádrž na demineralizovanou vodu		
1 ks	Plocha 930 m ²	0,12 hřišť

Tabulka 13 Parametry jednotlivých hlavních komponent systému P2G

Veškeré hlavní komponenty naskládané natěsno vedle sebe zaberou celkem 114 552 m². Jedná se o plochu o velikost jako cca 15,55 fotbalových hřišť. Tato plocha by znamenala, že veškeré komponenty bude těsně vedle sebe naskládané, takže by je nebylo možné obsluhovat a servisovat. Z tohoto důvodu bude výsledná plocha vynásobena koeficientem 1,5, aby byly částečně pokryty plochy potřebné na obslužné komunikace, manipulační prostor, propojovací potrubí apod. S touto skutečností celková plocha, kterou P2G systém zabere, činí 171 828 m². Je to plocha o velikosti 23,38 fotbalových hřišť. V porovnání s horní nádrží PVE Dlouhé stráně, která má cca 150 000 m² zabere systém P2G větší plochu.

Známe celkovou účinnost systému P2G, která včetně ztrát přenosem v soustavě je stanovena na 33,92 %. Množství vyrobené elektrické energie bylo stanoveno podle PVE Dlouhé stráně a to na 3 509 MWh. Abychom toto množství elektrické energie vyrobili, musíme do systému dodat 10 345 MWh elektrické energie. Energetická bilance je zakreslena na následujícím obrázku 50.



Obrázek 50 Energetická bilance systému P2G

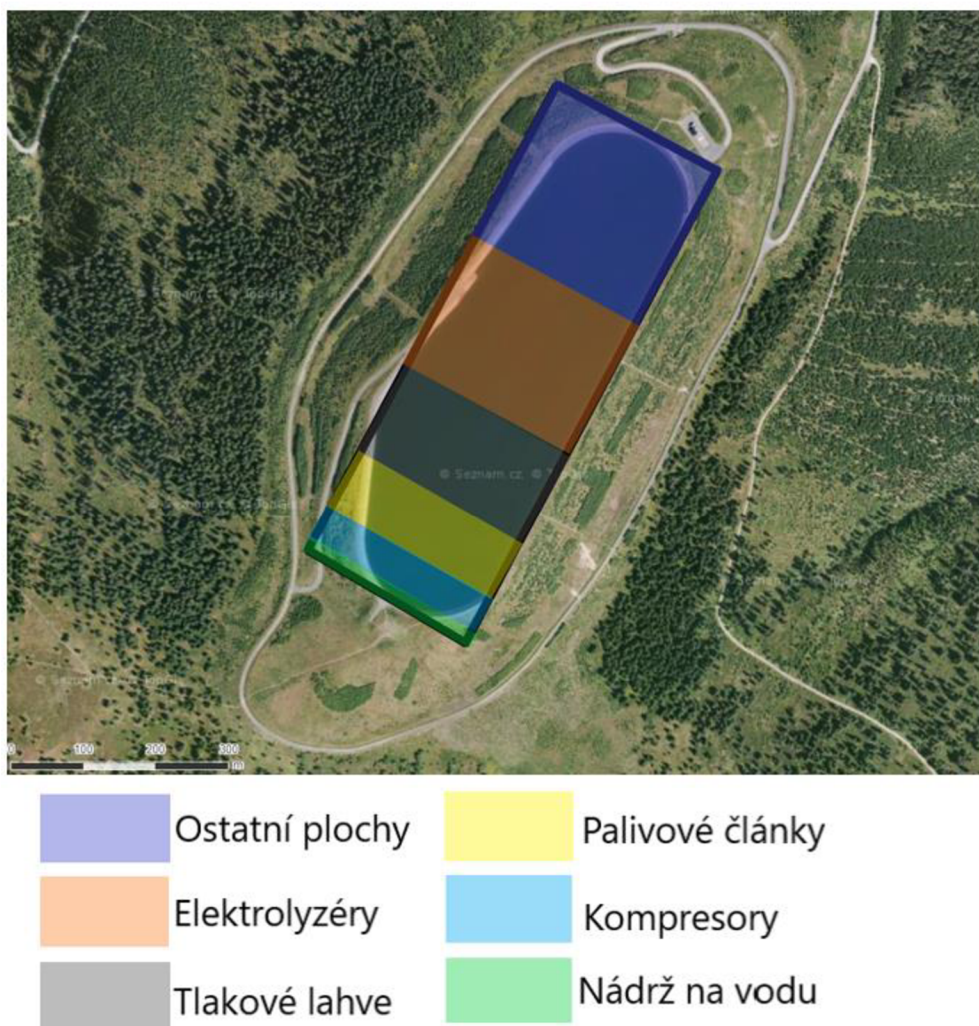
7.3 Porovnání způsobů akumulace

Akumulace elektrické energie PVE Dlouhé stráně, případně jinou PVE, je známý proces, který je ozkoušený v praxi a léta funguje bez problému. Se započítáním veškerých ztrát i v přenosové soustavě elektrické energie dosáhneme účinnosti kolem 64,8 %. Horní nádrž se načerpá přibližně za 7 hodin a voda z horní nádrže přes turbíny proteče za cca 6 hodin. Celková doba provozu při maximálním zatížení a za předpokladu prázdné horní nádrže je tedy cca 13 hodin. Za tu dobu vyrobíme cca 3 509 MWh elektrické energie a na svůj provoz PVE spotřebuje cca 1 906 MWh.

