

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Katedra elektroenergetiky
Obor: Elektrotechnika a management



Současnost a budoucnost vodíku v elektroenergetice a mobilitě

The present and future of hydrogen in electricity and mobility

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vypracoval: Petr Dobeš
Vedoucí práce: Ing. Jan Rimbala
Rok: 2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Dobeš** Jméno: **Petr** Osobní číslo: **483518**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Elektrotechnika a management**

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:

- [1] JANÍK, Luděk, Aleš DOUCEK a Petr DLOUHÝ. Strategická výzkumná agenda rozvoje vodíkového hospodářství v ČR. Česká vodíková technologická platforma. 2010.
[2] TKÁČ, Martin a Karin STEHLÍK. Centrální výroba vodíku. Chemické listy. 2017.
[3] 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: **26.01.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: _____

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2022**

Ing. Jan Rimbala
podpis vedoucí(ho) práce

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

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne 26. 1. 2021

Petr Dobeš

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat Ing. Janu Rimbalovi za příkladné vedení bakalářské práce. Dále děkuji Ing. Miroslavu Vítkovi, CSc. a doc. Dr. Ing. Janu Kynclovi za cenné rady při tvorbě práce. V neposlední řadě děkuji rodině za podporu po celou dobu mého studia.

Název práce:

Současnost a budoucnost vodíku v elektroenergetice a mobilitě

Autor: Petr Dobeš

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Obor: Elektrotechnika a management

Druh práce: Bakalářská práce

Vedoucí práce: Ing. Jan Rimbala

Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechnická, České vysoké učení technické v Praze

Konzultant: Ing. Miroslav Vítek, CSc.

Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd, Fakulta elektrotechnická, České vysoké učení technické v Praze

Abstrakt:

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou vodíkových technologií a jejich aplikací v praxi. V první části práce je zpracována rešerše současně používaných metod výroby a skladování vodíku. Využití vodíku v mobilitě je spojeno s použitím palivových článků. Součástí je rovněž porovnání jednotlivých metod a popis možného budoucího vývoje zpracování vodíku bezemisními postupy. V druhé části práce je provedena případová studie využití časových změn cen elektrické energie. Kódovým zpracováním cen je provedena kalkulace možných zisků u metod power-to-hydrogen a power-to-hydrogen-to-power. Tyto kalkulace jsou zhodnoceny ekonomickou analýzou a následným provedením citlivostních analýz v závislosti na výnosech a nákladech z produkce.

Klíčová slova:

Vodík, výroba, skladování, palivový článek, elektrolýza, časové změny cen elektrické energie

Title:

The present and future of hydrogen in electricity and mobility

Author: Petr Dobeš

Abstract:

This bachelor thesis deals with the issue of hydrogen technologies and their applications in practice. The first part of the work is describing currently used methods of hydrogen production and storage. The use of hydrogen in mobility is associated with the use of fuel cells. Thesis also includes a comparison of individual methods and a description of the possible future development of hydrogen processing by emission-free processes. The second part of the work contains a case study of the use of time changes in electricity prices. The code-processed prices are used to calculate possible profits for power-to-hydrogen and power-to-hydrogen-to-power methods. These calculations are evaluated by economic analysis and subsequent sensitivity analysis depending on production revenues and costs.

Key words:

Hydrogen, production, storage, fuel cell, electrolysis, time changes of electricity prices

Obsah

Úvod	9
1 Výroba vodíku	10
1.1 Způsoby výroby	11
1.1.1 Parní reforming	11
1.1.2 Parciální oxidace	12
1.1.3 Elektrolýza	13
1.1.4 Termochemická výroba	15
1.1.5 Zplyňování	16
1.2 Porovnání způsobů výroby	17
2 Skladování vodíku	19
2.1 Způsoby skladování	19
2.1.1 Skladování v plynném skupenství	19
2.1.2 Skladování v kapalném skupenství	21
2.1.3 Skladování v hydridech	21
2.1.4 Speciální způsoby uskladnění	23
2.2 Potenciál způsobů skladování	24
3 Palivové články	26
3.1 Typy palivových článků	27
3.1.1 Palivové články s polymerní membránou (PEMFC)	27
3.1.2 Alkalický palivový článek (AFC)	27
3.1.3 Palivové články s uhlíčitánovou taveninou (MCFC)	28
3.1.4 Palivové články s pevným elektrolytem (SOFC)	28
3.2 Účinnost palivových článků	28
4 Akumulace elektrické energie do vodíku	30
4.1 Charakteristika akumulační aparatury	30
4.2 Analýza P2H2P systému	32
4.3 Analýza P2H systému	34
Závěr	38
Seznam obrázků	39
Seznam tabulek	40

Zdroje literatury	41
Přílohy	44

Úvod

Klesající celosvětová zásoba fosilních paliv, vzrůstající produkce energií pro stabilní chod společnosti a trvale udržitelný stav životního prostředí nutí lidstvo prozkoumávat alternativní způsoby výroby, skladování a distribuce energií. Důležitým mezníkem k úspěšnému splnění stanovených závazků je vyřešení dlouhodobého skladování elektrické energie s minimálními možnými ztrátami. Jedna z disciplín obnovitelných zdrojů energie se zabývá vodíkovými technologiemi, které jsou současně minoritně zastoupeny v energetickém a automobilovém průmyslu.

Již po staletí je znám potenciál vodíku, ale větší pozornosti se dočkal až ve 20. století, kdy se začal využívat při svařování a také jako složka v redukčních činidlech. Byly provedeny nesčetné pokusy s vodíkem a s jeho využitelností jako palivo pro raketoplány. V 70. letech se začaly vyvíjet první články pro mobilní napájení elektrickou energií. Na počátku nového tisíciletí vznikají první motorová vozidla poháněná vodíkem, jejichž působnost je zaznamenána i v České republice, konkrétně v podobě prototypu vodíkového autobusu z Ústavu jaderného výzkumu v Řeži.

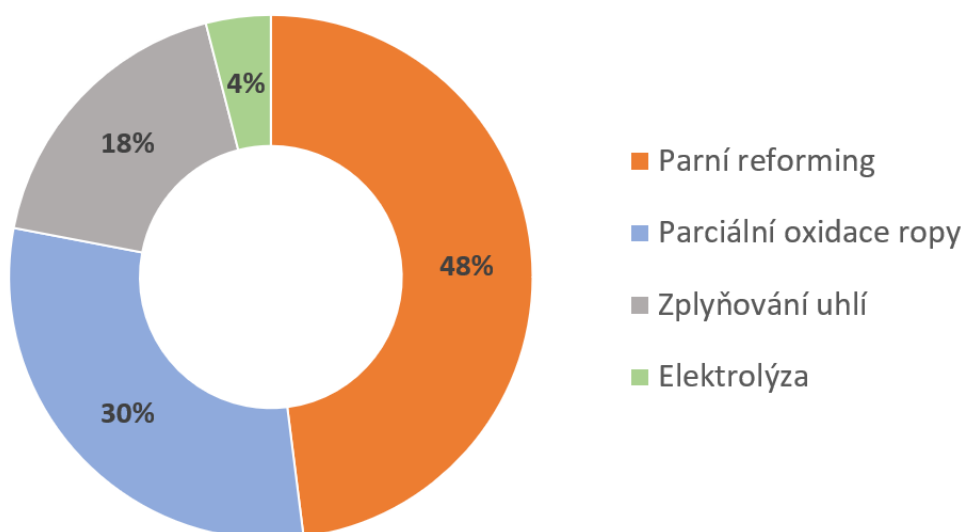
Budoucnost vodíku se ubírá do mnoha průmyslových odvětví, v nichž představuje zelenou alternativu ke spalovacím procesům, jenž negativně ovlivňují životní prostředí. Speciální pozornosti se vodík těší v zemích Evropské Unie, která je v prosazování nízkoemisní automobility a energie nejaktivnější. Důvody jsou nejen environmentální, ale i politické – Evropa je energeticky závislá na dovozu paliva ze zemí, které nejsou z politicky-strategického hlediska výhodné.

Kapitola 1

Výroba vodíku

Vodík neslouží jako zdroj energie, nýbrž jako jeho nosič. Pro účely skladování je elektrická energie nejprve přeměňována na vodík, který je následně skladován. Skladováním většího množství elektrické energie lze výrazně posílit stabilitu takové elektrické sítě, která je závislá na nepravidelných obnovitelných zdrojích elektrické energie, např. vodní a větrné. ^[1]

Vodík v elementární podobě se na Zemi v podstatě nenachází, a proto jej pro potřebné účely vyrábíme. V současnosti s ohledem na většinovou spotřebu fosilních paliv existují metody výroby vodíku, které využívají samotná paliva nebo vedlejší produkty jejich výroby. Mezi tyto metody patří parní reforming zemního plynu, zplyňování uhlí a parciální oxidace vyšších ropných uhlovodíků. Z těchto metod vzniká cca 96 % veškerého vyrobeného vodíku. Zbývá 4 % zaujímá výroba z alternativních zdrojů, z nichž nejpodstatnější je elektrolýza (alkalická, PEM, vysokoteplotní), dále zde patří i termochemické štěpení vody či zplyňování biomasy. ^{[2][3]}

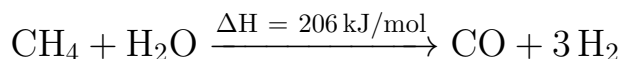


Obrázek 1.1: Procentní rozdělení celosvětové výroby vodíku

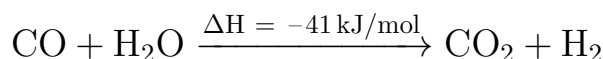
1.1 Způsoby výroby

1.1.1 Parní reforming

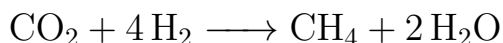
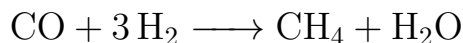
Parní reforming patří mezi nejrozšířenější a nejlevnější typy výroby, který vytváří skleníkové plyny jako vedlejší produkt. Provádí se v peci s vodní parou o teplotě 700-1000 °C, kdy se za přítomnosti katalyzátoru vnáší do pece metan. Přiváděný metan reaguje s vodní parou a vzniká vodík s oxidem uhelnatým. Daná chemická reakce je endotermní (teplo je dodáváno ze spalování zemního plynu).



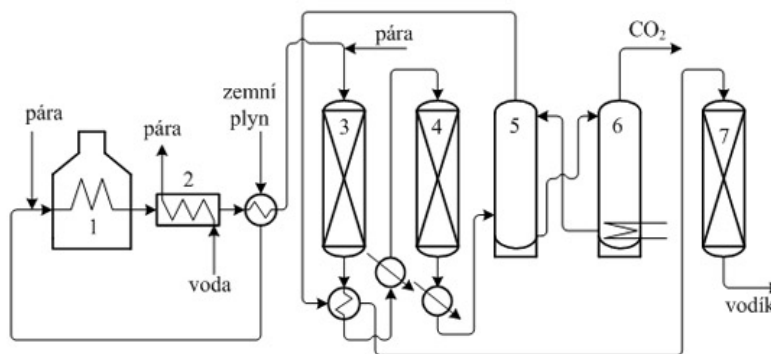
Produkty reakce prochází skrz kotel a výměník, kde vzniklý oxid uhelnatý, který se ochladí pod 400 °C, reaguje v konvertoru s přidanou parou a přeměňuje se na oxid uhličitý a vodík. Jedná se o exotermní reakci, která probíhá ve dvou krocích. V prvním vysokoteplotním kroku se pro odstranění sirných nečistot využívá katalyzátor z oxidů železa a chrómu. Následuje zvýšení teploty produktů v konvertoru na přibližných 500 °C, tím se sníží výtěžek produktů reakce, které se ochladí a odvádí do nízkoteplotního konvertoru. V tomto konvertoru dochází při teplotě cca 200 °C ke snížení CO na pár jednotek procent.



