

Bakalářská práce



České  
vysoké  
učení technické  
v Praze

**F3**

Fakulta elektrotechnická  
Katedra elektroenergetiky

## Současnost a budoucnost vodíku v elektroenergetice a mobilitě

**Jan Šturm**

Vedoucí: Ing. Jan Rimbala

Obor: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní program: Aplikovaná elektrotechnika

Květen 2023



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Šturm** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **492062**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektroenergetiky**  
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**  
Specializace: **Aplikovaná elektrotechnika**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Současnost a budoucnost vodíku v elektroenergetice a mobilitě**

Název bakalářské práce anglicky:

**The present and future of hydrogen in electricity and mobility**

Pokyny pro vypracování:

1. Vypracujte rešerši problematiky výroby a skladování vodíku
2. Používané způsoby technicky a ekonomicky porovnejte
3. Vypracujte případovou studii využití časových změn ceny elektrické energie pro výrobu vodíku a jeho následné využití.

Seznam doporučené literatury:

JANÍK, Luděk, Aleš DOUCEK a Petr DLOUHÝ. Strategická výzkumná agenda rozvoje vodíkového hospodářství v ČR. Česká vodíková technologická platforma. 2010.  
TKÁČ, Martin a Karin STEHLÍK. Centrální výroba vodíku. Chemické listy. 2017.  
ANDERSSON, Joakim and Stefan GRÖNKVIST. Large-scale storage of hydrogen. International Journal of Hydrogen Energy. 2019.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Jan Rimbala katedra elektroenergetiky FEL**

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

Datum zadání bakalářské práce: **17.02.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

Platnost zadání bakalářské práce: **22.09.2024**

\_\_\_\_\_  
Ing. Jan Rimbala  
podpis vedoucí(ho) práce

\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Zdeněk Müller, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

\_\_\_\_\_  
prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta



## Poděkování

Děkuji Ing. Janu Rimbalovi za pomoc při vedení této bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat doc. Dr. Ing. Janu Kynclovi a Ing. Pavlu Hrzinovi, Ph.D. za cenné rady týkající se získávání dat pro vypracování případové studie.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze, 24. května 2023

## Abstrakt

Cílem této práce je nastínit možné využití vodíku v energetice a mobilitě a poukázat na problémy, které jsou s tím spojené. Práce se přesněji zaměřuje na výrobu a skladování vodíku v současnosti a na jejich možný budoucí vývoj. V obou případech rozebírá výhody a nevýhody jednotlivých metod. Také poukazuje na jejich případné problémy, které je nutno ještě vyřešit. Dále práce zvažuje v případové studii možné využití vodíku k akumulaci elektrické energie pomocí zkoumaného P2G systému a zkoumá jeho využití v kombinaci s časovou změnou cen elektrické energie. Na závěr z výsledků vyhodnocuje možnou návratnost a další využitelnost tohoto systému.

**Klíčová slova:** H<sub>2</sub>, vodík, akumulace, výroba, elektrolýza, PEM, parní reformování, parciální oxidace, POX, shift reakce, zplyňování uhlí, bio-procesy, skladování, stlačený plyn, zkapalnění, hydridy, Power to gas, P2G, elektrolyzátor, palivové články

**Vedoucí:** Ing. Jan Rimbala  
Katedra elektroenergetiky,  
Fakulta elektrotechnická,  
České vysoké učení technické v Praze

## Abstract

Objective of this thesis was to enlighten possible usage of hydrogen in electricity and mobility and to point out issues connected with it. Thesis focuses on methods of production and storage of hydrogen, specifically on present situation and future development of such methods. The thesis also goes through benefits and drawbacks of individual methods and points out specific issues of some of them that need to be solved. In addition, it also considers possible usage of electricity accumulation in case study that investigates combination of P2G system and change of electricity price in time. At the end, the case study evaluates return on investments and other usage of examined system.

**Keywords:** H<sub>2</sub>, hydrogen, accumulation, production, electrolysis, PEM, steam reforming, partial oxidation, POX, shift reaction, coal gasification, bio-processes, storage, pressurized gas, liquefaction, hydrides, Power to gas, P2G, electrolyzer, fuel cell

**Title translation:** The present and future of hydrogen in electricity and mobility

## Obsah

<b>1 Úvod</b>	<b>1</b>	2.4.1 Parní reformování . . . . .	10
1.1 Využití vodíku jako paliva . . . . .	1	2.4.2 Parciální oxidace (POX) . . . . .	11
1.1.1 Využití v energetice . . . . .	2	2.4.3 Zplyňování uhlí . . . . .	11
1.1.2 Využití v dopravě . . . . .	3	2.5 Bio-procesy . . . . .	13
1.2 Výbušnost . . . . .	3	2.5.1 Tmavá fermentace . . . . .	13
<b>2 Výroba</b>	<b>5</b>	2.5.2 Mikrobiální elektrolytický článek . . . . .	13
2.1 Elektrolýza . . . . .	5	2.5.3 Bio-fotolýza . . . . .	13
2.1.1 Alkalická elektrolýza . . . . .	6	2.6 Shrnutí . . . . .	14
2.1.2 Elektrolýza s membránou pro výměnu protonů (PEM) . . . . .	6	<b>3 Skladování</b>	<b>17</b>
2.1.3 Vysokoteplotní elektrolýza s pevnými oxidy . . . . .	7	3.1 Stlačený plyn . . . . .	17
2.2 Fotolýza . . . . .	8	3.2 Zkapalnění . . . . .	18
2.3 Termochemické štěpení . . . . .	8	3.3 Hydridy . . . . .	19
2.4 Výroba z uhlovodíkových paliv . .	9	3.3.1 Kovové hydridy . . . . .	19
		3.3.2 Deriváty vodíku . . . . .	21
		3.4 Speciální způsoby uložení . . . . .	21

3.5 Shrnutí . . . . .	22	<b>B Literatura</b>	<b>43</b>
<b>4 Případová studie</b>	<b>25</b>		
4.1 Power to gas systémy . . . . .	26		
4.2 Zkoumaný systém . . . . .	27		
4.3 Dny nevhodné pro akumulaci . . .	30		
4.4 Dny vhodné pro akumulaci . . . .	31		
4.4.1 Prodej . . . . .	32		
4.4.2 Svátky . . . . .	33		
4.4.3 Dnešní situace . . . . .	35		
4.4.4 Další využití . . . . .	35		
4.5 Návratnost systému . . . . .	37		
<b>5 Závěr</b>	<b>39</b>		
<b>A Seznam zkratk a příloh</b>	<b>41</b>		
A.1 Zkratky . . . . .	41		
A.2 Externí přílohy . . . . .	41		



## Obrázky

1.1 Účinnost palivového článku v závislosti na zatížení[5] . . . . .	2
1.2 Joule-Thomsonova inverzní křivka pro vodík[6] . . . . .	4
2.1 PEM elektrolyzér Silyzer 300 [27]	7
2.2 Podíl na výrobě vodíku[13] . . . . .	9
3.1 Porovnání uložené energie dle způsobu uložení[20][19] . . . . .	22
4.1 Koncept P2G systémů [34] . . . . .	26
4.2 Elektrolyzér Silyzer 300 [27] . . . . .	27
4.3 Palivové články Fuji Electric [29]	28
4.4 Nevhodný den [24] [30] . . . . .	30
4.5 Vhodný den [24] [30] . . . . .	31
4.6 Vhodný den - prodej [30] . . . . .	32
4.7 Velikonoční pondělí [30] . . . . .	33
4.8 Velikonoční pondělí - prodej [30]	34

## Tabulky

2.1 Shrnutí výroby část první . . . . . 14

2.2 Shrnutí výroby část druhá . . . . . 15

# Kapitola 1

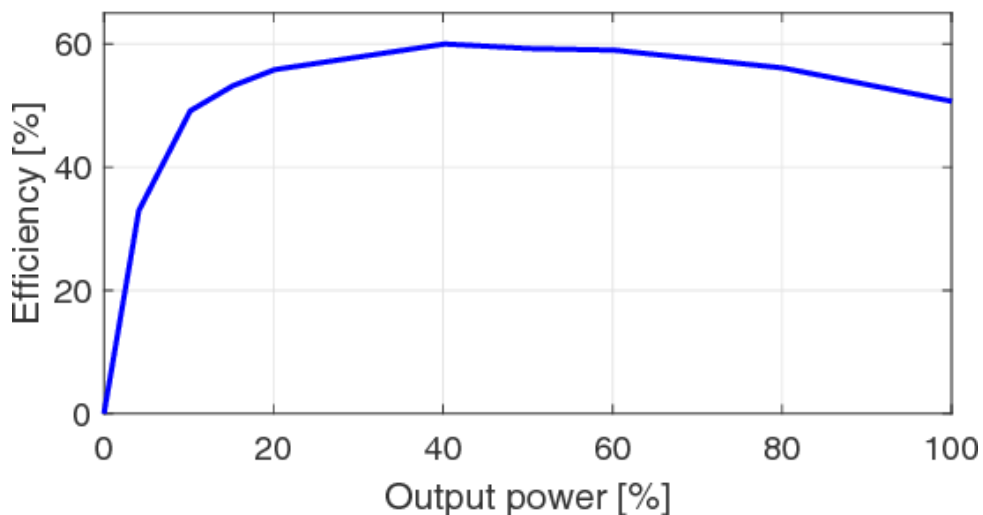
## Úvod

Vodík je prvním prvkem periodické tabulky. Jedná se o nejvíce častý prvek ve vesmíru. Na planetě Zemi zastupuje 15,4% všech atomů.[1] V čisté formě se na Zemi nachází pouze v nepatrném množství. Nejvíce je zastoupen ve sloučeninách s dalšími prvky. Z vodíku a jeho sloučenin jsou utvářeny všechny biologické struktury. Je tedy obsažen v rostlinách, živočiších a všech organických materiálech. Jeho nejznámější a nejdůležitější sloučeninou je bez pochyby voda.

### 1.1 Využití vodíku jako paliva

Důvodem zaměření této práce je možné energetické využití vodíku. Vodík lze jako palivo využít buď pro přímé spalování, nebo jako palivo do palivových článků, které energii získanou ze slučování s kyslíkem převádí rovnou na elektrickou energii, tedy bez termomechanického mezičlánku jako u běžného spalování v motoru či turbíně a následné generace elektrické energie generátorem. Tento proces dosahuje účinnosti okolo 50% v závislosti na zatížení palivového článku.