Akumulace elektrické energie pomocí systému P2G s palivovými články dosahuje téměř poloviční účinnosti než PVE a to 33,92 %. Abychom vyrobili stejné množství elektrické energie jako PVE Dlouhé stráně, byly vybrány hlavní komponenty a určeno jejich množství, abychom toho docílili. K výrobě zeleného vodíku byl vybrán PEM elektrolyzátor od firmy NELHYDROGEN a to model MC 500. Celkem bude potřeba 780 ks elektrolyzátorů, které za 6 hodin vyrobí celkem 208 000 kg H₂. Abychom toto množství vodíku vyrobili, bude potřeba 1 855 360 litrů demineralizované vody. Vyroběný vodík je potřeba stlačit na 700 barů. Ke stlačení byl vybrán membránový kompresor od firmy SOLLANT konstrukčního provedení Z. Abychom potřebný vodík stlačili za 6 hodin bude potřeba 1 534 kusů kompresorů. Stlačený vodík bude uložen do tlakových kompozitních lahví od firmy NPROXX a 208 000 kg H₂ bude uloženo v celkem 22 294 kusech tlakových lahví. Vyroběný vodík bude zpětně přeměněn na elektrickou energii v palivových článcích od firmy NEDSTACK. Výkon palivových článků byl stanoven stejný jako reverzních turbín u PVE

Dlouhé stráně a to 650 MW. Celkem bylo použito 650 kusů LT-PEM palivových článků od firmy NEDSTACK. Palivové články vyrobí cca 3 509 MWh za přibližně 4 hodiny. Celková doba provozu systému P2G je o něco delší než u PVE, celkový provoz činí 16 hodin. Za tuto dobu vyrobíme cca 3 509 MWh elektrické energie a celý systém spotřebuje cca 6 836 MWh.

Otázkou bylo, jak přibližně velký takový systém P2G bude. Celková plocha jednotlivých hlavních komponent včetně obslužných komunikací, manipulačního prostoru, propojovacího potrubí apod. činí 171 828 m². Jednalo by se přibližně o plochu 23,38 fotbalových hřišť. Pro porovnání plocha horní nádrže PVE Dlouhé stráně činí 150 000 m². V následujícím obrázku 51 je zakresleno přibližné rozvržení komponent P2G systému vůči horní nádrži PVE. Lze pozorovat, že P2G systém zabere nepatrně větší plochu než horní nádrž.



Obrázek 51 Porovnání plochy P2G a PVE

Z pohledu účinnosti je jasným vítězem PVE Dlouhá stráně. Z energetického hlediska tomu není jinak. Systém P2G na svůj provoz spotřebuje více elektrické energie, než jí zvládne vyrobit. Jedná se však o systém akumulace elektrické energie, který je potřeba pro stabilitu sítě. S rostoucím zastoupením obnovitelných zdrojů v energetickém mixu bude akumulace přebytečné elektrické energie potřebná více než dnes. Z tohoto důvodu má navržený systém do budoucna velký potenciál. Svou plochou cca 17,2 ha systém zabírá plochu o něco větší než horní nádrž PVE Dlouhé stráně. Teoreticky by bylo možné jednotlivé

komponenty skládat případně i nad sebe, a tím by se výsledná plocha ještě zmenšila a bylo by možné tento systém provozovat i v blízkosti měst. Když vezme v potaz případné zvýšení účinnosti u jednotlivých komponent, které by vedlo ke zvýšení účinnosti celého systému, může být v budoucnu podobný systém provozován. Za výhodu oproti PVE lze považovat, že při elektrolýze vzniká odpadní produkt v podobě O_2 , který je možné dále využívat.

ZÁVĚR

Diplomová práce je rozdělena na dvě části. První část je rešeršní. V jednotlivých kapitolách jsou teoreticky rozepsány jednotlivé vstupy do systému P2G. Celé to začíná u elektrické energie, která je z obnovitelných zdrojů (voda, vzduch, vítr, případně biomasa). Jelikož se systémem P2G uvažujeme jako možným akumulacním prvkem, jsou dále popsány současné způsoby akumulace elektrické energie. V následující kapitole je rozebrána voda, která je nedílnou součástí energetiky, ať už jako chladicí nebo pracovní médium. U systému P2G je používána k výrobě vodíku elektrolýzou vody.

Třetí kapitola je podrobně věnována vodíku. Jsou zde rozebrány jeho fyzikální a chemické vlastnosti, kde je v současné době využíván, jak se musí skladovat a případně přepravovat. Čtvrtá kapitola je věnována samotné výrobě vodíku. Je zde popsána produkce vodíku z fosilních paliv, biomasy a štěpení vody. Jednotlivé metody výroby vodíku jsou mezi sebou porovnány. Dále se již diplomová práce věnuje pouze tzv. zelenému vodíku, který je vyroben elektrolýzou vody.

Poslední kapitolou rešeršní části je princip samotné technologie P2G. Je zde popsána metanizace, kde vyrobený vodík přeměníme na syntetický metan. Vyrobený vodík, případně syntetický metan, lze dále využívat k různým aplikacím. Přímé využití může být v průmyslu, protože meziročně roste spotřeba vodíku o 6 % a poptávka po zeleném vodíku skrz uhlíkovou neutralitu roste mnohonásobně rychleji. Vodík nemusí být použit pouze k přímé spotřebě. Lze jej vtlačit do sítě zemního plynu nebo pomocí palivových článků vyrobit zpětně elektrickou energii. Dále se nabízí využití při vodíkové mobilitě, která je v současné době hodně diskutována. Využití vyrobeného vodíku nebo metanu je v podstatě neomezené.

Druhá část diplomové práce je věnována konkrétním aplikacím. Každá aplikace má počátek stejný. V 6. kapitole jsou postupně popsány jednotlivé ztráty, zařízení a technologie, kterými je daný proces prováděn. Na počátku stojí elektřina, která pochází z obnovitelných zdrojů. Elektřina je přenášena přenosovou soustavou a zde vzniká ztráta přenosem. Vodík vyrobíme elektrolýzou vody, která může být trojího typu AWE, PEM a SOE. Celková účinnost je ovlivněna hned několika faktory. Velkou roli má tlak a teplota, při které elektrolýza probíhá. Dále materiál elektrod, vzdálenost elektrod, typ elektrolytu, napětí na článku a pulzující napětí. Vyrobený vodík musí být uskladněn, případně přepraven. Je uvažováno se třemi možnostmi uskladnění. Stlačení na 350 barů, stlačení na 700 barů a zkapalnění. Následně je vybrána elektrolýza a možnost uskladnění vodíku, aby jednotlivé návrhy mohly být mezi sebou porovnány. Elektrolýza byla vybrána PEM, protože má vysokou účinnost, eliminuje nevýhody AWE elektrolýzy, umíme ji používat i ve větším měřítku a elektrolyzér lze snadno regulovat. K uskladnění vodíku bylo vybráno stlačení na 700 barů, protože tak dokážeme přepravit větší množství než při nižším tlaku a jedná se o způsob, kdy vznikají nižší energetické ztráty než při zkapalnění, které je následně doprovázeno dalšími ztrátami při přepravě.