Jestliže vodík určený pro hydrogenaci obsahuje sloučeniny na bázi kyslíku, tak se musí dané sloučeniny převést zpětně na metan v metanizačním reaktoru. Přesahuje-li koncentrace kyslíkatých sloučenin 3 % obj., je potřeba danou směs aktivně chladit.



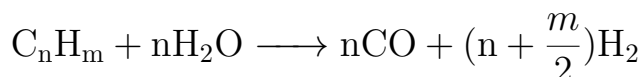
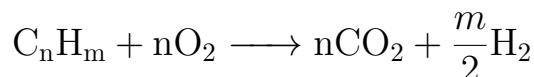
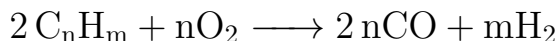
Parní reformací je vodík vyrobitelný i z jiných uhlovodíků, např. z ethanu a propanu. Ty vznikají v ropných rafinériích jako vedlejší produkt štěpných procesů. Účinnost výroby vodíku závisí na poměru páry a uhlíku ve směsi a bývá přibližně 80%. [3][4]



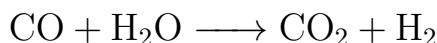
Obrázek 1.2: Schéma parního reformování zemního plynu
(1 - pec, 2 - kotel na výrobu páry, 3 - vysokoteplotní konvertor CO, 4 - nízkoteplotní konvertor CO, 5 - absorbér CO₂, 6 - desorbér CO₂, 7 - metanizér) [4]

1.1.2 Parciální oxidace

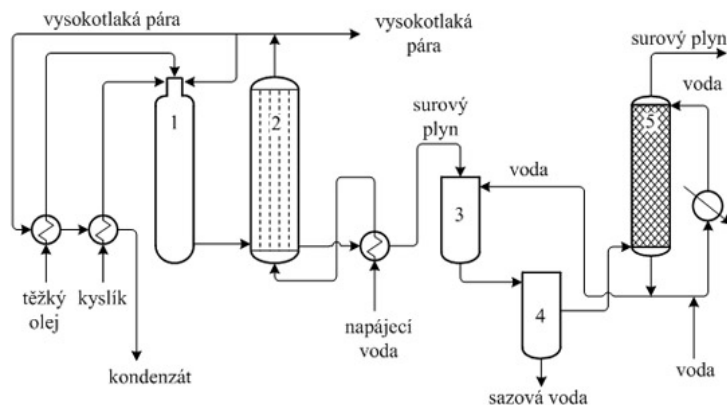
Parciální oxidace je druh reakce, při které dochází k částečnému spalování paliva se vzduchem, čímž vzniká dále použitelný plyn bohatý na vodík. Reakce mohou být exotermické (oxidace a konverzní reakce) nebo endotermické (reformování a štěpení uhlíku). Za surovinu lze využít zbytky z procesů zpracování ropy, tzv. uhlovodíkové zbytky. Při parciální oxidaci dochází ke zplyňování suroviny tvaru C_nH_m kyslíkem nebo vodní parou v teplotním rozmezí 1250-1420 °C při tlaku do 3,6 MPa.



První částí oxidace je pyrolýza, při které jsou vypařovány a disociovány těkavé složky suroviny při teplotě cca 600 °C. Následně jsou plynné těkavé složky tepelně krakovány a dochází k obsahovému snížení dehtu. Vedlejšími produkty tohoto procesu jsou saze a popel, přičemž saze lze využít k tvorbě potřebného tepla pro pyrolýzní reakci tak, že se zplyňují kyslíkem. Vytvoření rovnováhy mezi reakčními produkty zajišťuje reakce oxidu uhelnatého a vodních par. [8]



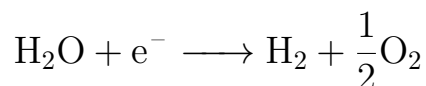
Během procesu parciální oxidace ropných frakcí se ohřátý těžký olej rozprašuje do předehřáté směsi kyslíku a vodních par. Tento plyn je veden z generátoru do kotle na výrobu vodní páry, kde se ochlazuje na teplotu cca 260 °C, přičemž vzniká pára o vysokém tlaku (až 12 MPa). Plyn se následně ochladí nástřikem vody v chladiči, zároveň je odstraněna část sazí ve vodní pračce extrakcí benzinem nebo smícháním se zplyňovaným palivem. Vypírkou CO_2 a metanizací se z plynu vylučuje kyanovodík, sulfan, oxidy CO a CO_2 aj. Tím je generovaný plyn z více jak 98 % tvořen vodíkem H_2 . [6]



Obrázek 1.3: Schéma parciální oxidace těžkých ropných olejů (1 - generátor, 2 - kotel na výrobu páry, 3 - chladič, 4 - separátor, 5 - pračka) [6]

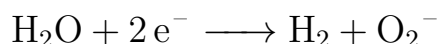
1.1.3 Elektrolýza

Elektrolýza je proces, při kterém se molekuly vody štěpí na vodíkový kationt a kyslíkatý aniont za působení stejnosměrného elektrického napětí na katodě a anodě. Elektrody jsou uloženy v elektrolytu, kterým prochází elektrický proud, přičemž kladné ionty se vážou ke katodě a záporné k anodě. Elektrolýza vody je dělena dle skupenství reagující vody na nízkoteplotní (kapalnou) a vysokoteplotní (parní) a dle typu elektrolytu (alkalický, PEM, z tuhých oxidů). Produkty elektrolýzy jsou kyslík a vodík s čistotou obvykle přes 99,9 % (čistota se udává na počet desetinných míst obsahujících číslo 9). Tyto produkty se následně chladí, zhušťují a skladují. ^{[2][8]}

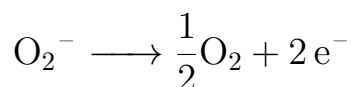


Vysokoteplotní elektrolýza

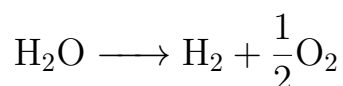
Vysokoteplotní elektrolýza, občas nazývaná jako parní elektrolýza, je determinována vstupní energií, která je zčásti tvořena elektrickou energií a zčásti teplem. Proces probíhá při teplotách od 700 do 900 °C. Elektrolytický článek je celek složený z anody, katody a elektrolytu. Na katodu je přiváděna vodní pára s nízkým obsahem vodíku (cca 10 %), zaručující redukční podmínky a ochranu materiálu katody vůči oxidaci. Elektrony na elektrodě štěpí molekuly vody a vzniká vodík s aniontem kyslíku.



Vodík a zbytek vodní páry se odlučují, kyslíkatý aniont prochází skrze vodivý elektrolyt na anodu, na níž vzniká kyslík.



Z katody vystupující směs je tvořena přibližně z 90 % vodíkem a z 10 % vodní parou.

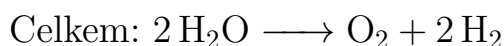
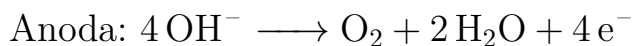


Oproti jiným typům elektrolýzy se do reakce dodává část energie ve formě tepla, neboť k rozkladu vody je potřeba velké množství tepla. Tím se zvyšuje účinnost díky snížené spotřebě elektrické energie. V neposlední řadě je výhodou užití páry, vodíku a kyslíku bez přidání chemických látek, což podstatně zvyšuje korozivzdornost článku. ^[2]

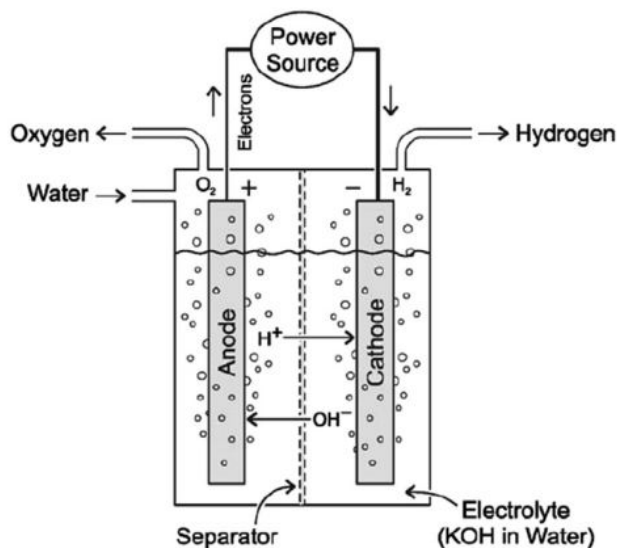
Alkalická elektrolýza

Alkalická elektrolýza vody je nejstarším a nejrozšířenějším typem elektrolýzy. Článek je tvořen dvěma oddělenými elektrodami, jenž jsou rozděleny anorganickou membránou, která separuje reakční prostředí a tím zabraňuje sloučení vytvořených plynů (ionty vody ovšem propouští). V minulosti se používala azbestová membrána, v současnosti je z bezpečnostních a environmentálních důvodů nahrazena polymerními,

keramickými či kompozitními materiály. Elektrolyt zpravidla bývá 25–30% hydroxid draselný, neboť je vodivější než voda, a tudíž je zapotřebí menší množství energie (méně používané elektrolyty jsou také NaOH a NaCl). Anoda je vytvořena čistě z niklu či z oceli s povrchovou vrstvou z niklu, katoda je vyrobena z oceli. Po připojení elektrického proudu na elektrody se na katodě vytváří vodík a na anodě kyslík. Proces elektrolýzy zpravidla probíhá při teplotě 80 °C a při napětí cca 2 V. [8]



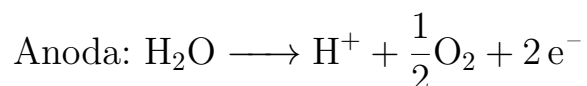
Výhodou metody alkalické elektrolýzy je dlouhodobě vyvíjená technologie, která je výrobně spolehlivá a bezpečná. Hodnota čistoty vodíku dosahuje až 99,9 % a čistota kyslíku až 99,7 %. Nevýhodou je poměrně nízká účinnost výroby a omezené možnosti zdokonalení technologie. Pokročilé alkalické elektrolýzéry pracují při teplotách až 150 °C s redukovanou spotřebou elektrické energie a bez zastaralé azbestové membrány, která snižuje účinnost. [8]

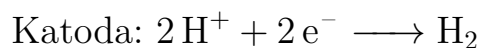


Obrázek 1.4: Schéma alkalického elektrolýzoru [8]

PEM elektrolýza

PEM elektrolýza je způsob elektrolýzy vody, při které je jako separátor použita protonově-vodivá membrána (Proton Exchange Membrane - PEM). Tato polymerní membrána propouští jenom kladně nabitě ionty, kdy na anodě vzniká kyslík, a kladné vodíkové ionty, které prochází skrze membránu ke katodě, na které se přeměňuje na vodík H₂. Elektrolýza probíhá při teplotě okolo 80 °C a tlaku do 15 barů.