## 1. Úvod



**Obrázek 1.1:** Účinnost palivového článku v závislosti na zatížení[5]

Hlavní výhodou vodíku oproti tradičním palivům je, že při jeho spalování s kyslíkem vzniká pouze voda a energie, nedochází tedy k uvolňování oxidu uhličitého a dalších skleníkových plynů a chemických sloučenin poškozujících životní prostředí, jako jsou například různé sulfidy.[3] Další výhodou je jeho vysoká energetická hustota 33,3kWh/kg.[20] V jednom kilogramu vodíku je tak obsaženo přibližně třikrát tolik energie jako v kilogramu benzínu či nafty, jejichž energetická hustota je zhruba 12,5kWh/kg.[25]

### ■ 1.1.1 Využití v energetice

V energetice je vodík vhodný hlavně pro akumulaci energie z obnovitelných zdrojů. Aktuálně je většina energie akumulována pomocí přečerpávacích vodních elektráren. Hlavní nevýhodou těchto elektráren je nutnost vhodné lokality pro jejich výstavbu, těchto lokalit je ovšem nedostatek. U vodíkového úložiště tento problém není. Vodíkové úložiště také není omezeno nutností navrácení akumulované energie zpět na místě. V případě vodíku lze totiž vyrobený vodík při akumulaci převézt a spotřebovat jinde. Jednou z možností je například elektromobilita.

### 1.1.2 Využití v dopravě

V dopravě je vodík vhodný jako náhrada za tradiční paliva, přičemž na rozdíl od jiných alternativ, jako jsou třeba lithiové baterie, má dobrý poměr mezi vahou a uloženou energií. Je tedy vhodný i pro větší vozidla, u nichž přináší dobrý poměr mezi nákladem a ujetou vzdáleností na kilogram paliva.

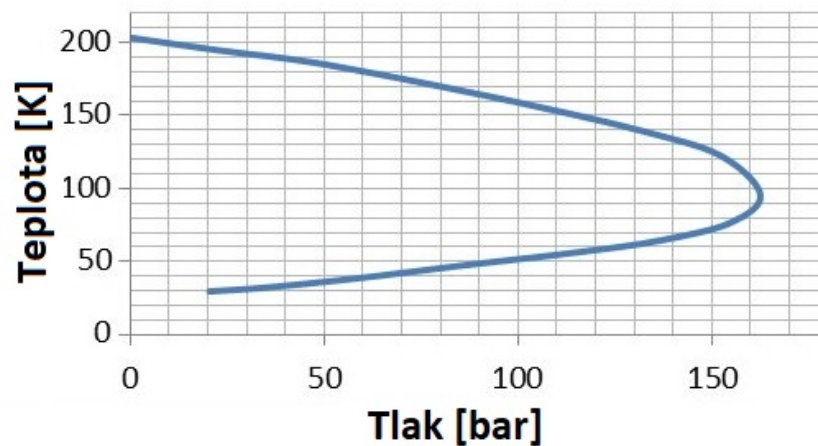
## 1.2 Výbušnost

Vodík má ale také značnou nevýhodu, a tou je jeho výbušnost. Jeho hlavním problémem je velmi vysoká vznětlivost. Vodík totiž tvoří výbušnou směs s kyslíkem již od 4% až do 95% objemu, a ve vzduchu pak od 4% až do 77% objemu.[2] Dalším problémem je, že jeho plamen téměř není viditelný a únik nelze za běžných podmínek detekovat lidskými smysly.[4]

Díky relativně vysokému podílu kyslíku k vytvoření vysoce výbušné směsi a faktu, že vodík je lehčí než vzduch a rychle stoupá, je pravděpodobnost silného výbuchu nižší než u tradičních paliv. „Při porušení nádrže díky své malé hustotě vodík stoupá velmi rychle vzhůru a případný požár vzniká spíše mimo vozidlo a nad ním.“[4] Pokud k výbuchu ovšem dojde, například v uzavřených prostorech, kde nemá vodík možnost stoupat, jedná se o objemový výbuch, který je vysoce destruktivní.

Kromě své vysoké výbušnosti má vodík při běžných atmosférických podmínkách záporný Joule-Thomsonův koeficient. To způsobuje, že, dojde-li k jeho úniku a následné expanzi při pokojové teplotě a atmosférickém tlaku, vodík se zahřívá a může dojít k jeho samovznícení.[2]

Kdy k tomuto jevu dochází, lze názorně vidět na následující obrázku, kde křivka odpovídá Joule-Thomsonově koeficientu rovnému nule.



**Obrázek 1.2:** Joule-Thomsonova inverzní křivka pro vodík[6]

K chlazení při expanzi dochází vždy nalevo od této křivky. Napravo od této křivky může docházet k ohřevu nebo chlazení v závislosti na průběhu expanze. Při expanzi může totiž ohřevem dojít k postupnému přesunu expanze na levou stranu křivky, a tím k výslednému ochlazení.[7]

Tento přesun však nemůže nastat při teplotách nad 200K a k ohřevu při expanzi zde dochází vždy. Tento případ se týká například vodíku uskladněného ve formě stlačeného plynu.



## Kapitola 2

### Výroba



#### 2.1 Elektrolýza

Jedná se o elektrochemickou reakci, při které dochází k dělení vody na vodík a kyslík. Reakci lze rozdělit na dvě části. První, kde se u katody produkuje vodík v plynné formě  $H_2$ , a druhou část, kde se u anody produkuje kyslík v plynné formě  $O_2$ . Kvůli vysoké koncentraci  $O_2$  u anody může docházet k oxidaci. Množství spotřebované energie pro toto rozdělení odpovídá energii potřebné pro rozdělení vody a odvedení atomů k jednotlivým elektrodám.

Elektrolýza dosahuje vysoké účinnosti, ale je nutné započítat i účinnost výroby potřebné elektřiny, která se u tepelných zdrojů pohybuje do 40%. [12]

V současné době se pro elektrolytickou výrobu vodíku používají tři hlavní technologické procesy. [8]

### ■ 2.1.1 Alkalická elektrolýza

Jedná se o technologii relativně jednoduchou a levnou. Její hlavní nevýhodou je nižší účinnost a špatná schopnost pracovat s proměnlivým výkonem[12], kvůli které již postupně upadá a do budoucna bude postupně nahrazována jiným typem elektrolýzy.

Častým elektrolytem bývá hydroxid draselný při koncentracích 20 až 35 % hmotnostních.[12]

„Účinnost elektrolyzéry nepřesahuje 60%. Čistota vodíku dosahuje 99,5% s menším obsahem vodní páry a kyslíku“ [9]

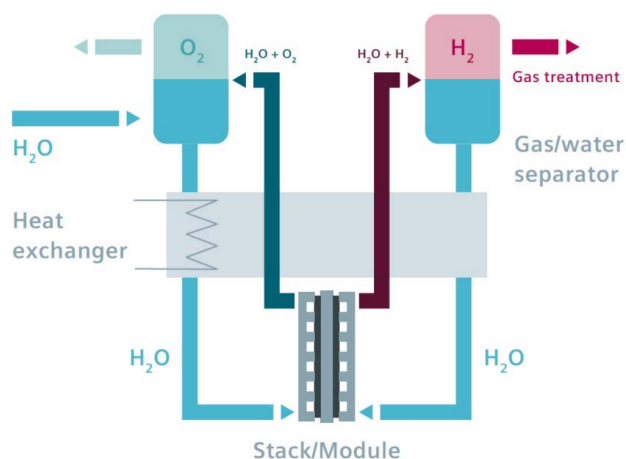
### ■ 2.1.2 Elektrolýza s membránou pro výměnu protonů (PEM)

Jak je již z názvu patrné, je do elektrolytu mezi elektrody vložena membrána, která slouží k výměně protonů a zároveň pomáhá lépe oddělovat vodík od kyslíku, díky čemuž dosahuje proces velmi vysoké čistoty vodíku.

Díky membráně proces produkuje vodík o čistotě až 99,9%.[9] je efektivnější a může dosahovat účinnosti až 92%.[10] Elektrolyt v tomto procesu je ale kyselý, což kvůli vysoké oxidaci omezuje materiály použitelné pro anodu na ušlechtilé kovy. To ve výsledku vede k vysoké pořizovací ceně dané elektrody. [8]

Tato metoda v současné době dosahuje největších pokroků a s jejím použitím byla v nedávné době otevřena společností Siemens největší elektrolýtická výroba vodíku na světě.[11]





Obrázek 2.1: PEM elektrolýzér Silyzer 300 [27]

### 2.1.3 Vysokoteplotní elektrolýza s pevnými oxidy

Jedná se o elektrolýzu za zvýšené teploty. Právě zvýšená teplota dodává část energie na rozdělení vody na vodík a kyslík, a tím zvyšuje účinnost samotné elektrolýzy.

„Například zvýšením teploty ze 100 °C na 800 °C se sníží spotřeba energie o téměř 35%.“[9]

Toto snížení spotřeby elektrické energie je ale významné pouze v případě, že je teplo dodáváno z neelektrického zdroje, buď jako teplo získané spalováním látek nebo teplo z jádra a obnovitelných zdrojů. Množství energie je totiž přibližně stejné a zvýšení účinnosti je způsobeno vynecháním ztrát v převodu tepelné energie na energii elektrickou. V současné době není tento způsob příliš využíván, a to hlavně kvůli vysoké materiálové náročnosti a problematice s častou změnou teplot, kterou požívané materiály špatně snášejí.

Metoda totiž využívá pórovité struktury  $LaMnO_3$  a pevný keramický elektrolyt, který slouží k transportu kyslíkových iontů.[9][10]

Proces dosahuje čistoty vodíku až 99,9%[9] a účinnosti až 95%. [12]

## ■ 2.2 Fotolýza

Jedná se o kombinaci fotovoltaiky a elektrolýzy, při níž jsou polovodičové struktury přímo vnořeny do vodného elektrolytu. Při nasvícení daných polovodičových struktur dochází k analogickému procesu jako u elektrolýzy a voda je dělena na vodík a kyslík.

„Efektivita výroby vodíku je omezena nedokonalostmi v krystalické struktuře, povrchovými vlastnostmi fotoelektrod, odolností materiálu proti korozi. Aktuálně používané fotoelektrody mají nízkou účinnost využití fotonů, která nepřekračuje 16% přeměny sluneční energie na vodík.“[9]

## ■ 2.3 Termochemické štěpení

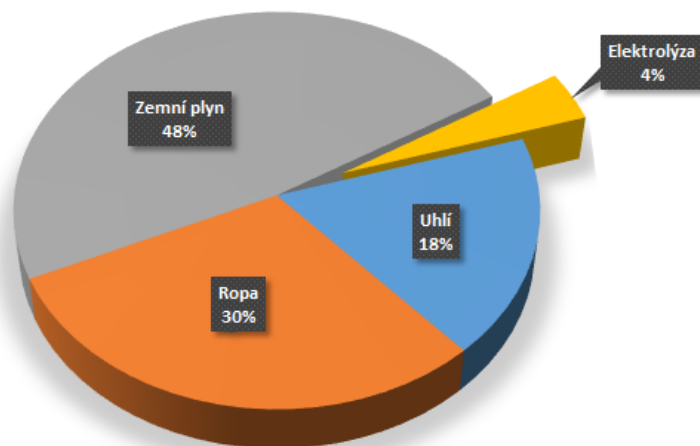
Jedná se o štěpení vody na vodík a kyslík za velmi vysokých teplot. Stejně jako u elektrolýzy výsledný produkt dosahuje vysoké čistoty a nevznikají při něm skleníkové plyny.