Následně byly vybrány tři možnosti využití vyrobeného vodíku. Akumulace elektrické energie pomocí palivových článků, vodíkový automobil a metanizace s následným vtlačením syntetického metanu do sítě zemního plynu. Každé využití je doprovázeno určitými ztrátami. U palivových článků se jedná o aktivační ztráty (polarizaci), ohmické ztráty a transportní (koncentrační) ztráty. Vodíkový automobil se skládá z palivových článků a elektromotoru. Jsou zde tím pádem stejné ztráty jako v palivových článcích, ke kterým jsou připočteny ztráty elektromotoru (ztráty mechanické, v železe, ve vinutí statoru/rotoru a ztráty přídatné) a mechanické ztráty automobilu. Metanizace s následným vtlačením do sítě zemního plynu má ztráty u samotné metanizace a následně u kompresorů, které vtlačují syntetický metan do sítě zemního plynu. V závěru této kapitoly byla všechna tři využití mezi sebou porovnána. Nejvyšší celkové účinnosti dosáhneme u metanizace s následným vtlačením do sítě zemního

plynu, následují palivové články a nejnižší účinnost má vodíkový automobil. Jelikož se diplomová práce zabývá akumulací elektrické energie, byl vybrán systém s palivovými články k dalšímu rozboru.

V poslední kapitole byl akumulací systém P2G s palivovými články porovnán s dostupnou technologií akumulace elektřiny a to konkrétně s PVE Dlouhé stráně. Začátek kapitoly byl věnován PVE Dlouhé stráně, její konstrukci, stavebnímu a technologickému provedení. Dále byla stanovena její účinnost, včetně ztrát přenosem v síti elektrického vedení. Poté byla vypočítána energetická bilance. PVE Dlouhé stráně na svůj provoz spotřebuje 1 906 MWh a za jeden cyklus vyrobí cca 3 509 MWh. Na tuto hodnotu byl poté nastaven teoretický systém P2G s palivovými články. Byly vybrány palivové články o stejném výkonu jako reverzní turbíny v PVE. Dále byly vybrány vhodné tlakové lahve, kompresor a elektrolyzátor. Byly stanoveny potřebné množství demineralizované vody, která je vstupním produktem do elektrolyzátoru. Celková energetická bilance systému P2G je o poznání horší. Abychom vyrobili cca 3 509 MWh, celý systém na svůj provoz spotřebuje cca 6 836 MWh.

Na závěr byly oba způsoby akumulace elektrické energie mezi sebou porovnány. Ačkoliv je jasným vítězem PVE Dlouhé stráně, která má skoro dvojnásobně vyšší účinnost a na svůj provoz spotřebuje o mnohem méně elektrické energie, systém P2G má v sobě velký potenciál. Oproti očekávání veškeré komponenty zabírají mnohonásobně menší plochu, než se předpokládalo, a při případném uspořádání nad sebou se celková plocha může ještě značně zmenšit. S rostoucím podílem obnovitelných zdrojů v energetickém mixu bude třeba, aby elektrická síť byla vybavena více akumulacími prvky. Vhodné podmínky pro případnou výstavbu další PVE v ČR moc nejsou a je potřeba hledat jiné akumulací systémy. Z toho důvodu by mohlo být využíváno systému P2G s palivovými články. Jedná se však pouze o teorii a žádné zařízení o takovém výkonu nebylo ještě sestaveno. V současnosti jsou provozovány pouze zkušební zařízení o výkonu cca 1 MWh.