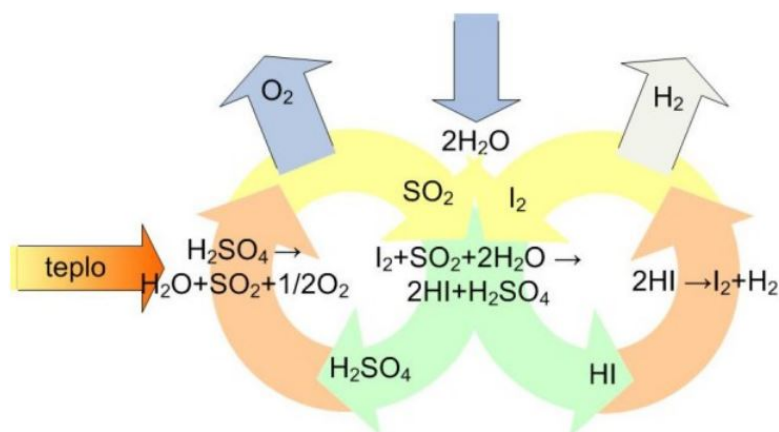
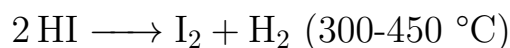
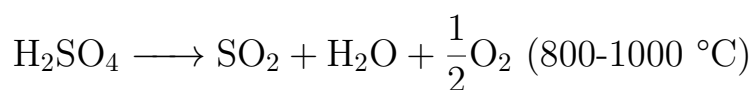
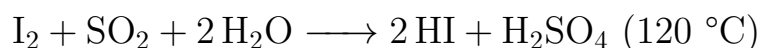
Jelikož kyselé složení elektrolyzátoru silně podporuje korozivitu, jsou elektrody pokryty platinovými kovy (např. na bázi titanu). To je hlavní nevýhodou tohoto způsobu elektrolýzy, neboť tyto nároky výrazně zvyšují cenu elektrolyzátoru. Naopak mezi výhody lze zařadit vysokou čistotu výstupního vodíku (99,99 % a vyšší), kompaktnost článku a schopnost produkovat vodík o velmi vysokém tlaku, což usnadňuje a ekonomicky zvýhodňuje jeho následný transport a skladování. [8]

1.1.4 Termochemická výroba

Termochemická výroba vodíku se nejčastěji provádí termochemickým štěpením uhlovodíku a vody. Štěpení vody lze dále rozdělit dle původu vstupního tepla na rozklad za pomoci tepla z jaderného reaktoru a za pomoci sluneční tepelné energie.

Cyklus štěpení uhlovodíku využívá zemní plyn, uhlí či tekuté uhlovodíky jako vstupní suroviny, které se štěpením přeměňují na dále zpracovatelný vodík, oxid uhličitý a uvolněné teplo. Nejrozšířenější technologií je štěpení metanu vodní párou za teploty cca 800 °C a tlaku 3 MPa.

Vysokopotenciální teplo z jaderného reaktoru je využíváno pro termochemické štěpení vody na principu termochemických cyklů. Tepelně iniciovaný rozklad vody na kyslík a vodík je řízen sérií uzavřených chemických reakcí. [11]

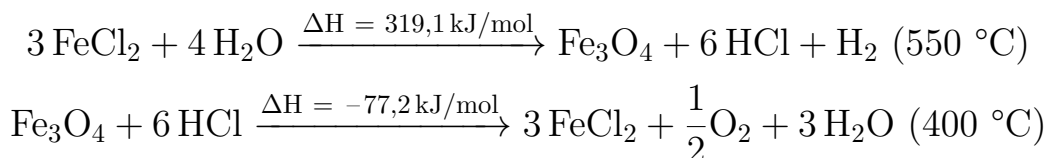


Obrázek 1.5: Siřičito-jódový termochemický cyklus [11]

V první exotermní reakci reaguje voda s jódem a oxidem siřičitým za vzniku jodovodíku a kyseliny sírové, vzniká při ní teplo o teplotě 120 °C. Druhá a třetí endotermní

reakce popisují rozklad kyseliny sírové (potřebné teplo o teplotě min. 800 °C) a rozklad jodovodíku (potřebné teplo o teplotě min. 450 °C). Výhodou je vyšší účinnost z důvodu minimálních ztrát při výrobě elektrické energie, naopak nevýhody tkví v potřebných vysokých teplotách pro průběh cyklu a v slabé chemické odolnosti materiálu vůči použitým kyselinám H₂SO₄ a HI. [11]

Technologie štěpení vody za pomoci sluneční energie funguje na principu koncentrace solární energie na kolektory, ve kterém je ohříváné médium vedeno skrze zásobník na reaktor. V reaktoru probíhají následující cyklické reakce.

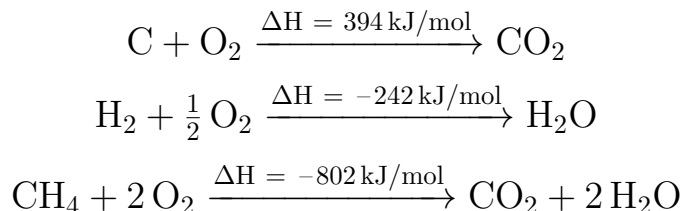


V první endotermní reakci reaguje chlorid železnatý s vodní párou za vzniku oxidu železnato-železitého a plynné směsi chlorovodíku a vodíku, která je následně oddělována zkapalněním HCl. V druhé exotermní reakci reaguje oxid železnato-železitý s chlorovodíkem a vzniká chlorid železnatý, kyslík a vodní pára.

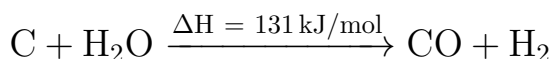
Vyrobený vodík a kyslík je následně využit k výrobě elektrické energie v palivovém článku, kdy energie vzniká spalováním kyslíku a vodíku. Částečně pak dochází k jejich slučování za vzniku vodní páry, která je v článku opětovně využita k termochemické cyklické reakci. Celková účinnost teoreticky předpokládané sluneční elektrárny je 50-55 %. [7]

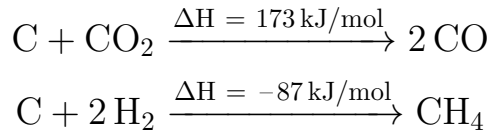
1.1.5 Zplyňování

Zplyňování je soustava několika procesů, při kterých se postupně z tuhých paliv (uhlí, biomasa ad.) stávají hořlavé plyny. To je dosaženo oxidací uhlovodíků s vodní párou, přičemž se nejprve palivo ohřeje na takovou teplotu, kdy je vázaná voda v palivu odpařována. Dále dochází k tepelnému rozkladu paliva (tzv. pyrolýza), při které vznikají produkty všech tří skupenství v závislosti na použitém palivu. Mezi tyto produkty patří např. polokoks, popel, pyrolýzní olej, oxid uhelnatý, metan či vodík. V třetím procesu zplyňování jsou produkty pyrolýzy zoxidovány kyslíkem či vzduchem, přičemž nejčastějším produktem oxidace je oxid uhličitý a voda. Z mnoha reakcí je ku příkladu níže uvedena oxidace pevného uhlíku, vodíku a metanu.

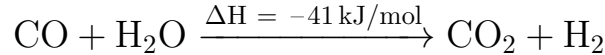


V posledním kroku vzniká redukcí vodík z vodní páry a oxid uhelnatý z oxidu uhličitého. Rovněž při redukcí může dojít k reakci uhlíku a vodíku za vzniku metanu.

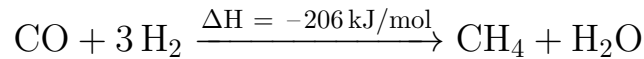




Proces zplyňování vytváří skleníkové emise a jedovatý plyn CO. Postupným čištěním reakčních směsí lze ovšem dosáhnout čistého vodíku se stopovým množstvím oxidu uhelnatého. V prvním kroku se odstraňuje oxid uhelnatý pomocí jeho konverze s vodní párou za vzniku oxidu uhličitého a vodíku.



Po tomto kroku stále zůstává cca 0,5 obj. % CO. Tento zbytek lze odstranit fyzikální adsorpcí za použití Purisolu či Selexolu, přičemž se zároveň odstraní i přebytečné sulfany v reakčních směsích. K úplnému dočištění se používá vypírání kapalným dusíkem, kdy jsou zbytky oxidu uhelnatého a uhličitého hydrogenovány na metan exotermní reakcí s vodíkem, přičemž vzniká metan a voda.



V porovnání s jinými způsoby výroby není zplyňování příliš rozšířené, především kvůli značné technologické a energetické náročnosti. S nástupem vysokoteplotních jaderných reaktorů lze ovšem využít vysoké výstupní teploty k allotermnímu zplyňování uhlí. ^{[11][28]}

1.2 Porovnání způsobů výroby

Pro masovou produkci vodíku z nefosilních zdrojů energie se plánuje využití vysokopotenciálního tepla z provozu moderní IV. generace jaderných reaktorů HTGR (high temperature gas cooled nuclear reactor), koncentračních solárních elektráren či jiných průmyslových zdrojů, jež produkují značné množství tepla. Nadějně je především spojení vysokoteplotní elektrolýzy s jadernými reaktory IV. generace, které jsou uplatnitelné nejen pro výrobu vodíku, ale i pro výrobu elektřiny či odsolování vody. Reaktor je rovněž schopen vést uzavřený palivový cyklus, který opakovaně využívá radioaktivní odpady z jaderného štěpení. ^[11]

Hlavní součástí reaktoru je tepelný výměník, do něhož vstupuje horké hélium z reaktoru a vystupuje z něj vodní pára, která dále proudí do elektrolyzéry. Co se týče účinnosti, tak je dané propojení schopno konkurovat termochemické výrobě či parní reformaci zemního plynu. ^[2]

Z tabulky 1.1 je nadmíru patrné, že výroba vodíku z fosilních paliv je technicky i ekonomicky nejefektivnější. Parní reformace je ze všech zmíněných způsobů nejlevnější, přičemž jeho cena může dosahovat hodnot nižších než \$1/kg. Cena je dána masovější produkcí a celkovou technologickou vyspělostí, z čehož plynou vysoké účinnosti metod parní reformace a parciální oxidace. Cena vodíku z elektrolýzy je dána především zdrojem elektrické energie a tepla, kterým je iniciována. Nejlevnější a zároveň nejkonkurenceschopnější metoda je elektrolýza za využití jaderné energie, naopak mezi nejméně výhodné patří fotoelektrolýza a solární elektrolýza. Termolýza