„Operační podmínky dosahující i 2500 °C a 7 MPa sebou přinášejí značné nároky na konstrukční materiály, které nedosahují potřebné způsobilosti ani dnes.“[9]

Stejně jako u elektrolýzy záleží na původu vstupní energie. Tento proces dává vzhledem k ekologii smysl pouze tehdy, je-li vstupní teplo dodáváno ze zdroje s nízkou nebo žádnou emisí skleníkových plynů. Smysl proto dává například propojení tohoto procesu s energií z jádra.

## 2.4 Výroba z uhlovodíkových paliv

V současné době se jedná o nejpoužívanější způsob výroby vodíku s podílem zhruba 96%[12]. Tyto procesy pracují na principu rozkládání uhlovodíkových a většinou fosilních paliv. Množství vyprodukovaných emisí oproti množství vyprodukovaného vodíku obecně odpovídá počátečnímu poměru uhlíku a vodíku v daném vstupním uhlovodíku. Vodík je dále získáván z vodní páry do procesů přidávané. Lze proto očekávat výrazně nižší emise u procesů pracujících s plynými uhlovodíky, kde je množství uhlíku oproti vodíku nižší. Dále lze pak očekávat vyšší emise například u zplyňování uhlí, kde je množství uhlíku ve vstupním palivu výrazně vyšší. Toto platí například pro černé uhlí, u něž je vytěžitelnost vodíku v poměru k vyprodukovaným emisím velmi nízká. Účinnosti těchto procesů jsou obecně vyšší než u elektrolýzy.



Obrázek 2.2: Podíl na výrobě vodíku[13]

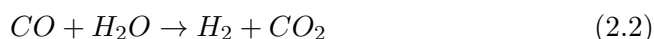
### ■ 2.4.1 Parní reformování

Jedná se o endotermickou reakci, při které po ohřátí na teplotu cca 750°C dochází k přeměně zemního plynu a vodní páry na oxid uhelnatý a vodík. Oxid uhelnatý je dále veden do tepelného výměníku, kde je ochlazen na cca 360°C a s další vodní parou přeměňován na oxid uhličitý a vodík. Proces dosahuje relativně velké účinnosti, a to až 85% vztaheno k výhřevnosti výstupního produktu.[9][14]

parní reformace:



shift reakce:



Jedná se o nejrozšířenější způsob výroby vodíku z fosilních paliv, a to hlavně kvůli nízkým nákladům. Vstupním palivem jsou plynné uhlovodíky. Nejčastějším palivem je zemní plyn, který ovšem kvůli současné situaci spojené s vojenským konfliktem na Ukrajině není tak spolehlivým zdrojem jako dříve.

Kvůli lokálnímu nedostatku tohoto paliva a nutnosti jej importovat nelze tento proces do budoucna ve výrobě vodíku považovat za jedinou variantu. Je proto nutné se, i přes značné výhody parního reformování, zaměřit na jeho dražší a více emisní alternativy.

### ■ 2.4.2 Parciální oxidace (POX)

Jedná se o hoření vstupního uhlovodíku s nedostatkem kyslíku. Při této reakci dochází k přeměně uhlovodíků na vodík pomocí částečné oxidace. Zařízení pro proces je velmi nákladné, a proces je tedy používán pouze pro výrobu vodíku ve větším množství, a to nad 50000m<sup>3</sup>/h. Vstupní surovina je zplyňována kyslíkem a vodní parou při teplotách mezi 1300 až 1500°C a tlacích 3 až 8MPa.[9][16]

Primární reakce vstupní suroviny s kyslíkem je exotermní reakcí, při které vzniká vodík, oxid uhličitý a oxid uhelnatý. Sekundární reakce vstupní suroviny s vodní parou je endotermní reakcí, která pomáhá snižovat teplotu produktů na cca 1350°C a při které vzniká větší část vodíku. Z reakce vznikají vodík a oxid uhelnatý. Získáváme plynou směs již zmíněných produktů, vodní páry, dusíku, sirných sloučenin a sazí.[9] Směs je proto nutno vyčistit a oxid uhelnatý převést na oxid uhličitý shift reakcí stejným způsobem jako při parním reformování.

Účinnost se pohybuje mezi 60 až 80%[10]

Vstupní surovinou je libovolný uhlovodíkový materiál, který lze částečně spalovat. Častým palivem bývá například těžký ropný zbytek z ropných rafinerií.

### ■ 2.4.3 Zplyňování uhlí

Je to proces, při němž po vysušení vstupního materiálu dochází k analogickému postupu jako u POX. Po zplyňování uhlí pomocí kyslíku a vodní páry jsou získané produkty obohaceny o vodík reformací oxidu uhelnatého s vodní parou obdobně jako při parní reformaci.

## 2. Výroba

---

Proces je prováděn dle technologie při teplotách od 600 do 1200°C a při tlaku okolo 2MPa. Největšího výtěžku vodíku dosahuje při použití práškového hnědého uhlí v ideálním poměru uhlíku a vodíku. Výsledným produktem je tedy syntetický plyn, který je dále pomocí parní reformace převeden na vodík. Získaný vodík lze dočistit na čistou až 95%[9]

Historicky byl tento proces používán například pro výrobu tzv. svítiplynu.

Vstupním materiálem nemusí být pouze uhlí, ale jakýkoliv pevný materiál, který má vhodnou koncentraci uhlíku a vodíku. Analogicky ke zplyňování uhlí je dnes používán například proces zplyňování biomasy, kde jako vstupní materiál slouží pevná biomasa například v podobě dřevin.

Účinnost se pohybuje mezi 40 až 80%. [10]

## ■ 2.5 Bio-procesy

Vodík je také možno získávat pomocí biologických procesů za pomoci různých bakterií, mikrobů a rostlin. Tyto procesy můžeme rozdělit dle jejich funkce na tři hlavní typy.

### ■ 2.5.1 Tmavá fermentace

Jedná se o proces, při kterém bakterie rozkládají biologický materiál na vodík a oxid uhličitý. Ideální vstupní surovinou je potravinářský odpad bohatý na sacharidy.[9]

### ■ 2.5.2 Mikrobiální elektrolytický článek

Jedná se o článek sloužící k rozkladu biologického materiálu na vodík a oxid uhličitý. Článek je sestaven ze dvou elektrod umístěných v prostředí bez přítomnosti vzdušného kyslíku, kde díky elektrické energii a mikrobům dochází k rozkladu organického materiálu. Vstupním materiálem je široká škála biologického odpadu a produkovaný vodík dosahuje vysoké čistoty, a to až 99,5%.[9]

### ■ 2.5.3 Bio-fotolýza

Je to proces, při kterém rostlina, většinou se jedná o zelené řasy, dělí vodu na vodík a kyslík. Reakci dodává energii sluneční záření. Kvůli nízké produkci způsobené malou účinností fotosyntézy, je tento proces neekonomický v porovnání s fotovoltaikou kombinovanou s elektrolýzou.

## 2.6 Shrnutí

	Výhody	Nevýhody
Alkalická elektrolýza	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nízké pořizovací náklady</li> <li>- Vysoká čistota vodíku</li> <li>- Bezemisní provoz</li> <li>- Nezávislé na importu vstupních surovin</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nízká účinnost (do 60%)</li> <li>- Elektrolyt není čistá voda</li> <li>- Pouze elektrická energie</li> <li>- Nutnost stabilního provozu</li> </ul>
PEM elektrolýza	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vysoká účinnost (až 92%)</li> <li>- Vysoké výstupní tlaky</li> <li>- Bezemisní provoz</li> <li>- Vysoká čistota vodíku</li> <li>- Nezávislé na importu vstupních surovin</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vyšší pořizovací náklady</li> <li>- Anoda z ušlechtilých kovů</li> <li>- Pouze elektrická energie</li> </ul>
Vysokoteplotní elektrolýza	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vysoká účinnost (až 95%)</li> <li>- Využití tepelné energie</li> <li>- Bezemisní provoz</li> <li>- Vysoká čistota vodíku</li> <li>- Nezávislé na importu vstupních surovin</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nedokončená technologie</li> <li>- Velká materiálová náročnost</li> <li>- Nutnost stabilního provozu</li> </ul>
Fotolýza	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nezávislé na el. energii</li> <li>- Využití OZE</li> <li>- Bezemisní provoz</li> <li>- Nezávislé na importu vstupních surovin</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Velmi nízká účinnost (16%)</li> <li>- Technologická náročnost</li> <li>- Velká plocha pro výstavbu</li> <li>- Pouze energie ze slunce</li> <li>- Problémy s korozí</li> </ul>
Termochemické štěpení	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bezemisní provoz</li> <li>- Využívá tepelnou energii</li> <li>- Nezávislé na importu vstupních surovin</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nedokončená technologie</li> <li>- Velká materiálová náročnost</li> <li>- Problémy s netěsností</li> <li>- Toxické látky</li> <li>- Velmi vysoké teploty</li> </ul>

**Tabulka 2.1:** Shrnutí výroby část první



	Výhody	Nevýhody
Parní reformování	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Velmi levné</li> <li>- Již vybudovaná infrastruktura</li> <li>- Vysoká účinnost (až 85%)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Emise oxidu uhličitého</li> <li>- Nutný import zemního plynu</li> <li>- Využívá fosilní paliva</li> </ul>
Parciální oxidace	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Možnost přechodu na biomasu</li> <li>- Vysoká účinnost (až 80%)</li> <li>- Palivo z lokálních zdrojů</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Emise oxidu uhličitého</li> <li>- Využívá fosilní paliva</li> <li>- Materiálová náročnost</li> </ul>
Zplyňování uhlí	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Možnost přechodu na biomasu</li> <li>- Vysoká účinnost (až 80%)</li> <li>- Levné</li> <li>- Palivo z lokálních zdrojů</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Emise oxidu uhličitého</li> <li>- Využívá fosilní paliva</li> <li>- Materiálová náročnost</li> <li>- Nižší čistota (do 95%)</li> </ul>
Bio-fotolýza	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nezávislé na el. energii</li> <li>- Bezemisní provoz</li> <li>- Nezávislé na importu vstupních surovin</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Velká plocha pro výstavbu</li> <li>- Pouze energie ze slunce</li> <li>- Malá produkce</li> <li>- Nízká účinnost</li> <li>- Neekonomické</li> </ul>
Ostatní bio-procesy	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vstupním palivem je biomasa</li> <li>- Využití odpadů</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Emise oxidu uhličitého</li> <li>- Omezené množství odpadů</li> </ul>

**Tabulka 2.2:** Shrnutí výroby část druhá

V současné době jsou ještě stále ekonomicky nejvýhodnější procesy, jež získávají vodík z fosilních paliv. Ty jsou ovšem vzhledem k velkému množství emisí, které se v daných procesech produkují, do budoucna nemyslitelné. Je tedy nutné myslet do budoucna a zaměřit se na nové technologie nebo na vylepšení těch starých. Kterým směrem se vydat, by mohla napomoci účinnost daných procesů, a to hlavně kvůli současnému a předpokládanému budoucímu energetickému mixu.