Cílem práce bylo mimo přehledové rešerše o power to gas technologiích provést detailní popis jednotlivých technologií a bilanční výpočet. Pro stanovení bilančního výpočtu byla prvně stanovena účinnost jednotlivých systémů a jejich podrobné popsání a následně provedena samotná energetická bilance, která je uvedena do kontextu s PVE Dlouhé stráně.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] LAUBE, Ivan, Pavel AUGUSTA, Milan POLÁK a Jan DÁŇA. Svět energie. *Encyklopedie energetiky elektřina* [online]. [cit. 2022-01-21]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/data/web/vzdelavaci-program-cez/tiskoviny/encyklopedie-eletrina-e.pdf>
- [2] ČEZ. *Elektrická energie* [online]. [cit. 2022-01-21]. Dostupné z: https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/vykladovy-slovník-energetiky/hesla/elektr_en.html
- [3] Projekty. *Přenosová soustava a její funkce* [online]. [cit. 2022-01-21]. Dostupné z: <https://projekty.osu.cz/akreditace2017/test%202.php>
- [4] E.ON. *Co jsou to obnovitelné zdroje energie* [online]. [cit. 2022-01-21]. Dostupné z: <https://www.eon.cz/radce/zelena-energie/zelena-eletrina/co-jsou-to-obnovitelne-zdroje-energie/>
- [5] QUASCHNING, Volker a Václav BARTOŠ. *Obnovitelné zdroje energií*. Praha: Grada, 2010. ISBN 978-80-247-3250-3.
- [6] ERU. *Roční zpráva o provozu elektrizační soustavy České republiky za rok 2020* [online]. [cit. 2022-01-20]. Dostupné z: https://www.eru.cz/sites/default/files/import_files/Rocni_zprava_provoz_ES_2020.pdf
- [7] BENDA, Vítězslav, Helena DOLEŽALOVÁ, Peter DUŠÍČKA, et al. *Obnovitelné zdroje energie*. Praha: Profi Press, 2012. ISBN 978-80-86726-48-9.
- [8] E.ON. *Jak účinné jsou solární panely* [online]. [cit. 2022-01-22]. Dostupné z: <https://www.eon.cz/radce/zelena-energie/solarni-energie/jak-ucinne-jsou-solarni-panely/>
- [9] VOBOŘIL, David. *Oenergetice. Vodní elektrárny – princip, rozdělení, elektrárny v ČR* [online]. 24.11.2016 [cit. 2022-01-22]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje-energie/vodni-eletrarny-princip-a-rozdeleni>
- [10] Tzbinfo. *Akumulace elektřiny* [online]. [cit. 2022-01-19]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-eletriny>
- [11] MAREŠ, Jan, Martin LIBRA a Vladislav POULEK. *Elektro. Akumulace elektrické energie* [online]. 1.2.2011 [cit. 2022-01-19]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/akumulace-eletricke-energie--9696>
- [12] ČEZ. *Svět energie. Akumulace energie* [online]. [cit. 2022-01-20]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/decentralizovana-energetika/decentralizovane-energeticke-zdroje-podrobne/akumulace-energie/vyklad>
- [13] KRÁLOVÁ, Magda. *Techmania. Činnost přečerpávací elektrárny* [online]. [cit. 2022-01-20]. Dostupné z: <http://edu.techmania.cz/cs/veda-v-pozadi/663>
- [14] WAGNER Vladimír, *Oenergetice. Využívané i perspektivní technologie akumulace energie* [online]. 11.9.2018 [cit. 2022-01-20]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/akumulace-energie/velky-prehled-vyuzivane-i-perspektivni-technologie-akumulace-energie>
- [15] ČEZ. *Cesty k akumulaci elektrické energie elektrárny* [online]. [cit. 2022-01-20]. Dostupné z: https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/06/cesty_1.html
- [16] cnews. *Li-ion baterie: principy, provoz, rady* [online]. 15.4.211 [cit. 2022-01-20]. Dostupné z: <https://www.cnews.cz/li-ion-baterie-principy-provoz-rady-1-cast/>
- [17] Hydrotech. *Voda na Zemi: Kolik jí máme na naší planetě a kolik z toho je pitná voda* [online]. [cit. 2021-11-04]. Dostupné z: <https://www.hydrotech->

- [group.com/cz/blog/voda-na-zemi-kolko-jej-na-planete-mame-a-ake-mnozstvo-z-toho-tvori-pitna-voda](https://www.av-equen.cz/blog/voda-na-zemi-kolko-jej-na-planete-mame-a-ake-mnozstvo-z-toho-tvori-pitna-voda)
- [18] Avequen. *Vlastnosti vody* [online]. [cit. 2021-10-23]. Dostupné z: <https://www.av-equen.cz/znalosti/vlastnosti-vody/>
- [19] KRÁLOVÁ, Magda. *Techmania. Fázový diagram* [online]. [cit. 2021-10-23]. Dostupné z: <http://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/skupenstvi/fazovy-diagram>
- [20] Encyklopedie fyziky. *Fázový diagram* [online]. [cit. 2021-10-24]. Dostupné z: <http://fyzika.reichl.com/main.article/view/655-fazovy-diagram>
- [21] ŽIŽKA, Jan. *Vědavýzkum. Vodíková energetika: Od NASA k českým inovátorům* [online]. 8.1.2020 [cit. 2021-10-24]. Dostupné z: <https://vedavyzkum.cz/blogy-a-komentare/jan-zizka/vodikova-energetika-od-nasa-k-ceskym-inovatorum>
- [22] BENEŠOVÁ, Marika, Erna PFEIFEROVÁ a Hana SATRAPOVÁ. *Odmaturuj! z chemie*. 2., přeprac. vyd. Brno: Didaktis, c2014. ISBN 978-80-7358-232-6.
- [23] Atranet. *Co je to destilace* [online]. [cit. 2022-04-18]. Dostupné z: <https://www.atranet.cz/destilace>
- [24] TOMČALA, Jiří. *Úprava vody v energetice* [online]. [cit. 2022-04-18]. Dostupné z: https://kke.zcu.cz/export/sites/kke/about/projekty/enazp/projekty/16_Chemie-a-ekologie_43-44/44_MMP/082_uprava-vody---Tomcala.pdf
- [25] Eluc. *Destilační aparatura* [online]. [cit. 2022-04-18]. Dostupné z: https://eluc.ikap.cz/uploads/block_images/2152/sestaven_destila_n_aparatury.jpg
- [26] Culligan. *Demineralizace vody, deionizace* [online]. [cit. 2022-04-18]. Dostupné z: <https://www.culligan.cz/index.php/technologie/deionizace-technologie>
- [27] Přístroje pro zdraví. *Reverzní osmóza* [online]. [cit. 2022-04-18]. Dostupné z: <https://pristrojeprozdрави.cz/reverzni-osmoza-marlus-650>
- [28] ČEZ. *Svět energie. Vodíková energetika* [online]. [cit. 2021-11-03]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/decentralizovana-energetika/decentralizovane-energeticke-zdroje-podrobne/vodikova-energetika/vyklad>
- [29] Prvky. *Periodická soustava prvků* [online]. [cit. 2021-10-23]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/1.html%2023.10>
- [30] Wikipedia. *Izotopy* [online]. [cit. 2021-10-23]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/1.html%2023.10>
- [31] Hytep. *Základní informace k vodíku* [online]. [cit. 2021-10-23]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/o-vodiku/ve-zkratce>
- [32] ABDALLA, M. Abdalla, Shahzad HOSSAIN, Ozzan B. NISFINDY et. al. *Hydrogen production, storage, transportation and key challenges with applications: A review* [online]. 3.4.2018 [cit. 2021-11-11]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890418303170>
- [33] DROBNÝ, Josef. *Skladování vodíku* [online]. 10.10.2019 [cit. 2021-11-07]. Dostupné z: <https://hydro-race.eu/Skladov%C3%A1n%C3%AD-vod%C3%ADku>
- [34] BOUDELLAL, Méziane. *Power-to-gas: renewable hydrogen economy*. Berlin: De Gruyter, 2018. ISBN 978-3-11-055881-4.
- [35] ROVNÝ, Tomáš. *Ekonomický deník. Přeprava zeleného vodíku je oříšek* [online]. 10.9.2021 [cit. 2021-11-11]. Dostupné z: <https://ekonomickydenik.cz/preprava-zeleneho-vodiku-je-technologicky-orisek-dopravci-zkousi-lode/>
- [36] LEIHGT, Collins. *Recharge. Renewables will fuel intercontinental trade in green hydrogen* [online]. 4.7.2019 [cit. 2022-01-22]. Dostupné z: <https://www.rechargenews.com/transition/renewables-will-fuel-intercontinental-trade-in-green-hydrogen/2-1-632707>