Proces	Účinnost [%]	Výhody	Nevýhody
Parní reformace	74-85	Nejvyvinutější technologie, existující infrastruktura	CO ₂ emise, závislost na zemním plynu
Parciální oxidace	60-75	Proověřená technologie, existující infrastruktura	CO ₂ emise, závislost na fosilních palivech
Elektrolýza	40-60	Bezemisní, prověřená technologie, neomezené zásoby paliva, O ₂ je jediným vedlejším produktem	Nízká účinnost, vysoké kapitálové náklady
Termolýza	20-45	Bezemisní technologie, neomezené zásoby paliva	Přítomnost toxických chemikálií, problémy s korozí, vysoké kapitálové náklady
Zplyňování	35-50	Možnost bezemisní výroby	Značná tvorba vedlejších produktů reakcí, závislost na omezeném množství paliva

Tabulka 1.1: Porovnání jednotlivých způsobů výroby vodíku
[26]

má podobné charakteristiky jako elektrolýza, avšak cena je nižší než u elektrolýzy (\$2/kg vs. \$5/kg). Zplyňování uhlí a biomasy nabízí možné uplatnění těchto paliv k výrobě čistého vodíku, ačkoliv výroba samotná je technologicky náročná a vyprodukovaný vodík je dražší v porovnání s parní reformací či parciální oxidací. Konkurenceschopnost bezemisních způsobů výroby vodíku je možno dosáhnout za podmínek, kdy jsou účinně využity jaderné reaktory IV. generace při výrobě H₂ a nadále zůstane uplatňován emisní poplatek u konvenčních výrobních postupů z fosilních paliv. [26]

Kapitola 2

Skladování vodíku

Vodík je v posledních několika letech často zmiňován v automobilovém průmyslu jako jedna z možných náhrad automobilů na fosilní paliva. Třebaže je výroba vodíku poměrně přímočará, skladování je kvůli jeho chemickým vlastnostem technologicky náročný úkon. To je dáno tím, že vodík má ze všech paliv nejnižší hustotu a bod varu (-253 °C), čemuž odpovídá nízká objemová kapacita a hustota energie. Konvenčně bývá vodík skladován v plynném či kapalném skupenství v objemných nádržích při velmi nízkých teplotách a při vysokém tlaku (v řádu stovek barů). Vzhledem k těmto extrémním skladovacím podmínkám je potřeba neopomínat bezpečnost skladování, neboť při potenciálním úniku a následném kontaktu se vzduchem může hrozit i riziko exploze. ^{[9][14]}

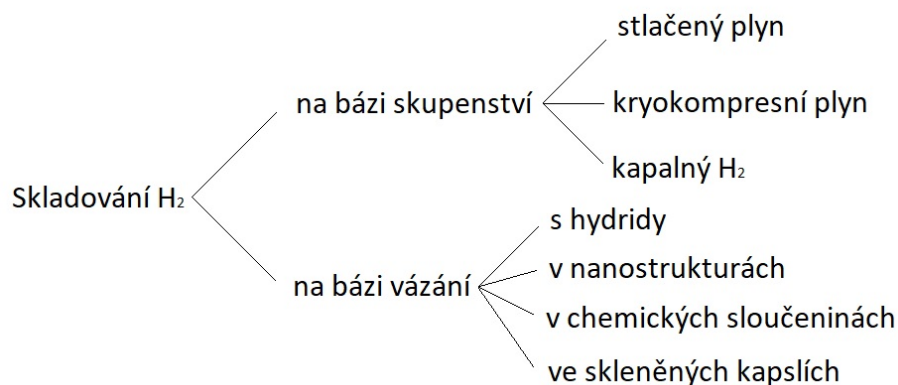
2.1 Způsoby skladování

Skladování je děleno dle aplikace a formy, ve které je vodík uchováván. Aplikačně lze skladování rozdělit na stacionární a mobilní. Stacionárně skladovaný vodík je dlouhodobě uchováván na místech jeho využití, produkce anebo provozu generování elektrické energie. V mobilních aplikacích je vodík skladován v podobě paliva pro automobily nebo v přepravních nádržích, jenž jsou využívány k transportu.

Druhý způsob dělení je založen na skupenství, v němž je vodík skladován. Čistý vodík v plynném skupenství je skladován o vysokých tlacích (100 barů a více), ve skupenství kapalném je zase uchováván při nízkých teplotách (-253 °C a méně). Vodík lze rovněž vázat s jinými sloučeninami (např. s hydridy) na principu sorpce. Výhoda vázání tkví v mírnějších požadavcích na tlak a teplotu skladovaného vodíku. V důsledku je cena nádrží nižší a jsou technologicky nenáročné. ^[9]

2.1.1 Skladování v plynném skupenství

Skladování plynného vodíku ve vysokotlakých nádržích je již léty ověřenou technologií s rozrůstající se sítí provozovatelů. Pro účinné skladování se využívá nádrž



Obrázek 2.1: Dělení skladování vodíku

na plyn a kompresor, který udržuje požadovaný tlak v nádrži. Nádrže lze situovat na zemi nebo v podzemních úložištích, které jsou vytvářeny z bývalých solných dolů či nalezišť zemního plynu. U podzemních úložišť jsou náklady na skladování nižší oproti nadzemní variantě, to je dáno nižšími nároky na výstavbu a minimální pravděpodobností úniku a následné kontaminace okolí.

Typy plynových nádrží lze dělit na 3 skupiny – plynové nádrže s tlakem lehce nad hodnotou atmosférického tlaku, sférické tlakové nádrže s maximálním možným tlakem do cca 20 barů a trubicovité nádoby s maximálním tlakem okolo 100 barů. Z hlediska velikosti tlaku a kompaktnosti je nejvýhodnější třetí jmenovaná varianta. [14]



Obrázek 2.2: Plynový tank se stlačeným vodíkem od firmy Linde [18]

2.1.2 Skladování v kapalném skupenství

Zkapalnění vodíku je obecně prováděno za účelem zvýšení hustoty energie paliva. Dosažení kapalného vodíku vyžaduje teplotu -253 °C a nižší, neboť teplota varu při tlaku 1 bar je -253 °C . Proces zkapalnění je energeticky a časově náročný, dochází při něm k 30-40% ztrátám. Z těchto důvodů je využíván především pro velkokapacitní skladování a mezikontinentální transport, kde je klíčovější vysoká hustota energie na úkor vysokých nákladů a energetických ztrát. Nádrže na kapalný vodík jsou nejčastěji dvoustěnné s vakuovou výplní. Vakuum totiž minimalizuje přestup tepla kondukcí a konvekcí z nádrže do okolí. [9]

Při skladování kapalného vodíku je nutno počítat s určitými ztrátami v důsledku odpařování, neboť dochází nejen k energetickým ztrátám při procesu zkapalnění, ale i důsledkem záměrného odpouštění vodíku pro regulaci tlaku uvnitř nádrže. Ztráty lze minimalizovat snížením přestupu tepla mezi uskladněným vodíkem a okolním prostředím, např. sférickou konstrukcí nádrže či přídatnou vakuovou vrstvou. Ztrátově vypařený vodík lze také rekuperovat při teplotě varu do přídatných tlakových láhví. [17]



Obrázek 2.3: Tanker s kapalným vodíkem od firmy Kawasaki [9]

2.1.3 Skladování v hydridech

Skladování vodíku v hydridech je postaveno na principu adsorpce a chemisorpce. Při procesu adsorpce se hromadí částice vodíku v adsorbentu za působení van der Waalových přitažlivých sil, kdežto u chemisorpce vznikají silnější chemické vazby. Adsorpce je exotermní reakce, probíhající obvykle za vysokého tlaku (10-100 barů) a mírných teplot. Jelikož při adsorpci vzniká teplo, je potřeba konstantního chlazení

skladovacího zařízení, přičemž nepoužívanější chladivo je kapalný dusík. Desorpce (uvolňování vodíku) je endotermní reakce, reverzní k adsorpci, která je provozována při nízké teplotě a za vysokého tlaku. ^[19]

Dále v textu budou pro účely porovnání efektivity adsorbování vodíku do hydridů používány 2 ukazatele – hmotnostní podíl a objemová kapacita. Hmotnostní podíl určuje poměr hmotnosti uskladněného vodíku ku hmotnosti celého skladovacího systému, vyjádřeno v procentech. Objemová kapacita definuje množství vodíku, které je v určitém objemu (nejčastěji ve tvaru $x \text{ kg H}_2/\text{m}^3$) uchováno. Ve většině případů jsou tyto 2 parametry přímo úměrné a platí, že čím vyšší hodnota, tím lepší systém pro skladování.

Kovové hydridy

Charakteristickou vlastností vodíkových vazeb u kovových hydridů je jejich silná vazba. Tyto vazby sice vyžadují více energie k desorpci vodíku, ale také umožňují skladování o vyšší hustotě při zachování mírných skladovacích podmínek. Není tudíž požadován vysoký tlak či kryogenní teplota pro stálý provoz.

Mezi potenciální hydridy, vhodné pro skladování, lze zařadit hydrid hořečnatý MgH_2 , který má vysokou skladovací kapacitu, je dostupný, ale vytváří silnou vazbu s vodíkem, kterou lze narušit při teplotách přesahujících $300 \text{ }^\circ\text{C}$.

Dále má potenciál ke skladování hydrid hlinitý AlH_3 , který má narozdíl od hydridu hořečnatého slabou vazbu a desorpce lze dosáhnout již při $100 \text{ }^\circ\text{C}$. Nevýhodou je ireverzibilita procesu, kdy je ke zpětné adsorpci nutný tlak o velmi vysokých hodnotách.

Pro potřeby skladování se v posledních letech zkoumají tzv. reaktivní kompozitní hydridy, což jsou sloučeniny borohydridů s jinými kovovými hydridy. Tyto kompozitní hydridy mají následně při desorpci nižší endotermicitu a lze je adsorbovat. ^[17]

Chemické hydridy

Chemické hydridy jsou charakteristické svou chemickou vazbou s vodíkem. Nejpodstatnějším rozdílem od kovových hydridů je jejich kapalná skupenství při pokojových podmínkách. Kapalné hydridy se snáze přepravují a skladují, jednodušší je i přestup tepla při adsorpci a desorpci. Potenciální chemické hydridy pro skladování vodíku, kupříkladu methanol, amoniak či kyselina mravenčí, jsou rozšířeny a hromadně syntetizovány ze zemního plynu. Rozšířenost, a s tím spojená infrastruktura, je společně s možností výroby chemických hydridů neemisivní elektrolýzou vody zařazena mezi nejsilnější stránky.

Methanol je nejjednodušší alifatický alkohol s hmotnostním podílem $12,5 \%$ a objemovou kapacitou $99 \text{ kg H}_2/\text{m}^3$. Methanol lze vyrobit hydrogenací oxidu uhličitého, buď reakcí s vodní parou, nebo kyslíkem při parní reformaci či při termolýze. Nejvýhodnější je výroba parní reformací, neboť při ní vznikají z jednoho molu methanolu

3 moly vodíku, namísto obvyklých 2 molů. Daná parní reformace je endotermická reakce, probíhající za teploty 230-330 °C.