Dalo se předpokládat, že v blízké budoucnosti bude vodík i nadále produkován převážně pomocí parní reformace ze zemního plynu, a to hlavně kvůli nižším emisím a ceně než u ostatních procesů zpracovávajících fosilní paliva. To již bohužel dnes není tak jisté, neboť se kvůli vojenskému konfliktu na Ukrajině nelze spoléhat na dostatečnou dostupnost a nízkou cenu této suroviny.

## 2. Výroba

---

Dá se tedy předpokládat, že bude jako přechodné řešení do značné míry používán také proces zplyňování uhlí. Zde se bude nejspíš jednat o postupný přechod z uhlí na biomasu. Při využití biomasy totiž nedochází k uvolňování oxidu uhličitého uloženého ve fosilních palivech po tisíce let, ale jedná se o oxid uhličitý z let relativně nedávných.

Dále se pak bude jednat o rozvoj technologií elektrolýzy a fotolýzy, neboť v případě použití bezemisních zdrojů energie, jako jsou OZE nebo jádro, jsou tyto procesy během provozu naprosto bezemisní.

Nadějnou skupinou jsou také bio-procesy, ty jsou ovšem omezeny buď množstvím bioodpadu, který je již hojně využíván v jiných odvětvích, nebo nutností velké stavební plochy daného zařízení kvůli potřebnému slunečnímu záření a nízké účinnosti těchto procesů. Také nesmíme opomenout značnou váhu zařízení pro bio-fotolýzu kvůli nutnosti mít vodu přímo na ozařované ploše. To způsobuje, že tato zařízení nejsou vhodná pro výstavbu na střechách, pokud tomu není budova přímo uzpůsobena.

Největší naději do budoucna přináší vysokoteplotní procesy jako termochemické štěpení a vysokoteplotní elektrolýza. Ty by v kombinaci s vysokoteplotními jadernými reaktory mohly sloužit jako hromadný a účinný zdroj vodíku pro energetické a další využití. Je tedy nutno doufat, že v blízké době dojde u těchto procesů k průlomům, což se týká materiálů nutných pro jejich stabilní a rentabilní provoz.



## Kapitola 3

### Skladování

Vodík, ačkoliv se to nezdá, je kvůli svým fyzikálním vlastnostem relativně problematickou látkou na skladování. Jeho nejproblematictější vlastností je velmi malá velikost jeho molekuly  $H_2$  a hustota. Vodík má kvůli tomu tendenci unikat i při velmi malých netěsnostech spojů a také se difundovat do materiálů použitých na nádobu. Kvůli své malé hustotě zase potřebuje velmi objemné nádoby. Další problematickou vlastností je, že jeho únik a hoření jsou velmi těžko detekovatelné. Posledním problémem je jeho již zmíněná výbušnost.

Vodík je možno skladovat ve formě plynné, zkapalněné nebo jej ukládat do jiných hydridů.



### 3.1 Stlačený plyn

Jedná se o jeho nejčastější formu uskladnění. Vodík je pro snížení objemu stlačován kompresory na vysoké tlaky, a to od jednotek až po stovky barů.

### 3. Skladování

Následně je pumpován do těžké, většinou ocelové tlakové nádoby. Z té může být vodík pomocí redukčního ventilu opět vypouštěn o libovolném vhodném tlaku. Odpuštěný vodík lze následně využít. Při tomto způsobu uskladnění může docházet k degradaci nádoby difundováním vodíku do materiálu dané nádoby. V této formě je vodík také přepravován pomocí potrubí po pevnině.

Vodík uskladněný v této formě je zamýšlen i pro použití v dopravě. V automobilovém průmyslu je vodík hlavně kvůli váze nádoby skladován v nádobách z uhlíkových vláken, vystlaných hustými polymery pro zvýšení těsnosti. „Při hypotetickém uchování 4,2 kg stlačeného vodíku při tlaku 700 barů potřebujeme v automobilech nádrž, která váží okolo 135 kg.“[15]

Nesmíme opomenout, že na stlačování jakéhokoliv plynu je potřeba značné množství energie. „Pro stlačení vodíku na 350 barů je potřeba cca 15 – 20% energie v palivu.“[15]

Pro dlouhodobé uskladnění je vodík stlačován, a navíc ochlazován pro další snížení objemu a potřebného tlaku pro uskladnění v nádobě. Ta je pak většinou aktivně dochlazována na potřebnou teplotu.

## 3.2 Zkapalnění

Další formou uložení vodíku je jeho zkapalnění, které vede ke značnému zvýšení jeho hustoty, a tím i snížení objemu za nízkého tlaku, což vede ke snížení váhy potřebné nádoby. Pro zkapalnění je plyn stlačován a ochlazován tak, aby vodík i při atmosférickém nebo mírně vyšším tlaku zůstal v kapalném skupenství.

Vodík je tak po ochlazení na  $-253^{\circ}\text{C}$  ve zkapalněné formě.[17] Tato teplota je také bodem varu při tlaku 1 bar.[23]

V kapalném skupenství je možno vodík přepravovat na velké vzdálenosti. Jedná se o nejpoužívanější metodu používanou pro námořní přepravu plynů.

Zkapalněný vodík se skladuje v tepelně izolovaných nádobách, které mohou být díky vysokému podchlazení navrženy na nižší tlaky, a jsou tedy výrazně lehčí než nádoby na stlačený plyn.

Hlavním problémem této metody je, že nádobu nelze ideálně tepelně odizolovat, a dochází tak k přirozenému výparu zkapalněného plynu. Tento vypařený plyn se pak v nádobě hromadí a navyšuje tlak uvnitř nádoby. Proto je odpařený vodíkový plyn nutno po nějaké době vypouštět pro udržení bezpečného tlaku pro danou nádobu. Tímto způsobem dochází k řízenému úniku paliva, kterého se nelze zcela zbavit, ale lze jej snížit pomocí aktivního dochlazování.

„Náklady na kryogenické uskladnění jsou také vyšší, až 40% z celkové obsažené energie v palivu je spotřebováno na samotné zkapalnění.“[18]

Právě kvůli vysoké energetické náročnosti a časovým ztrátám paliva, je tento způsob uskladnění používán převážně pro velkoobjemová skladiště a mezikontinentální transport, kde jsou nevýhody vyváženy velkým množstvím uskladněného nebo převezeného paliva.

## 3.3 Hydridy

Další možností uskladnění vodíku je jeho přeměna na jiné použitelné sloučeniny. Přeměna na tyto hydridy může být i dočasná a vodík z ní může být následně získáván. Uložení do těchto sloučenin jsme schopni až několikanásobně snížit objem daného paliva.

### 3.3.1 Kovové hydridy

Jedná se o hydridy tvořené navázáním vodíku na vhodné kovy. Vodík je z těchto hydridů následně možno získat zpět ohřátím na rozkladovou teplotu.

### 3. Skladování

Proto je vhodné zvažovat hlavně kovové hydridy, které se rozkládají za relativně nízkých teplot, řekněme pod 300°C.[19]

V současnosti přicházejí v úvahu hlavně dvě tyto sloučeniny hydrid hlinitý a hydrid hořečnatý.

#### ■ Hydrid hlinitý (AlH<sub>3</sub>)

Jedná se o výbušnou sloučeninu, jež se po překročení určité teploty rozkládá na hliník a vodík.

Její hlavní výhodou oproti hydridu hořečnatému je nízká teplota rozkladu. K rozkladu dochází při teplotách nižších než 100°C.[20]

Nevýhodou je nutnost vysokých teplot a velmi vysokých tlaků v řádech až několika GPa pro získání tohoto hydridu z vodíku.

#### ■ Hydrid hořečnatý (MgH<sub>2</sub>)

U této sloučeniny v současné době dosahuje největších pokroků výzkumný institut Fraunhofer IFAM pod názvem powerpaste.

Počátečním materiálem je magnézium. To je sloučeno s vodíkem při tlacích okolo 5 až 6 barů a teplotě 350°C. K rozkladu materiálu dochází již při teplotě okolo 250°C.[21]

### ■ 3.3.2 Deriváty vodíku

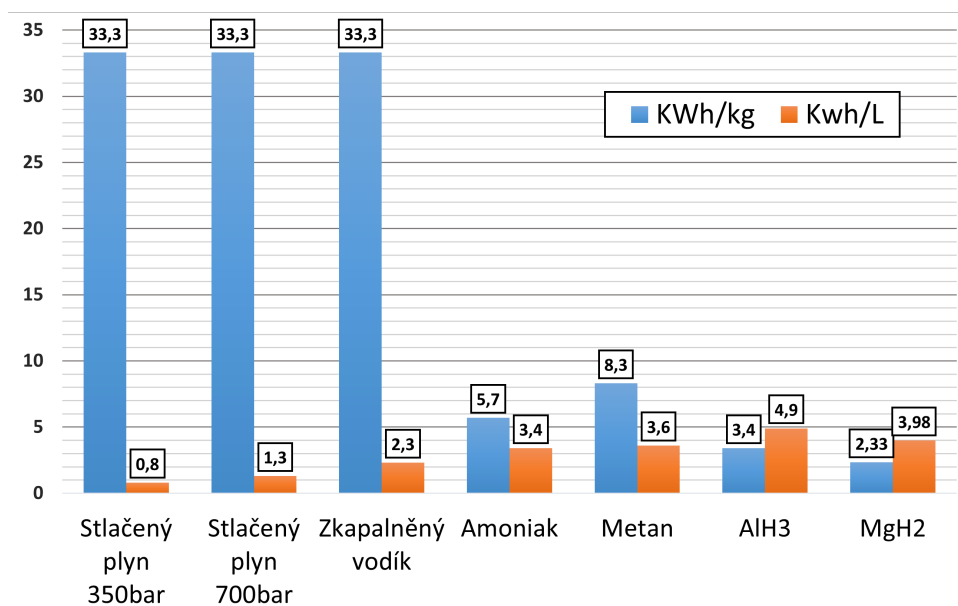
Dalšími možnými hydridy jsou sloučeniny, které v současné době vznikají z jiných chemických procesů, například při zpracovávání fosilních paliv. Přetváření vodíku do těchto jiných paliv by mohlo prodloužit životnost již postavené infrastruktury pro daná paliva. Tyto sloučeniny navíc mívají další využití, například amoniak je používán pro výrobu syntetických hnojiv.