- [37] BIČÁKOVÁ, Olga, Michal JEREMIAŠ, Michal POHOŘELÝ et. al. Akademie věd České republiky. *Netradiční zdroje energie, čistá paliva a nové metody spalování* [online]. 2016 [cit. 2021-11-21]. Dostupné z: <https://www.academia.cz/uploads/media/preview/0001/04/89695660d8500227f0eeca345c4c027d93bc435f.pdf>
- [38] BUCHTA, Jiří. Tzbinfo. *Výsledky šetření některých událostí na plynových zařízeních* [online]. 1.2.2017 [cit. 2021-11-03]. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/vytapime-plynem/15319-vysledky-setreni-nekterych-udalosti-na-plynovych-zarizenich-17-cast>
- [39] PAL, Bahduar Dan, Arvind SINGH a Ashish BHATNAGAR. *A review on biomass based hydrogen production* [online]. 11.11.2021 [cit. 2021-11-16]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319921041562#sec3>
- [40] PONCAROVÁ, Jana. Srovnejto. *Zelený vodík: Co to je, jak vzniká a proč ho potřebujeme* [online]. 21.2.2021 [cit. 2021-11-25]. Dostupné z: <https://www.srovnejto.cz/blog/zeleny-vodik-co-to-je-jak-vznika-a-proc-ho-potrebujeme-/>
- [41] KOVAŘÍKOVÁ, Zdeňka. Ekolist. *Plyn budoucnosti. Jak daleko je Česko na cestě k jeho využití* [online]. 13.10.2021 [cit. 2021-11-25]. Dostupné z: <https://ekolist.cz/cz/zpravodajstvi/zpravy/vodik-v-cesku.jak-daleko-jsme-na-cestech-k-vyuziti-plynu-budoucnosti>
- [42] NIKOLAIDIS, Pavlos a Andreas POULLIKKAS. *A comparative overview of hydrogen production process* [online]. 18.9.2016 [cit. 2021-11-21]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032116305366#s0010>
- [43] DROBNÝ, Josef. *Výroba vodíku z fosilních paliv* [online]. 26.9.2019 [cit. 2021-11-21]. Dostupné z: https://hydro-race.eu/V%C3%BDroba-vod%C3%ADku-z-fosiln%C3%ADch-paliv#Parn_reforming
- [44] SINGH, Vaishali a Debabrata DAS. *Potential of hydrogen production from biomass* [online]. 2019 [cit. 2021-11-17]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/thermochemical-process>
- [45] ANWAR, Shams, Faisal KHAN, Yahui ZHANG a Abdoulaye DJIRE. *Recent development in electrocatalyst for hydrogen production through water electrolysis* [online]. 30.7.2021 [cit. 2021-11-25]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319921024745>
- [46] TKÁČ, Martin a Karin STEHLÍK. *Akumulace energie přeměnou elektřiny na plyn* [online]. 24.11.2017 [cit. 2021-11-17]. Dostupné z: <http://www.chemicke-listy.cz/ojs3/index.php/chemicke-listy/article/view/3088/3072>
- [47] TKÁČ, Martin a Karin STEHLÍK. *Centrální výroba vodíku* [online]. 12.5.2016 [cit. 2021-11-17]. Dostupné z: <http://www.chemicke-listy.cz/ojs3/index.php/chemicke-listy/article/view/31/31>
- [48] VOBOŘIL, David. Oenergetice. *Power to Gas – budoucnost akumulace elektřiny* [online]. 24.6.2015 [cit. 2022-01-08]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/power-to-gas-budoucnost-akumulace-elektriny>
- [49] IKAHEIMO, Jussi, Robert WEISS a Juha KIVILUOMA. *Impact of power-to-gas on the cost and design of the future low-carbon urban energy system* [online]. 14.9.2021 [cit. 2022-01-05]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261921010643>
- [50] Biom. *Vodík* [online]. [cit. 2022-01-08]. Dostupné z: https://www.czbiom.cz/konf/files/7_vohlidkova.pdf
- [51] BREYER, Christian, Mahdi FASIHI, Cyril BAJAMUNDI a Felix CREUTZIG. *Direct Air Capture of CO₂: A Key Technology for Ambitious Climate Change Mitigation*