Amoniak NH_3 je vhodný pro skladování díky svému vysokému hmotnostnímu podílu (17,7 %) a své objemové ($123 \text{ kg H}_2/\text{m}^3$) kapacitě. Proces syntézy, přepravy a zacházení s amoniakem je pro lidstvo již dlouho znám. Syntézy lze dosáhnout vodní elektrolýzou nebo Haber-Boschovým procesem, což je exotermický proces, probíhající při teplotách vyšších 300 °C a tlaku 200-350 barů.

Kyselina mravenčí HCOOH je nejjednodušší karboxylovou kyselinou. Oproti předchozím chemickým hydridům má sice relativně nízký hmotnostní podíl (4,4 %) a objemovou kapacitu ($53 \text{ kg H}_2/\text{m}^3$), ale velkou výhodou je možnost desorpce při pokojové teplotě. Kyselina mravenčí se produkuje mnoha způsoby: hydrolýzou methylesteru kyseliny mravenčí, produkcí kyseliny octové jako vedlejší produkt či hydrogenací oxidu uhličitého. [17]

2.1.4 Speciální způsoby uskladnění

S narůstajícím zájmem o technologie podporující trvale udržitelný rozvoj životního prostředí se vyvíjejí nové možnosti skladování vodíku, které vyžadují minimum materiálních a termodynamických vstupů pro realizaci. Tyto technologie jsou ve většině případů v určité fázi vývoje a jejich plnohodnotné nasazení je v nejbližší době nepravděpodobné.

Uhlíkaté nanostruktury mají hmotnostní podíl v rozmezí 0,4-7 %, patří mezi ně uhlíkaté nanotrubičky a vysokoporézní grafit. Uhlíkaté nanotrubičky jsou tvořeny grafitem, jenž má atomy ve tvaru šestiúhelníkové krystalové mřížky. Vrstvy grafitu následně vytváří nanotrubičky, které mají průměr do 3 nm. Pozornost výzkumu se v současné době upíná na uhlíkaté nanotrubičky s jednoduchou stěnou, jenž mají potenciál udržitelně skladovat vodík v nezanedbatelném množství (jednotky hmotnostních %). [19]

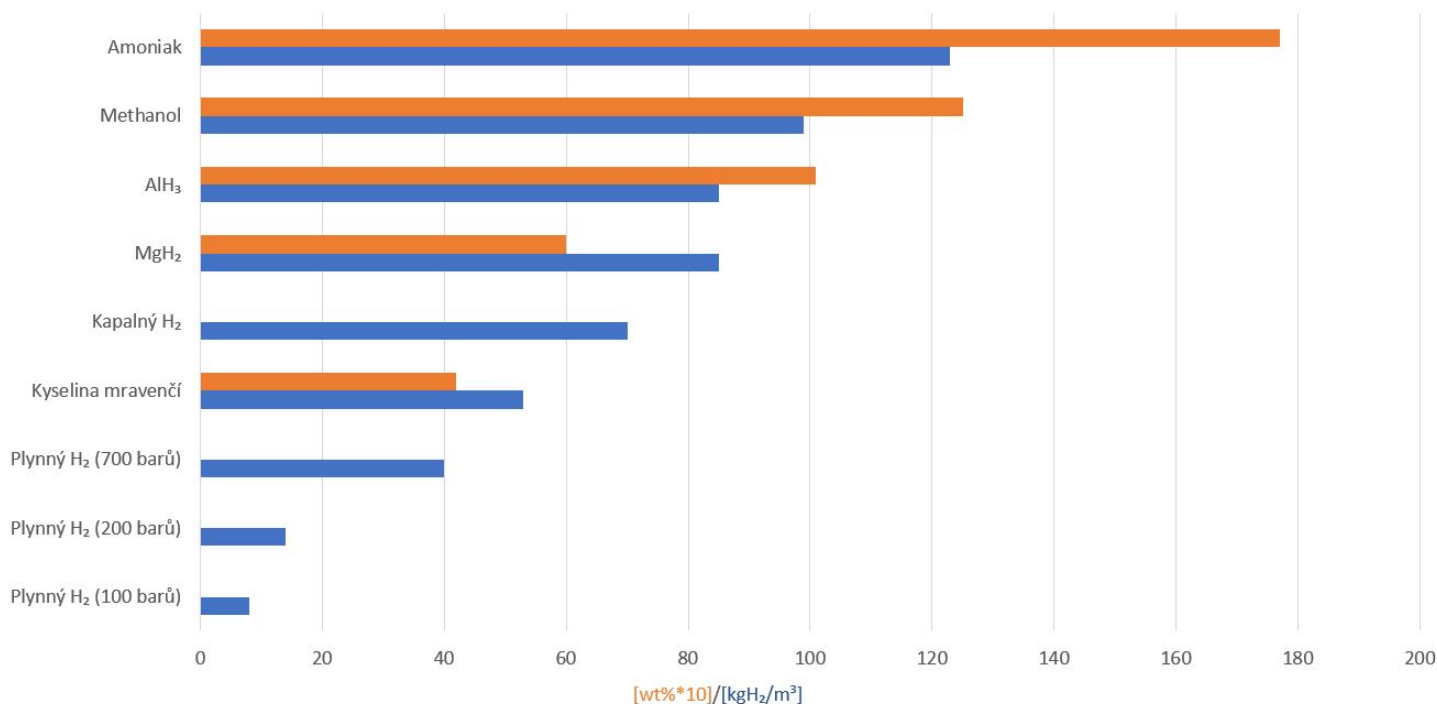
Skleněné kuličky jsou duté kuličky o rozměrech řádově desítek mikrometrů, tvořené křemičitým sklem či polyamidem. Plněny jsou plynným vodíkem (o tlaku až 100 MPa) procesem difúze skrze stěnu za zvýšené teploty a tlaku, přičemž následné uvolňování je dosahováno za stejných podmínek. Hmotnostní podíl je oproti výše zmiňovaným uhlíkatým nanostrukturám mírně vyšší (do 15 %). Technologie skleněných kuliček je momentálně zkoumána a zatím není komerčně realizována. [3]

Vodíkové tablety jsou schopny vázat větší množství vodíku v jimi obsaženém amoniaku, který se adsorbuje na mořskou sůl. Amoniak je za pomoci katalyzátoru společně s vodíkem uvolňován z tablety, kterou lze opakovaně naplnit. Při atmosférických podmínkách mají objemovou kapacitu max. $0,089 \text{ kg H}_2/\text{m}^3$. Tato technologie je v současnosti ve fázi výzkumu na Dánské technické univerzitě v Kodani. [7]

2.2 Potenciál způsobů skladování

Pro porovnání jednotlivých způsobů skladování se přihlíží k mnoha faktorům, mezi ně lze zařadit náklady na výstavbu a provoz skladovacího zařízení, požadovaný tlak, teplota u adsorpce/desorpce, hmotnostní podíl vodíku či objemová kapacita systému. Důležitá je také hustota energie, udávající výhřevnost paliva z určitého množství (např. z 1 litru).

Z níže uvedeného obrázku lze vyčíst, že plyný vodík má, i při nejvyšším pracovním tlaku 700 barů, nejnižší hodnotu objemové kapacity. Naopak nejvyšších hodnot dosahuje spolu s methanolem a amoniakem rovněž hydrid hlinitý a hořečnatý. Tyto absorbenty paradoxně obsahují ve svých objemech více vodíku než v samotné technologii skladování kapalného vodíku. Důležitá je také entalpie adsorpce a desorpce, která je v případě kovových hydridů nižší u intermetalických hydridů, naopak u komplexních hydridů a MgH_2 je hodnota entalpie vyšší.



Obrázek 2.4: Hmotnostní podíl (oranzově) a objemová (modře) kapacita vybraných způsobů skladování

[17]

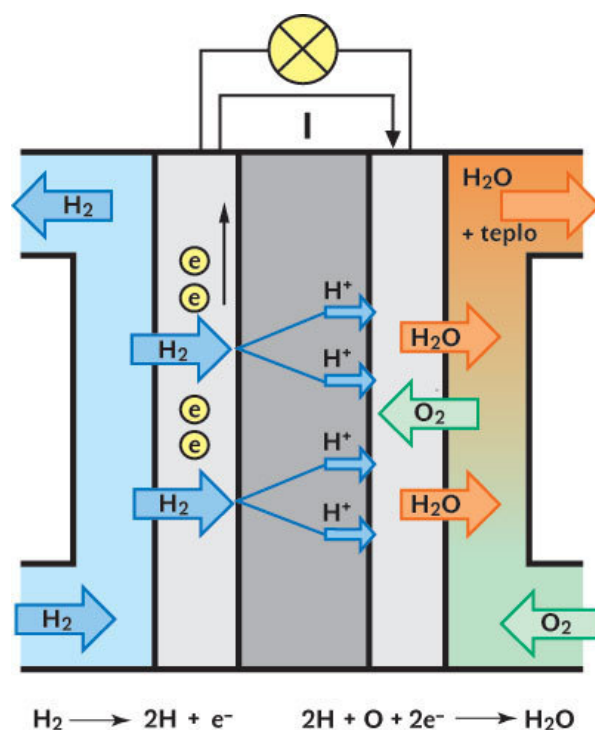
V současnosti se vodík skladuje čistě v plyné a v kapalné formě, ale v budoucnu lze očekávat změnu v podobě přechodu na hromadné skladování v hydridech. Obzvláště nadějně se v mobilních aplikacích jeví skladování v hydridech na bázi hořčíku, především kvůli jejich nízké hustotě a vysokému obsahu vodíku za mírných teplot.