Těmito sloučeninami jsou například metan, amoniak, methanol a různá syntetická paliva.[22]

## ■ 3.4 Speciální způsoby uložení

Se zvyšujícím se zájmem veřejnosti o ekologii se stále více organizací, včetně těch nově vznikajících, zaměřuje na vývoj bezemisních technologií. Dané nové organizace pak přichází s novými, někdy i velmi nekonvenčními způsoby uložení vodíku. V současné době jsou tyto technologie bohužel pouze ve vývoji, a je tedy velmi obtížné posoudit jejich relevantnost vůči ostatním způsobům uskladnění. Tyto technologie se pak často zakládají na vysoce porézních nanostrukturách, schopných absorbovat vodík a následně jej vydávat podobným způsobem jako u hlubinných skladišť na zemní plyn.

### 3.5 Shrnutí



**Obrázek 3.1:** Porovnání uložené energie dle způsobu uložení[20][19]

(Graf zahrnuje pouze palivo bez nádob a dalšího příslušenství)

V současnosti jsou nejvýhodnější a nejvyužívanější metody uskladnění vodíku stlačování plynu a zkapalnění. Tyto metody jsou již dnes komerčně využívány, a to i v České republice, například firmou Linde Gas.

V blízké budoucnosti by mohlo dojít i ke komerčnímu využití uskladňování vodíku pomocí kovových hydridů. Tento způsob uskladnění je díky výraznému snížení objemu paliva vhodný hlavně pro menší vozidla, jako například skútry.[21]

Přeměna vodíku na jiné použitelné sloučeniny je v tuto chvíli nerentabilní a lze předpokládat, že i v blízké době budou tyto sloučeniny i nadále produkovány z jiných, většinou fosilních zdrojů. Ve vývoji těchto metod je však nutno pokračovat, neboť poskytují možnost alternativní, teoreticky téměř



bezemisní výroby daných sloučenin a také prodlužují životnost již existující infrastruktury.

Posledním možným vývojem skladování vodíku jsou již zmíněné speciální způsoby skladování. Je možné, že v budoucnu u nich dojde k pokroku nějakého z různorodých projektů a objeví se nový využitelný způsob skladování vodíku, ať už na základě nano-struktur, nebo principu zcela jiném.





## Kapitola 4

### Případová studie

V poslední části této práce se zaměříme na možné využití časových změn ceny elektrické energie pro výrobu vodíku pomocí elektrolýzy a jeho následné využití.

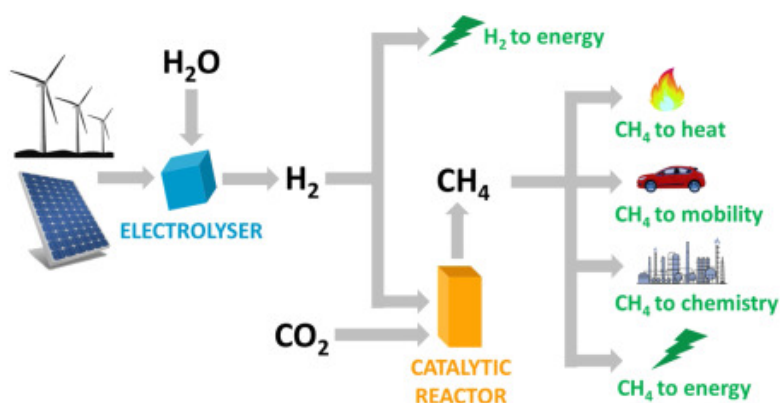
V našem případě se bude jednat o využití akumulace energie z fotovoltaického systému při nadbytku výroby elektřiny do plynu a následném zpětném převedení na elektrickou energii v době nedostatku pomocí palivových článků. Systémy pracující na tomto principu akumulace energie do plynu nazýváme Power to gas systémy (P2G).

## 4.1 Power to gas systémy

Power to gas systémy tedy slouží k ukládání energie generované většinou z OZE do plyných paliv. Veškeré ukládání této energie probíhá pomocí elektrolýzy a dalších procesů na výrobu vodíku. Vodík je tedy hlavním plyným palivem využívaným v těchto systémech. Kromě vodíku jsou uvažována i uhlovodíková paliva jako například metan.

Metan může zprvu znít nelogicky, neboť celá tato ztrátová akumulace má hlavně napomoci k odpoutání energetiky od fosilních paliv a emisí CO<sub>2</sub> v době poklesu výroby OZE. Zde se ovšem počítá s uzavřeným emisním cyklem, kde vyprodukované množství emisí CO<sub>2</sub> bude odpovídat množství CO<sub>2</sub> vloženého do paliva při přeměně vodíku na metan. Nedochozí tedy k uvolňování dalších emisí CO<sub>2</sub>, ale cirkuluje pouze jeho určité množství.

Získaná plyná paliva pak mají sloužit buď v energetice k opětovnému převedení na elektrickou energii, nebo jako zdroj tepla či jako palivo v dopravě.

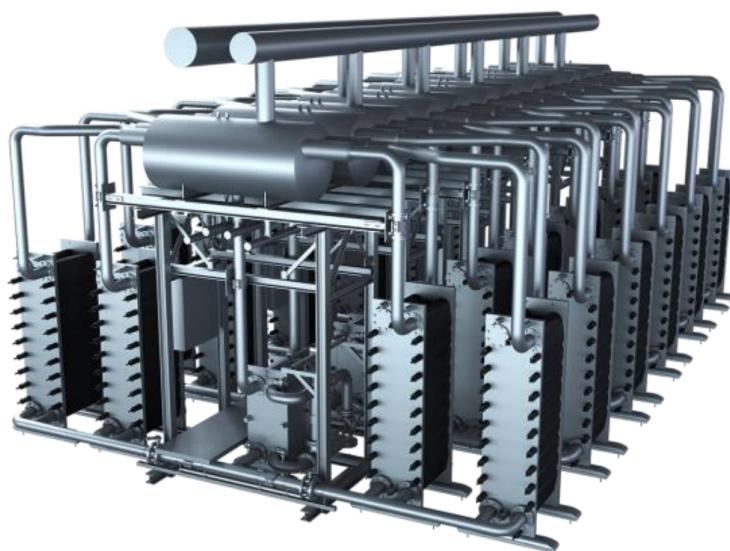


Obrázek 4.1: Koncept P2G systémů [34]

## 4.2 Zkoumaný systém

Na vstupu našeho systému je fotovoltaická elektrárna o jmenovitém výkonu 18MW. Jedná se o FV elektrárnu s fixními tenkovrstvými FV panely typu CdTe při náklonu  $39^\circ$  od horizontu a natočení  $6^\circ$  od jihu směrem na západ. Jedná se o optimální natočení FV panelů pro dané období. Simulované ztráty systému jsou 14%. Elektrárna byla simulována pro Dvůr Králové nad Labem pomocí interaktivního nástroje PVGIS.[24]

Vyrobenu energii je možno přímo prodat, nebo převést na vodík pomocí elektrolyzáru typu PEM Silyzer 300 od společnosti Siemens. Parametry tohoto zařízení jsou: minimální účinnost 75% včetně vstupního usměrňovače, transformátoru a chlazení, doba náběhu elektrolyzy pod jednu minutu, minimální zatížení pro jeden modul 20% a jmenovitý výkon 17,5 MW pro plný systém s 24 moduly. Spotřeba vody je 10 litrů na jeden kilogram H<sub>2</sub>. Výstupní tlak vodíku je přizpůsobitelný a byl pro tuto studii zvolen na 13 bar. Nominální výroba vodíku je 340kg H<sub>2</sub> za hodinu pro systém s 24 moduly.[26][27]



Obrázek 4.2: Elektrolyzér Silyzer 300 [27]

#### 4. Případová studie

Získaný vodík je pro uskladnění nutno stlačit. Pro tuto studii byl zvolen kompresor typu C3T210.3 GP od firmy Burekhardt Compression. Toto zařízení vstupní vodík o tlaku 13 bar stlačuje na tlak 150 bar, a to při výkonu 148kW. Kapacita kompresoru je 1100 nm<sup>3</sup> za hodinu.[28] To pro vodík odpovídá 98,88 kg za hodinu. Pro kompresi veškerého produkovaného vodíku při plném výkonu potřebujeme tři kompresory. Energie nutná na stlačení jednoho kilogramu vodíku pak odpovídá cca 1,5kWh.

Získaný vodík je tedy skladován při tlaku 150 bar. Nižší tlak byl zvolen jako kompromis mezi energií potřebnou ke kompresi a objemem skladovacích nádob. Na uskladnění vodíku lze využít libovolné nádoby určené pro skladování vodíku ve formě stlačeného plynu. Potřebný objem nádob vyplývá z požadované doby akumulace. Ve studii budeme počítat se skladováním bez ztrát a dochlazování. V úvahu proto přichází podzemní nebo částečně podzemní skladovací nádoby, kde je teplota celoročně udržována okolní zeminou.



**Obrázek 4.3:** Palivové články Fuji Electric [29]

Na výstupu systému je nutno vodík opět převést na elektrickou energii. K této přeměně slouží soustava palivových článků typu FP-100iH od firmy Fuji Electric o instalovaném výstupním výkonu 2MW. Jednotlivé články mají výstupní čistý výkon 100kW a účinnost generování elektrické energie 48%. Vstupním palivem je čistý vodík o čistotě 99,9% a spotřeba paliva je 74 nm<sup>3</sup> za hodinu. Tyto články lze také využít ke kogeneraci tepla. Při kogeneraci dosahuje celková účinnost 93%.[29]

Celková účinnost zkoumaného systému akumulace je rovna 34,34%. Z této účinnosti vyplývá, že k ekonomicky smysluplnému využití tohoto systému je nutné, aby cena elektrické energie při prodeji byla minimálně 2,92krát vyšší než cena v době akumulace.

Celkové investiční náklady na pořízení tohoto systému lze určit pouze obtížně, neboť jejich ceny nejsou volně dostupné a nejspíš se budou i časem značně měnit. Výsledné pořizovací náklady tedy určíme pouze odhadem.