- [online]. 18.9.2019 [cit. 2022-01-08]. Dostupné z:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542435119304131>
- [52] LEHNER, Markus, Robert TICHLER, Horst STEINMÜLLER a Markus KOPPE. *Power-to-gas: technology and business models*. Cham: Springer, 2014, ISBN 978-3-319-03994-7.
- [53] JOHN, St. Jeff. *Green Hydrogen in Natural Gas Pipelines: Decarbonization Solution or Pipe Dream* [online]. 30.11.2020 [cit. 2022-01-16]. Dostupné z:
<https://www.greentechmedia.com/articles/read/green-hydrogen-in-natural-gas-pipelines-decarbonization-solution-or-pipe-dream>
- [54] FÍK, Josef. Tzbinfo. *Zemní plyn – spalné teplo a další vlastnosti* [online]. 30.4.2004 [cit. 2022-01-16]. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/vytapime-plynem/1963-spalovaci-vlastnosti-zp-i>
- [55] MELAINA, M.W., O. Antonia a M. Penev. *Blending Hydrogen into Natural Gas Pipeline Networks: A Review of Key Issues* [online]. 2013 [cit. 2022-01-16]. Dostupné z: <https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/51995.pdf>
- [56] Devinn. *Palivový článek* [online]. 11.8.2019 [cit. 2022-01-08]. Dostupné z:
<https://www.devinn.cz/blog/palivovy-clanek/>
- [57] Cekujvedu. *Palivový článek, alternativa pro spalovací motor* [online]. [cit. 2022-01-22]. Dostupné z: <http://cekujvedu.cz/nove-objevy/palivovy-clanek-alternativa-pro-spalovaci-motor/>
- [58] PORŠ, Zdeněk. *Palivové články* [online]. 2002 [cit. 2022-01-12]. Dostupné z:
<https://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/palivove-clanky.pdf>
- [59] ŠTRUBAŘOVÁ, Petra. Tzbinfo. *Jak fungují palivové články* [online]. 22.2.2018 [cit. 2022-01-12]. Dostupné z: <https://elektro.tzb-info.cz/elektromotory-pohony-a-stroje/16987-jak-funguji-palivove-clanky>
- [60] MACUROVÁ, Anna. *Auta na vodík: O co jde a jaké mají výhody a nevýhody* [online]. 5.3.2022 [cit. 2022-01-13]. Dostupné z: <https://autotrip.cz/vodikova-auta/>
- [61] PALMER, Chris. *Hydrogen Power Focus Shifts from Cars to Heavy Vehicles* [online]. 22.10.2020 [cit. 2022-01-13]. Dostupné z:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095809920302988>
- [62] Toyota. *As easy as a conventional car* [online]. [cit. 2022-01-15]. Dostupné z:
<https://www.toyota-europe.com/world-of-toyota/feel/environment/better-air/fuel-cell-vehicle>
- [63] Energy. *How do fuel cell electric vehicles work using hydrogen* [online]. [cit. 2022-01-15]. Dostupné z: <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-fuel-cell-electric-cars-work>
- [64] E15. *Toyota v Boleslavi ukázala auto na vodík* [online]. [cit. 2022-01-13]. Dostupné z:
<https://www.e15.cz/galerie/byznys/prumysl-a-energetika/143767/toyota-v-boleslavi-ukazala-auto-na-vodik-ostatni-ale-sazi-spis-na-elektromobily?foto=2>
- [65] Toyota. *Hydrogen fuel cell technology* [online]. [cit. 2022-01-15]. Dostupné z:
<https://toyota-forklifts.eu/solutions/energy-solutions/what-fuel-cell-technology-means-for-your-forklift/>
- [66] ZILVAR, Jiří. Tzbinfo. *Syntetická paliva – power to gas, power to liquid: výroba a účinnost* [online]. 26.5.2020 [cit. 2022-01-30]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektřiny/20711-synteticka-paliva-power-to-gas-power-to-liquid-vyroba-a-ucinnost>
- [67] Mojeenergie. *Elektroenergetika – dodávka energie* [online]. [cit. 2022-01-30]. Dostupné z: <http://www.mojeenergie.cz/cz/elektroenergetika-dodavka-energie>
- [68] RUDOLF, Ladislav. *Komplexní rozbor elektrických ztrát vedení přenosové soustavy* [online]. 2009 [cit. 2022-01-30]. Dostupné z:

- https://projekty.osu.cz/akreditace2017/Habilita%20c4%8dn%20ad%20pr%20a1ce_ZTR%2081TY.pdf
- [69] Fyzikální pokusy. *Jouleovo teplo* [online]. [cit. 2022-01-30]. Dostupné z: <https://fyzikalnipokusy.cz/1657/jouleovo-teplo>
- [70] CVUT. *Technika vysokých napětí* [online]. [cit. 2022-01-30]. Dostupné z: https://cw.fel.cvut.cz/old/media/courses/b1m15tvn/tvn_elektricke_vyboje_1_1_jh.pdf
- [71] PELÁN, Ondřej. *Výroba vodíku elektrolyzou a možnosti zvyšování účinnosti* [online]. 2017 [cit. 2022-01-30]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=150073
- [72] VÁVRA, Robert. *Model energetického systému s vodíkovou akumulací* [online]. 2019 [cit. 2022-01-30]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=194183
- [73] Česká chemie. *Co je Gibbsova energie* [online]. [cit. 2022-01-30]. Dostupné z: <http://www.ceskachemie.cz/svet-chemie/popularni-chemie/chemicka-poradna/co-je-gibbsova-energie#.YnwVdehBxPZ>
- [74] ŠPINA, Martin. Oenergetice. *Vodík: nejléčší prvek je největší výzva* [online]. 29.12.2021 [cit. 2022-02-03]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/vodik/vodik-nejlecsi-prvek-nejvetsi-vyzva>
- [75] Ujep. *Doprava plynů* [online]. [cit. 2022-02-03]. Dostupné z: http://fzpu.ujep.cz/ktv/uc_texty/pt3/3%20DopravaPlynu.pdf
- [76] Netinbag. *Co je to vodíkový kompresor* [online]. [cit. 2022-02-03]. Dostupné z: <https://www.netinbag.com/cs/manufacturing/what-is-a-hydrogen-compressor.html>
- [77] Chart. *Hydrogen liquefaction process* [online]. [cit. 2022-02-10]. Dostupné z: <https://www.chartindustries.com/Products/Hydrogen-Liquefiers>
- [78] SCHLESINGER, Karel. *Současné metody diagnostiky palivových článků PEM a jejich component* [online]. 2015 [cit. 2022-02-20]. Dostupné z: https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/19823/1/Diplomka_8_finish_tisk.pdf
- [79] Hradební. *Palivové články* [online]. [cit. 2022-02-20]. Dostupné z: https://vyuka.hradebni.cz/file.php/305/kap._8_Palivove_clanky.pdf
- [80] CANDELAREIS, Daniele, Antonio VALENTE et. al. Comparative life cycle assessment of hydrogen fuelled passenger cars [online]. [cit. 2022-02-28]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319921000926#bib16>
- [81] PAVELKOVÁ, Naděžda. *Účinnost elektrických motorů a snižování spotřeby elektrické energie* [online]. 2008 [cit. 2022-02-28]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/37850.pdf>
- [82] PŮLPÁN, Petr. *Návrh metanizační linky* [online]. 2021 [cit. 2022-04-10]. Dostupné z: https://dSPACE.cvut.cz/bitstream/handle/10467/96842/F2-DP-2021-Pulpan-Petr-Navrh_metanizacni_linky.pdf?sequence=-1&isAllowed=y
- [83] SCHIRRMEISTER, Steffen, Olaf von MORSTEIN a Helge FÖCKER. *Demonstration plant Falkenhagen commissioned/ commissioning report* [online]. 30.11.2017 [cit. 2022-04-10]. Dostupné z: https://www.storeandgo.info/fileadmin/downloads/deliverables_2020/Update/2019-03-28_STOREandGO_D2.3_UST_accepted.pdf
- [84] VOBOŘIL, David. Oenergetice. *Přečerpávací vodní elektrárny v České republice* [online]. 3.1.2017 [cit. 2022-03-10]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrarny-cr/precerpavaci-vodni-elektrarny-v-ceske-republice>
- [85] ČEZ. *Přečerpávací vodní elektrárna Dlouhé stráně* [online]. [cit. 2022-03-10]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobni-zdroje/obnovitelne-zdroje/voda/vodni-elektrarny/ceska-republika/dlouhe-strane-58155>