Jestliže se nalezne možnost pro hromadnou produkci methanolu s amoniakem, lze je rovněž využít jako absorbenty ke skladování. Pro výrobu hydridů lze z důvodu nízké náročnosti předpokládat využití elektrochemického sycení z vodných roztoků. Bývalé solné doly skýtají potenciál pro skladování, hlavně kvůli své schopnosti izolovat skladovací systém od okolního prostředí. Důležitost výběru je dána i tím, že se od ní bude odvíjet následná výstavba vodíkové infrastruktury. ^{[3][17]}

Kapitola 3

Palivové články

Palivový článek je zařízení, které přeměňuje chemickou energii na elektrickou. Chemickou energii představuje kontinuálně přiváděné palivo, které v reakci s oxidačními činidly vytváří výstupní sloučeniny a elektrickou energii. Článek se skládá ze dvou elektrod s uhlíkovou vrstvou na povrchu, která působí jako katalyzátor, a z membrány, která odděluje elektrody. Palivo v podobě vodíku je vnášeno na anodu, kde se působením katalytické příměsi disociuje na kladné ionty a elektrony. Ionty procházejí vrstvou a elektrony jsou vnášeny do elektrického obvodu, kde se přeměňují na elektrický proud. Na katodu je přiváděn kyslík, který chemicky reaguje s vodíkovými ionty za vzniku teplé vodní páry, jež je jako odpadní látka vyváděna mimo článek. [21]



Obrázek 3.1: Schéma palivového článku s chemickými rovnicemi [20]

Účinnost palivového článku je nepřímo úměrná jeho proudovému zatížení. Platí, že nejvyšší účinnosti dosahuje při malém zatížení. Ztráty palivového článku lze rozdělit na 4 skupiny – aktivační, přechodové, ohmické a koncentrační. Aktivační ztráty jsou dány reakcí na povrchu elektrod. Přechodové určují rozsah průniku paliva a elektronů skrze nedokonalou membránu. Ohmické ztráty jsou určeny elektrickým odporem spojení (elektrolyt, elektrody) a koncentrační jsou dány nízkým obsahem reaktantů při přenosu hmoty. Ztráty rovněž vznikají utvářením větších palivových článků z jednotlivých cel, působením nečistot a procesem nabíjení a vybíjení. Z těchto důvodů se účinnost palivového článku nejčastěji pohybuje okolo 40 %, ačkoliv existují palivové články s vyšší účinností (60 % a více). Účinnost závisí především na kvalitě zpracování článku a na materiálech, z nichž byl zkonstruován. ^[22]

3.1 Typy palivových článků

3.1.1 Palivové články s polymerní membránou (PEMFC)

Tento typ palivového článku je typický oddělenými elektrodami polymerní membránou. Iontoměničová membrána na bázi fluorovaných polymerů je znamenitým vodičem kladných iontů. Voda je jedinou pracovní kapalinou v článku, a proto je PEMFC nenáchylný na korozi, kterou obvykle způsobuje elektrolyt. Článek pracuje za nízkých teplot s rychlou odezvou na změnu výkonu, a tudíž je využitelný pro pohon vozidel. Při provozu je stěžejní vysoká hydratace membrány, jež udržuje vlhkost membrány, která vytváří rovnováhu mezi množstvím produkované a odpařované vody. Hydratace membrány taktéž zajišťuje vysokou iontovou vodivost elektrolytu, z čehož následně vychází nižší elektrický odpor a vyšší účinnost článku. Z důvodu provozování článku při kapalném stavu vody a zvyšování jeho životnosti nepřesahuje pracovní teplota zpravidla 100 °C. Elektrody jsou impregnovány platinou, která slouží jako katalyzátor, neboť je dostatečně reaktivní a schopna uvolňování meziproduktů při procesu. ^{[21][23]}

3.1.2 Alkalický palivový článek (AFC)

Elektrolyt těchto článků je tvořen alkalickými kovy, konkrétněji se jedná o hydroxid sodný NaOH nebo hydroxid draselný KOH. Upřednostňovaným bývá hydroxid draselný, který je nejvodivější ze skupiny alkalických hydroxidů. Výhodami tohoto článku jsou nižší nároky na materiál katalyzátoru a vysoký výkon při použití vodíku a kyslíku. Hlavní nevýhodou je náchylnost na nečistoty paliva, neboť i malé množství CO₂ znehodnocuje elektrolyt. Palivový článek s alkalickým elektrolytem byl využíván v kosmonautice pro napájení raketoplánů. ^[23]

3.1.3 Palivové články s uhličitanovou taveninou (MCFC)

Články s elektrolytem ze směsi alkalických uhličitanů jsou charakteristické vysokou pracovní teplotou (500-700 °C). Při tak vysoké teplotě tvoří elektrolytická směs roztavenou sůl, která následně způsobuje iontovou vodivost (z tohoto důvodu není třeba katalyzátorů). Anoda je tvořena z niklu a katoda z oxidů niklu s příměsí lithia, které zajišťuje vyšší iontovou vodivost a nižší ztráty, ale také i rychlejší korozi a nižší rozpustnost plynu. Výhodou MCFC oproti nízkoteplotním typům palivových článků je možnost reformace paliva, přičemž využívá odpadní teplo a tím zvyšuje elektrickou účinnost. [23]

3.1.4 Palivové články s pevným elektrolytem (SOFC)

Články s pevným elektrolytem jsou typické provozní teplotou 800 °C a vyšší. Podobně jako u MCFC je v důsledku vysoké teploty umožněno využívat kogeneraci. Článek není omezen korozí a prostorovým uspořádáním, neboť všechny části jsou v pevném skupenství, a proto ho lze modulovat do praktických tvarů (deskový nebo tubulární). Anoda je tvořena slitinou niklu a oxidu yttritého, katoda je konstruována z LaMnO_3 a pro elektrolyt se využívají materiály na bázi zirkonu, které umožňují vyšší iontovou vodivost. Srovnatelný koeficient teplotní roztažnosti použitých částí v článku je důležitý pro bezproblémový chod, neboť při rozdílných hodnotách roztažnosti dochází k tepelnému pnutí. [21]

3.2 Účinnost palivových článků

Výkon palivového článku ve vozidle je určen jeho účinností a velikostí. Jelikož je velikost článku omezoována velikostí auta, tak je účinnost považována za hlavní ukazatel využitelnosti pro pohon vozidla. Pro stanovení účinnosti daných palivových článků je třeba určit dílčí účinnosti celého cyklu, od přeměny chemické energie paliva až po energii pro pohon vozidla. Ke ztrátám energie dochází již při těžbě ropy, kdy se při těžbě, zpracování a distribuci ztratí přibližně 17 % z původní energie ropy. Dále se značná část vytratí při výrobě vodíku, ať už se jedná o parní reforming (navazuje na těžbu ropy) nebo elektrolýzu vody, která má po započtení těžebních a výrobních ztrát účinnost v rozmezí 25-30 %. Speciálním případem je vysokoteplotní elektrolýza, která v kombinaci s jaderným reaktorem IV. generace dosahuje výrobní účinnosti cca 55-60 %. Při dovozu paliva a jeho zkapalnění či stlačení dochází k dalším ztrátám, které přesahují hranici 30 %. Do konečné účinnosti je potřeba zahrnout výše zmíněnou účinnost palivového článku, která je v rozmezí 30-40 %. [22][24]

Produkt	Těžba [%]	Výroba [%]	Logistika [%]	Kompresa [%]	Vozidlo [%]	Celkem [%]
Vodík (elektrolýza)	25-30		95	70	33-41	6-8
Vodík (reforming)	90	80	95	70	33-41	14-18
Vodík (termochemie)	-	55-60	95	70	33-41	10-14
El. baterie	-	30-35	90	90	66	18-20
Ropa	88		98	-	20-25	18-21

Tabulka 3.1: Porovnání účinností jednotlivých pohonů vozidel
[22]

Z tabulky plyne, že fosilní paliva jsou stále neúčinnější ze všech pohonů. V pořadí druhé jsou elektromobily s akumulátory el. energie a až za nimi se nachází vodíkové pohony. Faktem zůstává, že vodík není palivem, nýbrž nosičem energie. Rovněž platí, že množství energie na objemovou jednotku je mnohonásobně vyšší než u elektromobilů, přičemž vodíkový článek má nižší hmotnost. Z těchto důvodů mají vodíková vozidla i delší dojezd. Hlavní nevýhodou vodíkových vozidel zůstává slabá infrastruktura pro masovější využití. [22]

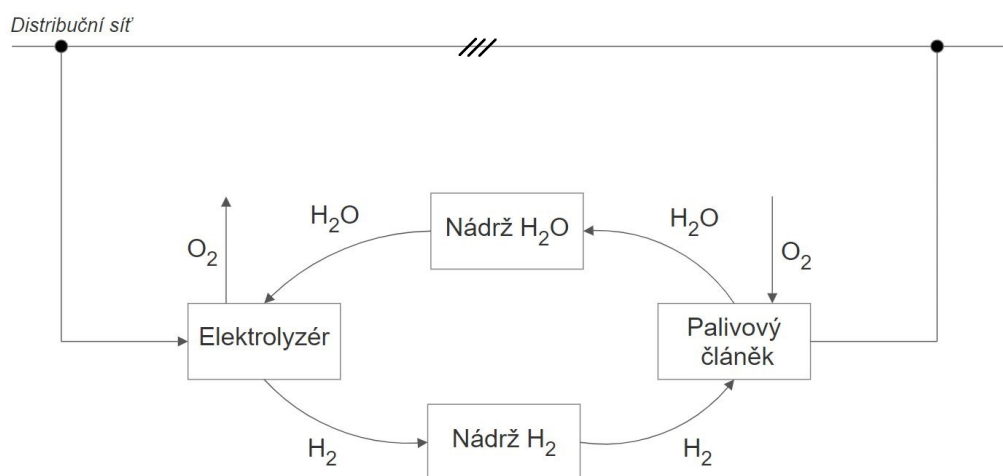
Kapitola 4

Akumulace elektrické energie do vodíku

V této části je popsána případová studie výroby vodíku při využití časových změn cen elektrické energie. Elektrická energie je akumulována při nízkých výkupních cenách do akumulačního zařízení a následně je při vyšších cenách zpět prodávána do elektrické sítě. Lze také prodávat vodík s kyslíkem jakožto produkty elektrolýzy vody. V této případové studii bude zkoumán možný prodej vodíku jako paliva či jeho využití v podobě zpětné přeměny na elektrickou energii. Potenciální výroba kyslíku z elektrolýzy bude zanedbána.

4.1 Charakteristika akumulační aparatury

Zkoumaný akumulační systém se skládá z již zmiňovaných komponent – elektrolyzér, skladovací nádrž a palivový článek.



Obrázek 4.1: Schéma power-to-hydrogen-to-power

Přiváděná elektrická energie štěpí v elektrolyzáru molekuly vody na kyslík a vodík, přičemž vodík je dále skladován v natlakovaných nádržích v plynném skupenství, nebo v jiných možných systémech skladování vodíku (viz Kapitola 2). Tento systém je využíván pro dlouhodobé uložení elektrické energie, neboť dochází k minimálním ztrátám při skladování. Pro zpětné získání elektrické energie je vodík vhnán z nádrže do palivového článku, ve kterém dochází ke sloučení vodíku a kyslíku za vzniku vodní páry, tepla a elektrické energie, která je zpátky odváděná do sítě.

Pro konkrétní ekonomickou analýzu definujeme vstupní parametry. Bude použit PEM elektrolyzáru od společnosti Plug Power, který má jmenovitý výkon 1 MW. Podle výkonu elektrolyzáru je dimenzován zbytek systému. Palivový článek vybrán od firmy Hyundai Motors, který je složen ze soustavy desíti 100 kW menších palivových článků. Z průměrné účinnosti power-to-power systému (40-50 %, bude počítáno s účinností 42 %, viz [28]) a s předpokladem, že vodík bude akumulován maximálně 12 hodin (půl dne), je kapacita skladovacího zařízení stanovena s určitou kapacitní rezervou na maximálních 13 MWh. Takové množství energie je vhodné pro skladování vodíku v plynném skupenství, uloženého v tlakové nádrži. Značnou částí provozních nákladů jsou náklady na údržbu zařízení, kde jsou zahrnuty veškeré lidské operace, jež jsou nezbytné pro chod zařízení (revize, opravy ad.).