Do pořizovací ceny nezahrneme cenu FVE, u které předpokládáme, že je již postavená. Většina ceny tak bude spočívat v nákladech na elektrolyzér a palivové články. Cena PEM elektrolyzérů se pohybuje okolo 1100-1800\$/KW.[31] To v lepším případě odpovídá při instalovaném výkonu 17,5MW ceně elektrolyzéra v hodnotě 19,27 milionů dolarů, to při aktuálním kurzu 0,91€/[\$[32] odpovídá cca 17,5 milionům euro.

Pořizovací cena palivových článků stejného typu se pohybuje okolo 3000-3500\$/KW instalovaného výkonu[33]. To pro náš systém o výstupním výkonu 2MW v lepším případě odpovídá ceně 6 milionů dolarů. To po převodu na eura činí cca 5,4 milionů euro.

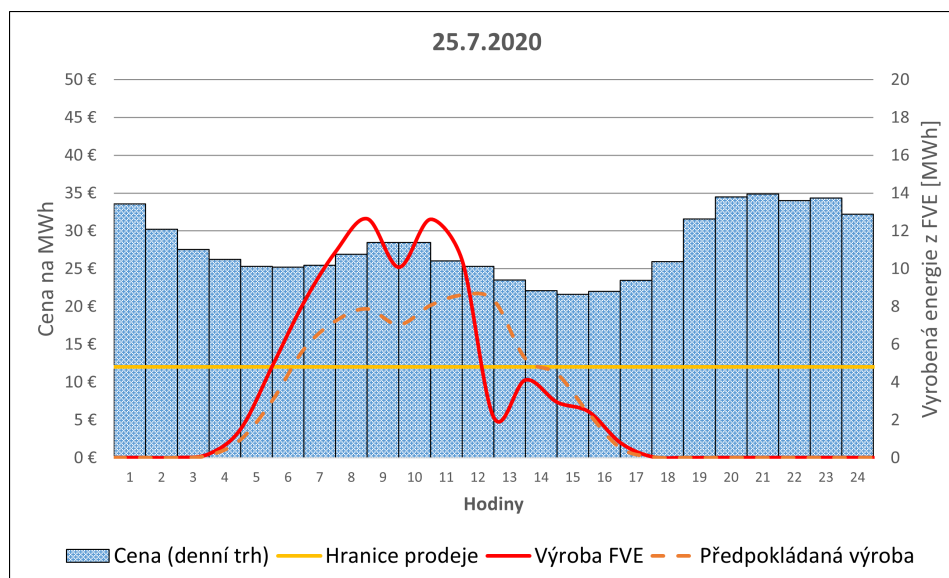
Se započtením pozemku, výstavby nádoby na uskladnění a dalších nákladů spojených s pořízením celého systému by se tak pořizovací náklady mohly pohybovat okolo 30-40 milionů euro.

### 4.3 Dny nevhodné pro akumulaci

Studie bude nadále zkoumat využití změn ceny elektrické energie v roce 2020. Tento rok byl zvolen jako poslední rok, pro který jsou volně dostupná všechna data. V tomto období se cena elektrické energie běžně pohybovala mezi 30 až 40 €/MWh, proto zvolíme jako běžnou cenu 35€/MWh. Po vydělení této ceny zjištěným koeficientem 2,9 získáváme spodní hranici prodeje, a to cca 12€/MWh.

Díky této hranici pak můžeme pomocí denního trhu jednoduše určit dny, které jsou ekonomicky vhodné pro akumulaci, a dny, které se naopak nevyplátí.

Jako příklad nevhodného dne poslouží 25.červenec 2020.



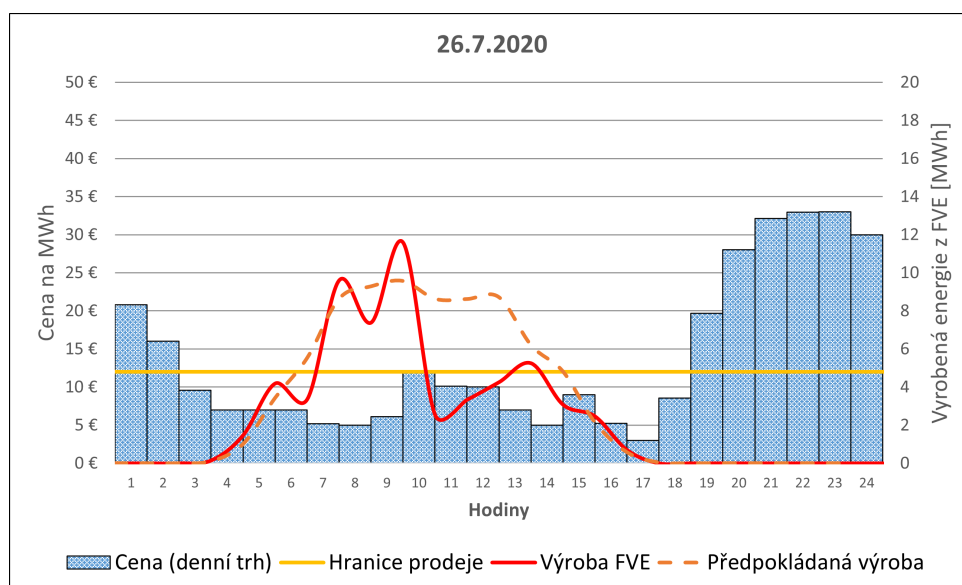
Obrázek 4.4: Nevhodný den [24] [30]

Z grafu je patrné, že během dne cena nepoklesla pod vyznačenou hranici prodeje 12€/MWh, a tak je v tento den nesmyslné akumulovat energii vyrobenou z FVE.



## 4.4 Dny vhodné pro akumulaci

Jako příklad dne vhodného pro akumulaci nám poslouží hned následující den, a to 26.července 2020.



Obrázek 4.5: Vhodný den [24] [30]

V tento den byla cena po celou dobu výroby zkoumané FVE pod hranicí prodeje, a tak je pro akumulaci zkoumaným systémem ideální. To, že je den vhodný pro celodenní akumulaci, se dalo i předpovídat dle předpokládané výroby, kterou jsme získali průměrem výroby z předchozích deseti let.

Pro porovnání si tedy vypočítáme příjem v případě, že bychom vyrobenou energii neakumulovali. Příjem z přímého prodeje činí 427,3€. Vyrobena energie je získána numerickou aproximací lichoběžníkovou metodou.

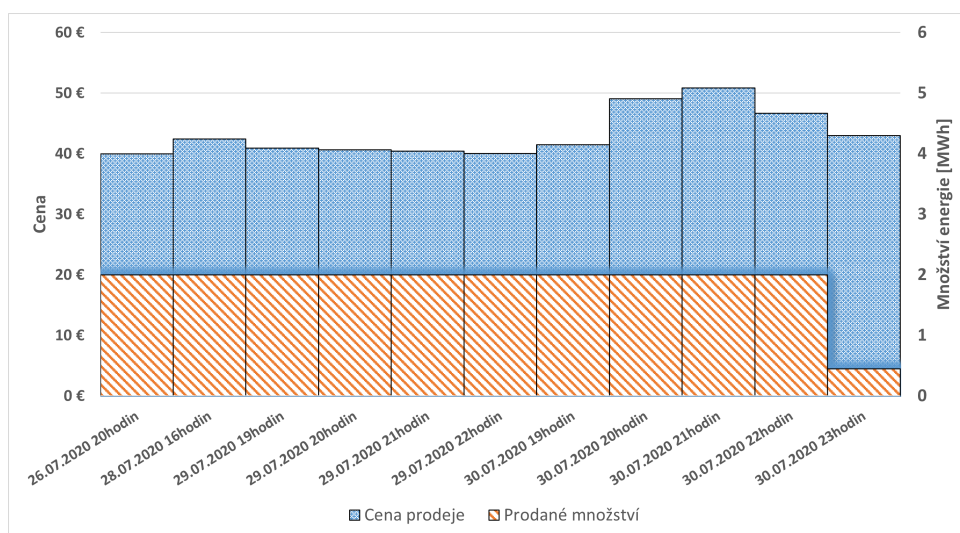
V případě akumulace je příjem až do prodeje nulový, ale uskladňujeme 59,36MWh energie. To po průchodu celým zkoumaným systémem odpovídá 20,39MWh elektrické energie připraveným k prodeji.

#### 4.4.1 Prodej

Pro zvolení prodejní hranice jsme předpokládali běžnou cenu 35€/MWh. Důvodem celé akumulace je ovšem zvýšení zisku z výroby FVE. Vzhledem k tomu, že náš systém počítá s téměř bezztrátovým skladováním, je možno skladovat dlouhodobě a vyčkat si na prodej při vyšších cenách elektrické energie.

Jako výsledná hranice pro prodej po akumulaci byla zvolena cena 40€/MWh. Ta byla odhadem zvolena jako kompromis mezi samotnou cenou a výskytem této ceny. Je totiž nutno pamatovat, že na prodej máme omezenou kapacitu palivových článků 2MW/h, což značně prodlužuje dobu samotného prodeje oproti době akumulace. Pro úspěšný prodej bez nasycení systému je tedy nutné prodávat častěji nebo navýšit instalovaný výkon palivových článků.

V následujícím grafu je vyznačeno prodané množství a cena v danou hodinu v daný den pro námi zvolenou hranici 40€.

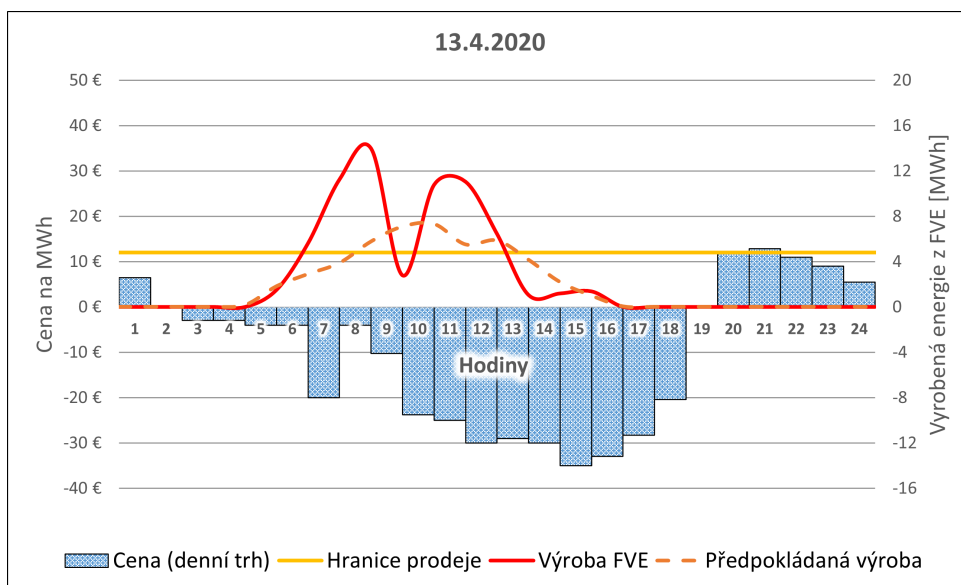


Obrázek 4.6: Vhodný den - prodej [30]

Celkový příjem z prodeje po akumulaci je 881,56€. To je více než dvojnásobný příjem oproti prodeji bez akumulace. Čistý příjem získaný akumulací tak činí 454,26€. Navíc jsme byli schopni prodat naakumulovanou energii do konce daného měsíce. Možná by tedy bylo vhodné mírné navýšení hranice 40€/MWh, neboť v tomto období se nevyskytl žádný další den vhodný pro akumulaci, a tak jsme klidně mohli s prodejem vyčkat déle.