- [86] Dlouhé stráně. *Fotografie* [online]. [cit. 2022-03-12]. Dostupné z: <https://www.dlouhe-strane.cz/strane/fotogalerie>
- [87] ZBORNÍK, Luděk. *Význam přečpávacích vodních elektráren pro energetiku ČR* [online]. [cit. 2022-03-15]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/79756/F3-BP-2019-Zbornik-Ludek-Vyznam%20precerpavacich%20elektraren%20pro%20energetiku%20CR_prace.pdf?sequence=-1&isAllowed=y
- [88] Nedstack. *PemGen CHP-FCPS-1000* [online]. [cit. 2022-03-31]. Dostupné z: <https://nedstack.com/en/pemgen-solutions/stationary-fuel-cell-power-systems/pemgen-chp-fcps-1000>
- [89] BUDÍN, Jan. *Oenergetice. Přečpávací vodní elektrárna – princip a uspořádání* [online]. 3.3.2015 [cit. 2022-03-10]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/typy-elektraren/precerpavaci-vodni-elektrarna-princip-usporadani-2>
- [90] Nedstack. *Stationary fuel cell power system* [online]. [cit. 2022-03-31]. Dostupné z: <https://nedstack.com/en/pemgen-solutions/stationary-fuel-cell-power-systems>
- [91] GARDINER, Ginger. *Hydrogen is poised to fuel composites growth* [online]. 20.10.2021 [cit. 2022-04-04]. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/articles/hydrogen-is-poised-to-fuel-composites-growth-part-2>
- [92] NPROXX. *Type 4 pressure vessels growth* [online]. [cit. 2022-04-04]. Dostupné z: <https://www.nproxx.com/capabilities/type-4-pressure-vessels/>
- [93] Sollant. *Diaphragm compressor* [online]. [cit. 2022-04-14]. Dostupné z: https://www.sollant.com/diaphragm-compressor/?gclid=EAIaIQobChMI5b2w0omT9wIVpgIGAB1u2AvkEAAYASAAEgKyEfd_BwE
- [94] Nelhydrogen. *M series containerized* [online]. [cit. 2022-04-10]. Dostupné z: <https://nelhydrogen.com/product/m-series-containerized/>
- [95] Epřehledy. *Rozměry fotbalového hřiště* [online]. [cit. 2022-04-01]. Dostupné z: <http://www.eprehledy.cz/rozmary-fotbaloveho-hriste.php>
- [96] FAYAZ, H., R. SAIDUR et. al. *An overview of hydrogen as a vehicle fuel* [online]. 30.6.2012 [cit. 2021-11-03]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032112003929#!>
- [97] KUMAR, S. Shiva a V. HIMABUNDU. *Hydrogen production by PEM water electrolysis* [online]. 29.3.2019 [cit. 2022-01-05]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589299119300035>
- [98] Devinn. *Výroba vodíku* [online]. 5.8.2019 [cit. 2021-11-21]. Dostupné z: <https://www.devinn.cz/blog/vyroba-vodiku/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Veličina	Jednotka
ΔG	Změna Gibbsovy energie	J
ΔH	Změna entalpie	J
η	Termodynamická teplota	–
η_G	Účinnost generátoru	–
$\eta_{ideál}$	Ideální účinnost palivového článku	–
η_p	Účinnost spojky	–
η_T	Účinnost turbíny	–
AFC	Alkalický palivový článek	–
ATR	Autotermální reforming	–
AWE	Alkalická elektrolýza	–
CAES	Akumulace do stlačeného vzduchu	–
CCS	Carbon capture and storage (Záchyt CO ₂ a uložení)	–
CCU	Carbon capture and use (Záchyt CO ₂ a použití)	–
DAC	Direct air capture (Záchyt CO ₂ ze vzduchu)	–
E_g	Elektrická energie	kWh
E_n	Energetický ekvivalent nádrže	kWh/m ³
E_{PVE}	Energie vyrobená PVE Dlouhé stráně	kWh
$E_{spotř}$	Energie potřebná k výrobě vodíku	J
E_{zisk}	Energie získaná (vodík)	J
g	Tíhové zrychlení	m/s ²
H_t	Spalné teplo pro vodík	J/m ³
H_u	Užitečný spád	m
CHKO	Chráněná krajinná oblast	–
MCFC	Palivové články s tavenými uhličitany	–
OZE	Obnovitelné zdroje energie	–
P_1	Elektrický příkon na statoru	W
P_2	Mechanická výkon na hřídeli	W
P2G	Power to gas	–
P2H2P	Power to heat to power	–
PAFC	Palivové články s kyselinou fosforečnou	–
P_d	Příkon (dodaný výkon)	W
PEM	Elektrolýza s proton výměnnou membránou	–
PEMFC	Pal. čl. s polymerní elektrolytickou membránou	–
POX	Parciální oxidace	–
P_v	Vyroběný výkon	W
PVE	Přečerpávací vodní elektrárna	–
Q	Průtokové množství	m ³ /s
SOE	Vysokoteplotní elektrolýza (pevných oxidů)	–
SOFC	Palivové články s tuhými oxidy	–
SR	Steam reforming (Parní reforming)	–
t	Čas	s
U	Skutečné napětí palivového článku	V
$U_{ideál}$	Ideální napětí palivového článku	V
$V_{horní}$	Objem horní nádrže PVE Dlouhé stráně	m ³
V_h	Objem vyprodukovaného vodíku	m ³
V_u	Užitý objem horní nádrže	m ³
WGS	Water gas shift (Reakce vodní páry)	–