Diskontní sazba vychází z hodnoty diskontu, s kterým ERÚ počítá při regulaci cen pro regulované energetické podniky. Míra inflace odpovídá přibližně průměru ročních měr inflace za posledních 5 let. Ze znalosti pracovních parametrů akumulačního systému lze určit jeho kapitálové a provozní náklady (viz vypočty_BP.xlsx).^[31]

Parametry a výpočet nákladů na akumulaci	
Doba životnosti	10 let
Kurz CZK/USD	21,6 CZK/USD
Kurz CZK/EUR	26,02 CZK/EUR
Celková účinnost	42 %
Denní doba akumulace	6 hod
Roční doba provozu	4 380 hod
Roční spotřeba vody	900 090 l
Měrné kapitálové výdaje elektrolyzáru	6 480 CZK/kW
Měrné kapitálové výdaje uskladnění	216 CZK/kWh
Měrné kapitálové výdaje pal. článku	5 906 CZK/kW
Celkové kapitálové výdaje	13,81 mil. CZK
Údržba, revize a další úkony	750 000 CZK
Roční výdaje za vodu	79 208 CZK
Celkové provozní náklady	0,83 mil. CZK
Daň z příjmu právnických osob	19 %
Diskontní sazba	7 %
Míra inflace	2 %
Odpisy	1,38 mil. CZK
Celkové roční náklady	2,21 mil. CZK

Tabulka 4.1: Celkové roční náklady pro šestihodinovou dobu akumulace
[29][30]

Parametry elektrolyzéry	
Výkon	1 MW
Spotřeba vody	411 l/hod
Produkce vodíku	18 kg/hod (200 Nm ³ /hod)
Doba životnosti	10 let

Tabulka 4.2: Použitý elektrolyzér

4.2 Analýza P2H2P systému

Další částí byl výpočet teoretických zisků z akumulace a následného vybíjení do sítě. K tomu posloužily vstupní hodnoty v podobě roční zprávy o trhu od OTE za rok 2020. Byl použit vážený průměr cen v jednotlivých hodinách v roce 2020 na vnitrodenním trhu (tento rok byl přestupní, tudíž měl celkem 8784 hodin). Ceny z vnitrodenního trhu byly použity z důvodu nejvyšší fluktuace cen během průměrného dne ze všech provozovaných krátkodobých trhů s elektřinou. Vyrovnávací trh nebyl uvažován, neboť jeho provoz byl ukončen ke dni 31. 1. 2020.

Za účelem výpočtu byl vytvořen jednoduchý program (viz `model_akumulace.c`), který vyhodnocuje maximální a minimální ceny elektrické energie v jednotlivých dnech roku 2020, přičemž uživatelem je zadávána doba akumulace (stejně dlouhá je i doba vybíjení) od minimální 1 hodiny až po maximálních 12 hodin. Výsledky jsou prezentovány v následující tabulce.

Doba akumulace [hod]	Zisk/ztráta z prodeje [CZK]
1	3 513
2	33 774
3	34 060
4	11 553
5	-33 071
6	-98 121
7	-181 177
8	-282 915
9	-400 812
10	-532 890
11	-679 018
12	-837 714

Tabulka 4.3: Zisky z akumulace a vybíjení elektrické energie

Dané hodnoty představují pouze rozdíl mezi prodejními cenami se započtenou účinností systému, náklady na akumulační systém nejsou započteny. Z výsledků je patrné, že nejvyššího zisku je dosaženo při 3-hodinové době akumulace a následného 3-hodinového vybíjení zpátky do sítě. Očekávaně je při vyšších hodnotách systém ztrátový, neboť je ovlivněn 42% účinností a rozdíly cen se stávají minimálními, tudíž se započtenou energetickou ztrátou se stává postupně ztrátovější. Přesné určení

hodin, kdy je cena elektřiny minimální nebo maximální, je prakticky nemožné, a tudíž je třeba daný model považovat za ideální s maximálním možným ziskem (nebo s minimálními ztrátami) pro daný počet hodin akumulace.

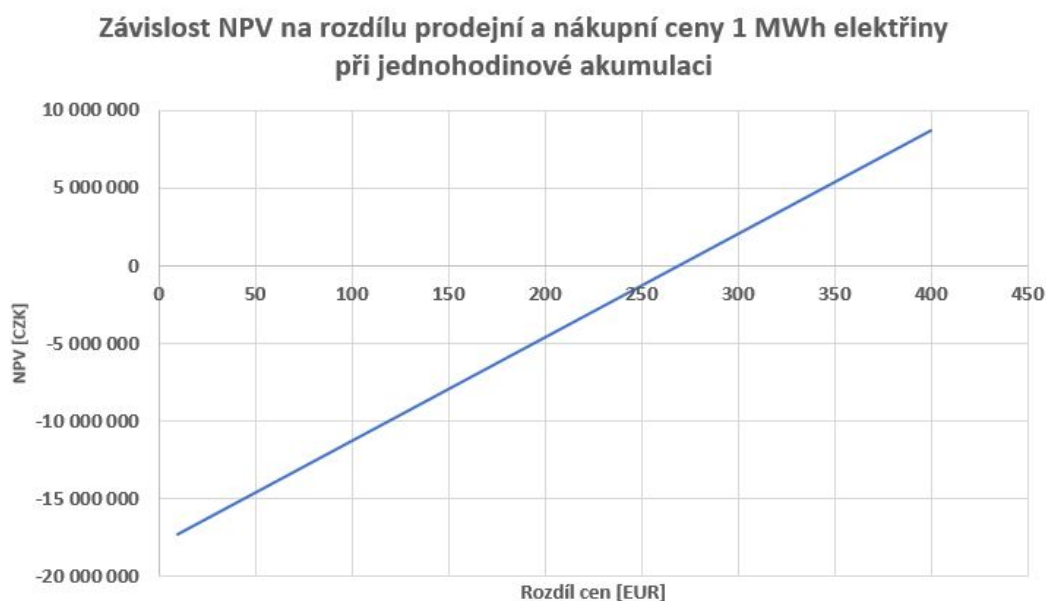
V případě ziskových dob akumulace (první 4 hodiny akumulace) má smysl výpočet čisté současné hodnoty NPV, který vyjadřuje možnou výnosnost investičního projektu.

Doba akumulace [hod]	NPV [mil. CZK]
1	-18,52
2	-18,62
3	-18,96
4	-19,48

Tabulka 4.4: Výpočet NPV u ziskových dob akumulace

Z hodnot NPV je zřetelné, že se jedná o velmi ztrátový projekt. Důvodem jsou zanedbatelné zisky oproti mnohonásobně vyšším investičním a provozním nákladům. Nejnižší ztráty jsou u hodinové akumulace, neboť náklady na skladování jsou nejnižší, čímž také klesají investiční i provozní náklady.

Pro zjištění, o jak ztrátový projekt se jedná, lze využít následující příklad. Počítejme s jednohodinovou akumulací, přičemž při prodeji 1 MWh bychom utržili 70 euro. Cílem je najít takovou částku, při které bychom pravidelně nakupovali 1 MWh elektrické energie a projekt by byl dlouhodobě ziskový. V následujícím grafu je k tomuto účelu provedena citlivostní analýza, která ukazuje závislost čisté současné hodnoty na rozdílu mezi prodejní a nákupní cenou 1 MWh. Rozdíly cen jsou pro lepší názornost a zjednodušení výpočtu uvedeny v eurech.



Obrázek 4.2: Citlivostní analýza za použití rozdílu cen

Z grafu vyplývá, že projekt je teoreticky ziskový, jestliže by nákupní cena 1 MWh elektrické energie byla -200 EUR a nižší (rozdíl je počítán od 70 EUR). Taková hodnota je samozřejmě nedosažitelná, neboť záporné ceny elektřiny jsou spíše výjimkou, ke které když dojde, tak dosahují maximálně pár desítek euro za MWh. Tímto je z ekonomického hlediska realizace projektu velmi ztrátová.

Další možností provozu této akumulární jednotky je skladování elektrické energie ve formě metanu, též známo pod názvem "power-to-methane" (P2M). Při tomto procesu je prostřednictvím Sabatierovy reakce vodík slučován s oxidem uhličitým při vysoké teplotě a tlaku. Metan je následně spalován za vzniku elektřiny. Výhodou použití metanu jsou nižší náklady na skladování, neboť technologie skladování zemního plynu je velmi rozvinutá a nákladově dostupná. Hlavní nevýhodou metody P2M je nízká účinnost přeměny, kdy je výroba metanu Sabatierovou reakcí zatížena 10% ztrátou a celkový proces přeměny elektřiny na plyn a následně zpátky na elektřinu je přibližně o 5 % méně účinný než v případě skladování vodíku. ^[27]

4.3 Analýza P2H systému

Časové změny cen elektrické energie lze efektivněji využít pro čistý prodej vodíku, bez zpětné konverze na elektřinu. Tato metoda je nadějnější, neboť účinnost je dána pouze účinností elektrolyzéry, která činí 84 %. Hlavní změnou oproti předchozí variantě je snížení nákladů o palivový článek, který v tomto případě není potřeba. Naopak do nákladů je nyní nutno započítat výdaje za elektřinu, neboť v P2H je pouze spotřebovávána. V tabulce 4.5 jsou dány vstupní parametry pro ekonomické zhodnocení P2H systému.

Pro výpočet částek za nákup elektřiny byly opět použity ceny elektrické energie na vnitrodenním trhu za rok 2020. Princip výpočtu je založen na podobné teorii jako u P2H2P systému, kdy za pomoci programu jsou ceny v každém dni seřazeny od nejnižší po nejvyšší a následně je proveden součet za celý rok pro uživatelem zadanou dobu provozu systému (viz `vypocet_nakladu_elektrina.c`). Z tohoto důvodu je cena za elektřinu při jednohodinovém provozu nejnižší možná, neboť se jedná o součet nejnižších cen elektřiny za jednotlivé dny. Se zvyšující se dobou provozu se částka za elektřinu neúměrně zvyšuje, což v konečném důsledku znevýhodňuje ty systémy, které fungují po většinu dne (náklady za elektřinu jsou vyšší, NPV je následně nižší). V tabulce 4.6 jsou znázorněny vybrané denní doby provozu, pro kompletní tabulku viz `vypocty_BP.xlsx`.

K posouzení projektu byla opět použita čistá současná hodnota (NPV), která u všech denních dob provozu vychází záporná. Důvody jsou podobné jako u P2H2P varianty, kdy kapitálové a měrné provozní náklady jsou neúměrně velké oproti možným výnosům z prodeje vodíku. Nejméně ztrátová je varianta jednohodinové denní produkce, neboť náklady na skladování a výdaje za elektřinu jsou v tomto případě nejnižší. V tabulce 4.7 je zřetelný trend postupného snižování NPV v závislosti na době provozu, celodenní doba provozu je ze všech možností nejvíce ztrátová (v příloze `vypocty_BP.xlsx` je kompletní tabulka).