#### 4.4.2 Svátky

Speciálním případem vhodných dnů jsou pak mezinárodní svátky, kdy většina lidí nepracuje a značná část průmyslu stojí. V tyto dny značně poklesne spotřeba a ceny za elektrickou energii značně klesnou. Jako příklad tohoto případu poslouží Velikonoční pondělí 13.dubna 2020, kde je tento jev asi nejpatrnější.

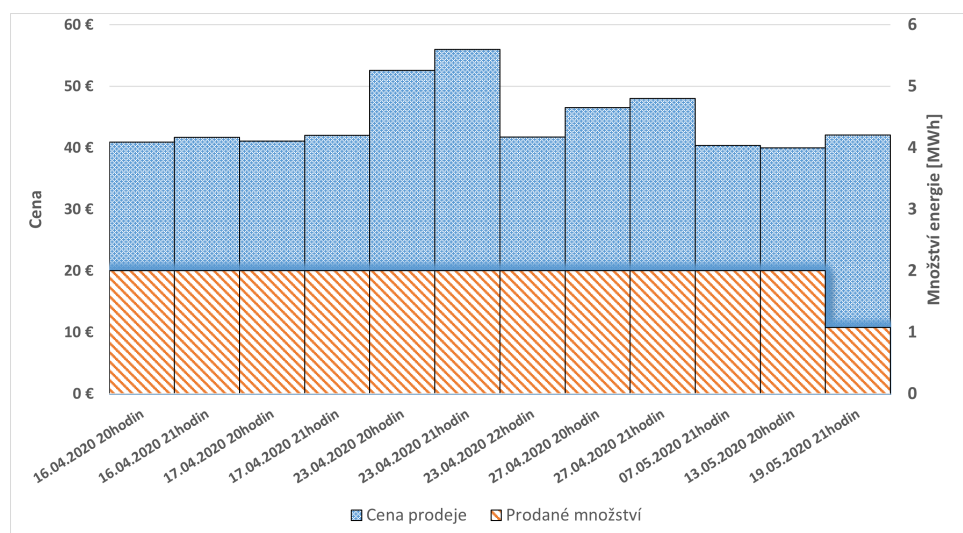


Obrázek 4.7: Velikonoční pondělí [30]

#### 4. Případová studie

V tento den byla po celou dobu výroby FVE cena elektrické energie dokonce záporná. Po poledni dosahuje její hodnota dokonce až  $-30\text{€/MWh}$ . To by nám ve výsledku při prodeji bez akumulace dalo záporný příjem  $-1227,4\text{€}$ . V tomto případě bychom zkoumanou FVE nejspíš vypnuli. To by znamenalo nulový příjem.

V případě akumulace v tento den akumulujeme  $66,98\text{MWh}$ . To odpovídá  $23\text{MWh}$  připraveným k prodeji.



**Obrázek 4.8:** Velikonoční pondělí - prodej [30]

Příjem z tohoto prodeje činí  $1024,13\text{€}$ . Samotný prodej trval déle než měsíc a v jeho průběhu se vyskytlo ještě několik vhodných dnů pro akumulaci. Oproti prvnímu případu v létě téhož roku by tu tedy bylo možné prodejní hranici  $40\text{€/MWh}$  o něco málo snížit.

### ■ 4.4.3 Dnešní situace

V současné době došlo k výraznému navýšení ceny elektrické energie, a to trojnásobně až desetinásobně oproti roku 2020. V nějaké dny se objevují i ceny nad 600€/MWh. Lze tedy počítat i s obdobným nárůstem příjmů z akumulace.

### ■ 4.4.4 Další využití

Kromě zpětného převodu na elektrickou energii se ještě nabízí několik dalších možností využití naakumulovaného vodíku.

### ■ Teplo

Jednou z těchto možností je převod vodíku na teplo. Samotný převod pouze na teplo je v současné době v podstatě nesmyslný, neboť náklady na získání samotného vodíku jsou výrazně vyšší než náklady na získání tepla z jiných zdrojů.

Využití přeměny na teplo dává tedy smysl pouze v případě, že je toto teplo vedlejším produktem, například při zpětné přeměně na elektrickou energii. Jedná se o takzvanou kogeneraci, kde je využíváno odpadní teplo z palivových článků jako zdroj tepelné energie.

Ekonomický přínos tohoto procesu pak značně závisí na ceně tepelné energie, která se značně liší v závislosti na lokalitě. My budeme dále uvažovat cenu tepelné energie ve Dvoře Králové nad Labem, kde je náš systém zkoumán. Ta se v současnosti, přesněji v roce 2022, pohybuje okolo cca 750Kč/GJ.[35] To odpovídá při aktuálním kurzu 23,6Kč/€ [36] ceně přibližně 32€/GJ, a tedy 114€/MWh. To je oproti variantě, kde převedeme vodík na elektrickou energii, kterou prodáme při cenách například nad 500€/MWh, relativně málo.

Proto využití naakumulovaného vodíku k získání tepla přichází v úvahu pouze tehdy, jedná-li se o odpadní teplo, a tedy jinak nevyužitou energii.

Například pokud vezmeme výrobu z 26.července 2020 a budeme počítat s konstantní cenou 114€/MWh tepla. Pak bude příjem získaný z kogenerace tepla při prodeji elektrické energie roven 2178,71€. Budeme-li uvažovat desetinásobný příjem získaný navíc akumulací, a to kvůli obdobnému nárůstu cen elektrické energie, příjem získaný navíc z prodeje elektrické energie z akumulace pak činí 4542,6€. Při srovnání těchto příjmů je pak jasné, že kogenerace značně napomůže navýšit příjem z akumulace.

Další výhodou je značné navýšení celkové účinnosti systému, a to z 34,34% na 66,54%.

## ■ Zelený vodík

Další možností využití naakumulovaného vodíku je jeho přímý prodej. V tomto případě můžeme zcela vynechat palivové články. Účinnost výroby stlačeného vodíku v našem systému je rovna 71,55%. To by odpovídalo v případě výroby opět z 26.července 2020 zhruba 42,6MWh energie ve vodíku. To je zhruba 1275,4kg vodíku. Při ceně vodíku pro Českou republiku 5,25-5,5€/kg[37] z roku 2020 to pak v lepším případě odpovídá příjmu z prodeje okolo 7014,57€.

V roce 2020 se tedy vyplatilo místo navracení elektrické energie zpět do sítě získaný vodík raději prodat. V současnosti značně záleží na situaci a zvolených hranicích prodeje a akumulace. Značnou roli také hraje cena palivových článků.

## 4.5 Návratnost systému

Kvůli velmi vysokým pořizovacím nákladům je návratnost vysoce nepravděpodobná. Pokud uvažujeme diskontní sazbu 5% a současné vyšší příjmy z akumulace kvůli nárůstu cen elektrické energie a předpokládáme, že jsme schopni obdobný akumulační cyklus jako ze dne 26.července 2020 provést celý alespoň jednou týdně, dostaneme se při předpokladu prodeje elektrické energie i tepla na přibližný roční příjem 350 tisíc euro. To v lepším případě, kdy uvažujeme pořizovací náklady pouze okolo 30 milionů euro, a to i při zanedbání veškerých dalších nákladů, nestačí k dosažení jakékoliv návratnosti.

Aby tedy celý systém byl rentabilní, bylo by nutné jej buď dotovat, nebo doufat, že díky nárůstu instalovaného výkonu OZE bude častěji a s větším rozdílem cen docházet ke vhodným dnům pro akumulaci. To by pak vedlo k nárůstu ročních příjmů, a mohlo by to tak dále napomoci k dosažení návratnosti.

Další možností by mohlo být využití systému k regulaci sítě. Systém je totiž schopen naběhnout do jedné minuty, a tak je vhodný pro to, aby v případě navýšení výkonu a dostatečného skladovacího prostoru sloužil jako minutová záloha sítě, a dělal tedy konkurenci přečerpávacím elektrárnám. Tato možnost by mohla být ekonomicky zajímavá do budoucna, kdy bude nutno ukládat přebytek energie z OZE, a to hlavně kvůli nedostatku lokalit vhodných pro výstavbu dalších přečerpávacích elektráren na území České republiky.







## Kapitola 5

### Závěr

V současnosti bohužel nejsme schopni vodíkem plně nahradit fosilní paliva v mobilitě a energetice. Hlavním důvodem jsou příliš vysoké pořizovací náklady na zařízení pro jeho zpracování a spalování.

Většina aktuální produkce je stále napojena na neobnovitelná fosilní paliva. Zde je hlavním hráčem parní reformování zemního plynu. Ten ovšem kvůli současné nejisté situaci a vyšší ceně zemního plynu nemůže být jedinou přechodovou surovinou pro výrobu vodíku. Je tedy nutné dále rozvíjet a vylepšovat další i více emisní zdroje, které budou sloužit po dobu přechodu na zcela bezemisní zdroje vodíku.

Jako již použitelný bezemisní zdroj může v současnosti posloužit hlavně elektrolýza. Zde dochází k největším pokrokům hlavně u elektrolýzy typu PEM. Elektrolýzéry tohoto typu jsou již i komerčně dostupné a dochází k jejich využití převážně v testovacích zařízeních na výrobu a uskladnění vodíku. Hlavní nevýhodou je ovšem velmi vysoká pořizovací cena těchto zařízení, což se projevuje i v návratnosti případové studie.

Ve skladování lze i nadále očekávat hromadné využití zkapalňování a stlačování vodíku. Nelze zde v blízké době očekávat žádný větší průlom, co se týká velkokapacitních skladišť. Jediný pokrok z tohoto hlediska představují hydridy. Ty v současnosti nejsou a v blízké budoucnosti nebudou využívány pro velkoobjemová skladiště, a to především kvůli dalšímu navýšení nákladů při jejich výrobě z vodíku. Dalším faktorem je i dostupnost těchto sloučenin z jiných většinou fosilních zdrojů. Dobrým příkladem je metan, který jsme schopni vyrábět kombinací vodíku s oxidem uhličitým. Jde o sloučeninu s největším potenciálem využití, a to hlavně kvůli existující infrastruktuře. V současné době je ale jeho výroba nesmyslná jak ekonomicky, tak i kvůli aktuální produkci vodíku ze zemního plynu.