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Elektrizační soustava [3]	12
Obrázek 2 Podíl druhů paliv na výrobě elektrické energie za rok 2020 [6]	13
Obrázek 3 Princip PVE [13]	14
Obrázek 4 Průřez Li-ionovým akumulátorem [16].....	15
Obrázek 5 Fázový diagram vody [19].....	16
Obrázek 6 Mapa tvrdosti vody v ČR [18].....	17
Obrázek 7 Destilační aparatura [25]	18
Obrázek 8 Reverzní osmóza [27].....	18
Obrázek 9 Izotopy vodíku [30]	19
Obrázek 10 Objem stejného množství vodíku při různých tlacích [33].....	21
Obrázek 11 Ukládání vodíku v tzv. hydridech [33].....	22
Obrázek 12 Vizualizace lodi určené k přepravě kapalného H ₂ [36]	23
Obrázek 13 Výroba vodíku	24
Obrázek 14 Parní reforming (přepřacováno[42]).....	25
Obrázek 15 Metoda POX v případě uhlí tzv. zplyňování uhlí (přepřacováno [42]).....	26
Obrázek 16 Metoda ATR (přepřacováno [42]).....	27
Obrázek 17 Pyrolýza (přepřacováno[42]).....	28
Obrázek 18 Zplyňování biomasy (přepřacováno[42]).....	29
Obrázek 19 Přímá bio-fotolýza (přepřacováno [42]).....	30
Obrázek 20 Foto-fermentace (přepřacováno [42]).....	31
Obrázek 21 Schéma elektrolýzy (přepřacováno[42])	32
Obrázek 22 Schématický diagram AWE [45].....	32
Obrázek 23 Schéma SOE [45]	33
Obrázek 24 PEM metoda [45]	34
Obrázek 25 Foto-elektrolýza (přepřacováno [42]).....	35
Obrázek 26 Příklad využití P2G [48].....	38
Obrázek 27 Zachytávání CO ₂ (přepřacováno[50])	39
Obrázek 28 Princip palivového článku [57]	41
Obrázek 29 Pohonný systém vodíkového automobilu [64].....	44
Obrázek 30 Pohonná soustava vysokozdvížného vozíku [65].....	45
Obrázek 31 Účinnost přenesené elektrické energie	47
Obrázek 32 Vliv tlaku a teploty na celkovou účinnost AWE elektrolýzy [71]	48
Obrázek 33 Účinnost vyrobeného vodíku jednotlivými typy elektrolýzy	50
Obrázek 34 Celková účinnost procesu výroby vodíku včetně uskladnění a přepravy....	52
Obrázek 35 Celková účinnost s PEM elektrolýzou a stlačením na 700 bar.....	53
Obrázek 36 Účinnost a množství vyrobené elektrické energie různými technologiemi [78]	54
Obrázek 37 Závislost napětí na hustotě proudu [78]	54
Obrázek 38 Výsledná účinnost využití vodíku vyrobeného P2G technologií v palivovém článku	56
Obrázek 39 Výsledná účinnost využití vodíku vyrobeného P2G technologií vodíkovým automobilem	57
Obrázek 40 Zařízení na výrobu SNG metanizací v Německu [83]	58
Obrázek 41 Výsledná účinnost využití vodíku vyrobeného P2G technologií s následnou metanizací a vtlačení do sítě zemního plynu	59
Obrázek 42 Horní nádrž PVE Dlouhé stráně [86]	62
Obrázek 43 Účinnost PVE	63
Obrázek 44 Energetická bilance PVE Dlouhé stráně.....	65

Obrázek 45 Akumulace elektrické energie systém P2G a palivovými články	65
Obrázek 46 Systém palivových článku CHP-FCP-1000 o výkonu 1 MW [90].....	67
Obrázek 47 Kompozitní tlakové lahve firmy NPROXX [91]	68
Obrázek 48 Membránový vzduchový kompresor typ Z [93]	69
Obrázek 49 PEM elektrolyzér model MC500 [94]	70
Obrázek 50 Energetická bilance systému P2G.....	71
Obrázek 51 Porovnání plochy P2G a PVE.....	72

SEZNAM TABULEK

- Tabulka 1 Tvrdost vody [18]
- Tabulka 2 Vybrané vlastnosti vodíku [29]
- Tabulka 3 Využití vodíku v různých průmyslových odvětvích [32]
- Tabulka 4 Porovnání procesů výroby vodíku [42][45]
- Tabulka 5 Porovnání palivových článků [58][59]
- Tabulka 6 Energetická hustota plynného vodíku [74]
- Tabulka 7 Účinnosti vodíku vyrobeného P2G na vybraných aplikacích
- Tabulka 8 Parametry PVE Dlouhé stráně [84][85]
- Tabulka 9 Parametry systému CHP-FCP-1000 [88]
- Tabulka 10 Parametry tlakové lahve NPROXX [91]
- Tabulka 11 Parametry membránového kompresoru typu Z [93]
- Tabulka 12 Parametry elektrolyzéru MC500 od firmy NELHYDROGEN [94]
- Tabulka 13 Parametry jednotlivých hlavních komponent systému P2G