Velký potenciál ovšem mají kovové hydridy, u nichž můžeme předpokládat využití hlavně pro menší úložiště, například v mobilitě. Ale i zde bude značně záležet na konečné ceně až dojde k jejich komerčnímu prodeji.

Samotné systémy využívající vodík pro akumulaci energie typu P2G jsou v současné době již i komerčně využívány, ale pouze v rámci testovacích provozů pro ověření principu. Jiné využití není v současné době možné, neboť hlavním zdrojem příjmů těchto systémů je využití změn ceny elektrické energie v čase, což zdaleka nedosahuje dostatečných příjmů na pokrytí veškerých nákladů, a to i při současných vysokých cenách elektrické energie. I při zanedbání všech kromě počátečních pořizovacích nákladů není systém schopný dosáhnout návratnosti, a to hlavně kvůli velmi vysoké ceně elektrolyzérů a palivových článků. Největší nadějí by mohl být budoucí nárůst využitelnosti P2G systémů díky narůstajícímu instalovanému výkonu FVE a dalších OZE. To se totiž projeví nárůstem rozdílů cen v době výroby i v době, kdy se nevyrábí, například den a noc pro FVE.

Do budoucna by vodík mohl být dobrou náhradou za tradiční fosilní paliva. Je ovšem nutné dokončit a vylepšit již existující technologie a dosáhnout snížení cen samotných zařízení pro zpracování vodíku. Také je možné, že dojde k pokroku v novějších a více účinných technologiích, což by mohlo napomoci zvýšit příjem z akumulace pomocí P2G systému. Jedná se především o vysokoteplotní procesy, kde je největším problémem to, že v současnosti dostupné materiály nevyhovují požadavkům a dlouhé životnosti daných zařízení.

# Příloha A

## Seznam zkratk a příloh

### A.1 Zkratky

Zkratka	Význam
FVE	- Fotovoltaická elektrárna
OZE	- Obnovitelné zdroje energie
POX	- Parciální oxidace
P2G	- Power to gas
PEM	- Proton-exchange membrane
FV	- Fotovoltaický

### A.2 Externí přílohy

- Výpočtový excel (Sturm\_Jan\_Bc\_prace\_case\_study.xlsx)





## Příloha B

### Literatura

- [1] Vodík jako prvek[web]:  
<https://is.muni.cz/do/sci/UChem/um/spchp/ch02s01.html> -  
15.11.2022
- [2] Nebezpečnost vodíku[web]:  
<https://www.krizport.cz/ohrozeni/nebezpecne-latky-v-jmk/vodik#nebezpecnost> - 06.01.2023
- [3] PORŠ, Zdeněk. Palivové články. ČEZ, 2002.  
Dostupné také z:  
<https://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/palivove-clanky.pdf>
- [4] Bezpečnost vodíku[web]:  
<https://www.devinn.cz/blog/bezpecnost-vodiku> - 06.01.2023
- [5] DOMINGUEZ, Ricardo; SOLANO, Javier; JACOME, Andres. Sizing of fuel cell-ultracapacitors hybrid electric vehicles based on the energy management strategy. In: *2018 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*. IEEE, 2018. str. 1-5.
- [6] PESCHKA, Walter. *Liquid hydrogen: fuel of the future*. [online] Vienna: Springer Wien, 1992. str. 36.  
Dostupné také z:

ProQuest Ebook Central, <http://ebookcentral.proquest.com/lib/techlib-ebooks/detail.action?docID=3099960>

- [7] WINTERBONE, Desmond; TURAN, Ali. *Advanced thermodynamics for engineers*, 2nd Edition. [online] Butterworth-Heinemann, 2015. str. 429-436.  
Dostupné také z:  
ProQuest Ebook Central, <https://ebookcentral.proquest.com/lib/techlib-ebooks/detail.action?docID=1948966>
- [8] WANG, Shan; LU, Aolin; ZHONG, Chuan-Jian. Hydrogen production from water electrolysis: role of catalysts. *Nano Convergence*, 2021, 8: 1-23.
- [9] HADRAVA, Jan, et al. Porovnání kvality vodíku z různých technologií výroby. *mH*, 2013, 2: 2.
- [10] RUSKAYOVÁ, P. Dvořáková; TOCHÁČKOVÁ, A.; ŠILHAN, M. Současný stav a využití vodíkových technologií. *Chemické listy*, 2021, 115.1: 32-37.
- [11] Největší vodíkové úložiště energie na světě[web]:  
<http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/clanek/nejvetsi-vodikove-uloziste-energie-na-svete-1102> - 01.12.2022
- [12] TKÁČ, Martin; STEHLÍK, Karin. Centrální výroba vodíku. *Chemické listy*, 2017, 111.2: 121-128.
- [13] JANÍK, Luděk; DOUCEK, Aleš; DLOUHÝ, Petr. Strategická výzkumná agenda rozvoje vodíkového hospodářství v ČR. *Česká vodíková technologická platforma*, 2010.
- [14] O vodíku ve zkratce[web]:  
<https://www.hytep.cz/o-vodiku/ve-zkratce> - 20.12.2022
- [15] O vodíku ve zkratce[web]:  
<https://www.hytep.cz/o-vodiku/ve-zkratce> - 04.01.2023
- [16] TUKAČ, Vratislav, HANIKA, Jiří, VESELÝ, Václav, LEDERER, Jaromír: Možnosti produkce vodíku parciální oxidací odpadní biomasy. *Biom.cz*[online], 2011.  
Dostupné z:  
<https://biom.cz/cz/odborne-clanky/moznosti-produkce-vodiku-parcialni-oxidaci-odpadni-biomasy>

- [17] Vodík[web]:  
<https://www.linde-gas.cz/cs/hydrogen/hydrogen.html> -  
 05.01.2023
- [18] Skladování vodíku[web]:  
<https://www.devinn.cz/blog/skladovani-vodiku> - 05.01.2023
- [19] REILLY, James J.; SANDROCK, Gary D. Hydrogen storage in metal hydrides. *Scientific American*, 1980, 242.2: 118-131.
- [20] GRAETZ, Jason. New approaches to hydrogen storage. *Chemical Society Reviews*, 2009, 38.1: 73-82.
- [21] Hydrogen-powered drives for e-scooters[web]:  
[https://www.ifam.fraunhofer.de/en/Press\\_Releases/Hydrogen-powered\\_drives\\_for\\_e-scooters.html](https://www.ifam.fraunhofer.de/en/Press_Releases/Hydrogen-powered_drives_for_e-scooters.html) - 05.01.2023
- [22] ŠILHAN, Martin. Vodíková strategie České republiky v kontextu chemického průmyslu. *Chemické listy*, 2021, 115.10: 543-546.
- [23] ANDERSSON, Joakim; GRÖNKVIST, Stefan. Large-scale storage of hydrogen. *International journal of hydrogen energy*, 2019, 44.23: 11901-11919.
- [24] PVGIS[web]:  
[https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/) - 21.03.2023
- [25] Baterie versus jiné zdroje energie nejen pro pohon vozidel (1. část)[web]:  
<https://oenergetice.cz/akumulace-energie/baterie-versus-jine-zdroje-energie-nejen-pohon-vozidel-1-cast>  
 - 03.04.2023
- [26] Silyzer 300 technical data[web]:  
<https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uid:abae9c1e48d6d239c06d88e565a25040ed2078dc/version:1524040818/ct-ree-18-047-db-silyzer-300-db-de-en-rz.pdf>  
 - 03.04.2023
- [27] NEB, Siemens Energy. Overview of the PEM Silyzer Family. 2020. str. 12-14.  
 dostupné z:  
[https://4echile.cl/wp-content/uploads/2020/10/20200930-SE-NEB-PEM-Electrolyzer-and-Applications\\_EW.pdf](https://4echile.cl/wp-content/uploads/2020/10/20200930-SE-NEB-PEM-Electrolyzer-and-Applications_EW.pdf)  
 - 03.04.2023

- [28] Burckhardt Compression technical data[web]:  
[https://www.burckhardtcompression.com/wp-content/uploads/2021/11/bc\\_fly\\_SHP-H2\\_210701\\_en.pdf](https://www.burckhardtcompression.com/wp-content/uploads/2021/11/bc_fly_SHP-H2_210701_en.pdf) - 03.04.2023
- [29] Fujielectric fuel cell specs[web]:  
<https://www.fujielectric.com/products/fuelcell/spec.html>  
- 03.04.2023
- [30] OTE - Denní trh[web]:  
<https://www.ote-cr.cz/cs/kratkodobe-trhy/elektrina/denni-trh>  
- 12.04.2023
- [31] IEA electrolysers[web]:  
<https://www.iea.org/reports/electrolysers>  
- 27.04.2023
- [32] kurz USD-EUR[web]:  
<https://www.kurzy.cz/kurzy-men/prevodnik-men/USD-EUR/>  
- 27.04.2023
- [33] MOTIESHIRAZI, Alimohammad; RAHIMPOUR, Mohammad Reza. Application of membranes in district energy systems. In: *Current Trends and Future Developments on (Bio-) Membranes*. Elsevier, 2020. str. 31-47.  
Dostupné z:  
<https://www.sciencedirect.com/topics/chemical-engineering/phosphoric-acid-fuel-cells>
- [34] LAZAR, Mihaela D.; MIHET, Maria; DAN, Monica. Hydrogen to methane—an important step in the power-to-gas concept. In: *Comprehensive Renewable Energy (Second Edition)*. Elsevier, 2022.
- [35] ČEZ - Cena za teplo DKnL[web]:  
[https://www.cezteplarenska.cz/file/edee/cez-teplarenska-dokumenty/ceniky-2022/cez\\_teplo\\_cenik2022\\_as\\_tepelarna-dvurkralove.pdf](https://www.cezteplarenska.cz/file/edee/cez-teplarenska-dokumenty/ceniky-2022/cez_teplo_cenik2022_as_tepelarna-dvurkralove.pdf)  
- 01.05.2023
- [36] kurz CZK-EUR[web]:  
<https://www.kurzy.cz/kurzy-men/nejlepsi-kurzy/EUR-euro/>  
- 02.05.2023



- [37] Předpoklad ceny zeleného vodíku v ČR[web]:  
[https://www.pwc.com/gx/en/industries/  
energy-utilities-resources/future-energy/  
green-hydrogen-cost.html#the-current-situation](https://www.pwc.com/gx/en/industries/energy-utilities-resources/future-energy/green-hydrogen-cost.html#the-current-situation)  
- 02.05.2023