Parametry a výpočet nákladů na výrobu vodíku	
Doba životnosti	10 let
Kurz CZK/USD	21,6 CZK/USD
Kurz CZK/EUR	26,02 CZK/EUR
Celková účinnost	84 %
Denní doba výroby	1 hod
Roční doba výroby	365 hod
Roční spotřeba vody	150 015 l
Cena vodíku	32,4 CZK/kg
Ročně vyrobeno vodíku	6 570 kg
Výnosy z výroby vodíku	0,18 mil. CZK
Měrné kapitálové výdaje elektrolyzéro	6 480 CZK/kW
Měrné kapitálové výdaje uskladnění	216 CZK/kWh
Celkové kapitálové výdaje	6,72 mil. CZK
Údržba, revize a další úkony	500 000 CZK
Roční výdaje za vodu	13 201 CZK
Roční výdaje za elektřinu	109 414 CZK
Celkové provozní náklady	0,62 mil. CZK
Daň z příjmu právnických osob	19 %
Diskontní sazba	7 %
Míra inflace	2 %
Odpisy	0,67 mil. CZK
Celkové roční náklady	1,29 mil. CZK

Tabulka 4.5: Celkové roční náklady pro jednohodinovou výrobu vodíku [29]

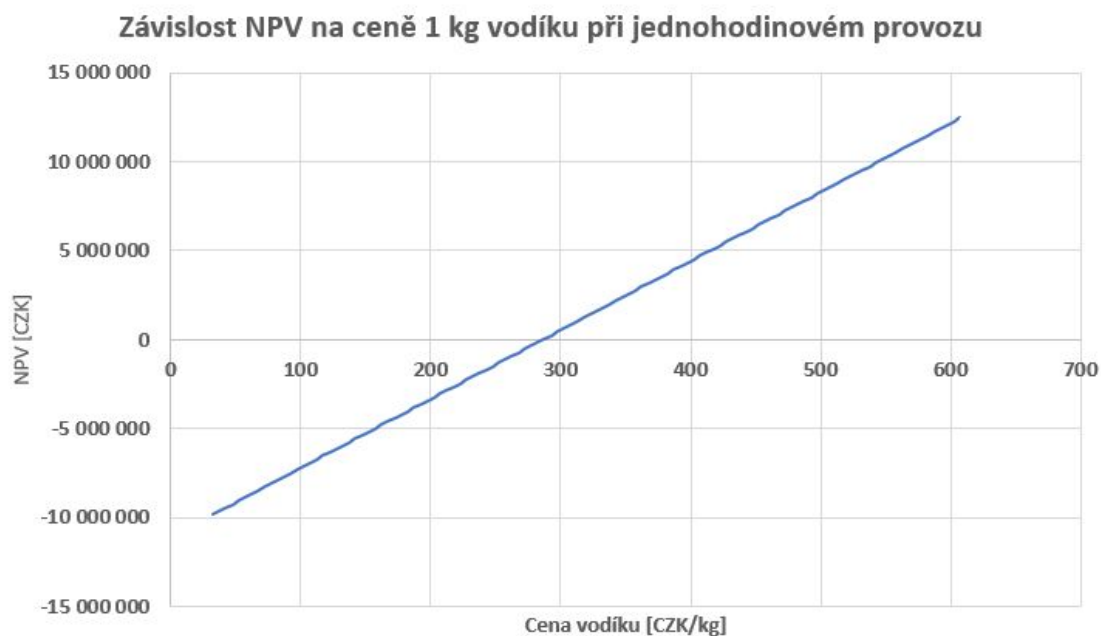
Doba provozu [hod]	Částka za nákup elektřiny [CZK]
1	109 414
6	1 019 203
12	2 548 035
18	4 427 251
24	6 620 243

Tabulka 4.6: Částky za elektřinu při vybraných denních dobách provozu

Doba provozu [hod]	NPV [CZK]
1	-10 160 927
6	-11 983 195
12	-17 561 098
18	-25 857 509
24	-36 588 376

Tabulka 4.7: Výpočet NPV pro vybrané denní doby provozu

V této části případové studie bylo počítáno s 1,4 USD/kg H₂. Ceny vodíku se však liší od způsobu jejich výroby a např. zelený vodík může dosahovat ceny až 8 USD/kg H₂. Jelikož cena vodíku přímo určuje výnosy, tak byla provedena citlivostní analýza za účelem zjištění ceny vodíku, při které přechází NPV do kladných hodnot.

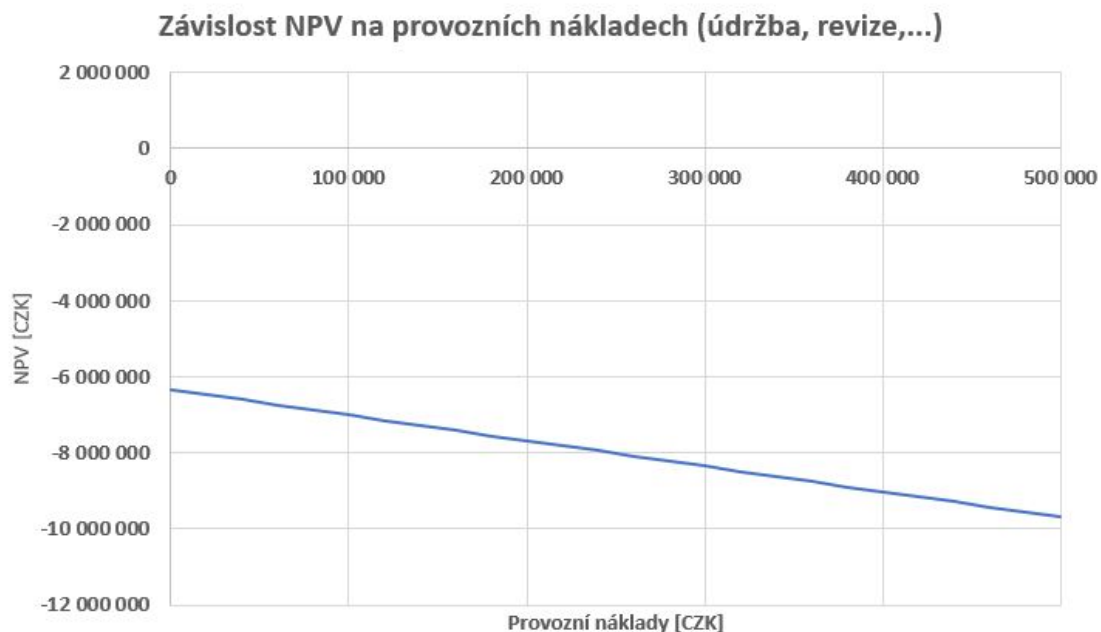


Obrázek 4.3: Citlivostní analýza za použití změn ceny vodíku

P2H systém s jednohodinovou denní dobou provozu by dosáhl kladného NPV, jestliže by cena vodíku za kg byla minimálně 285 CZK (13,2 USD). Za takovou cenu je v dnešní době vodík stěží prodejný. Uvedená cena ovšem není tak rozdílná od ceny za zelený vodík (7-8 USD/kg H₂), který je vyráběn z obnovitelných zdrojů, stejně jako v našem případě.

Ke zvýšení ekonomické efektivity projektu je potřeba snížit dlouhodobé kapitálové nebo krátkodobé provozní náklady. Nejvariabilnější z těchto nákladů jsou náklady za údržbu, opravy, revizi a jiné provozní náklady, související s lidskými úkony, které umožňují trvalý chod zařízení. Tyto náklady byly v kalkulaci odhadnuty na půl milionu CZK. Při nižším objemu skladovaného vodíku lze ovšem očekávat nižší provozní náklady.

Na obrázku 4.4 lze pozorovat postupné zvyšování hodnoty NPV při snižování provozních nákladů. Při nulových nákladech je sice NPV stále v záporných hodnotách, ale čistá současná hodnota se postupně zvýšila o více než 3 milióny korun.



Obrázek 4.4: Citlivostní analýza za použití změn provozních nákladů

Za úvahy, kdy jsou provozní náklady nulové, by se cena za kilogram vyrobeného vodíku snížila na přibližných 9 USD (195 CZK). Tato částka je stále vysoká pro konkurenceschopnost na trhu, ale při dalším snížení nákladů (např. za skladování) by se cena mohla stát konkurenceschopnější.

U tohoto projektu lze očekávat postupné zvýšení možné výnosnosti v následujících letech. Jedním z důvodů je neustále klesající cena vodíkových technologií, které jsou vyráběny ve větším rozsahu. Dalším impulsem mohou být státní dotace do čisté energie, kdy se část výdajů pokryje z dotací a tím se zvýší i ekonomické parametry. V neposlední řadě lze očekávat vyšší výkyvy v cenách elektrické energie, neboť v současnosti je záměr vyrábět elektřinu z OZE v maximální možné míře. S tím jsou spojeny značné výkyvy ve vyráběném množství elektřiny, což se s velkou pravděpodobností bude projevovat na konečných cenách, které budou více nahrávat zařízením na akumulaci či přeměnu elektrické energie.

Závěr

Výroba je počátečním krokem k využití vodíku. Způsob, kterým se vodík vyrábí, je důležitý z hlediska čistoty vodíku při jeho konečném využití. Hlavními typy výroby jsou parní reformace a parciální oxidace, jenž spolu tvoří drtivou většinu vyrobeného vodíku. V malé míře je vodík vyráběn z nízkoemisní elektrolýzy vody, které je přikládán důraz k jejímu rozšíření na úkor výroby z vedlejších produktů zpracování ropy. Do budoucna se plánuje zvýšení bezemisní výroby metodou vysokoteplotní elektrolýzy za využití tepla z jaderných reaktorů IV. generace.

Skladování je důležitým krokem mezi výrobou a užitím vodíku. Cílem je skladovat vodík s co nejmenšími ztrátami při nejvyšší možné skladovací hustotě v systémech, které mají nízké provozní náklady. V současnosti je vodík skladován nejčastěji v plyném a kapalném skupenství v natlakovaných izolovaných nádržích. Rozdíl mezi nimi spočívá v hustotě uskladněného vodíku a v nákladech na provoz, přičemž kapalný vodík v obou případech dosahuje vyšších hodnot. Předmětem výzkumu se stává vazební skladování vodíku na principu adsorpce do hydridů. Tento způsob má v určitých případech potenciál být dlouhodobě účinný a nákladově nenáročný.

Důležitým pilířem využití vodíku je jeho chemická přeměna na elektrickou energii. K tomu se využívají spalovací motory a palivové články. Z hlediska minimalizace provozních emisí jsou častěji využívány palivové články, především ty s polymerní membránou (PEMFC), které nachází uplatnění v mobilitě. Vodíková mobilita se stává jedním z možných způsobů budoucí mobility, avšak podobně jako v případě elektromobility jsou provozní náklady příliš vysoké v porovnání s pohony na fosilní paliva. Současně disponuje vodíková mobilita dostatečnou infrastrukturou pro početnější využití jen v pár státech na Zemi.

Ve finální části práce je zkoumáno možné využití časových změn cen elektrické energie pro výrobu vodíku nebo pro akumulaci elektrické energie do vodíku. V případě akumulace se prokázalo, že skladování elektriny do vodíku je sice technologicky proveditelné, ale také ekonomicky ztrátové a neúčinné. Hlavními problémy jsou především vysoké kapitálové výdaje a nízká účinnost procesu. Podstatně výhodnější možností se jeví výroba vodíku s krátkodobým uskladněním. Účinnost zařízení není zatížena ztrátami palivového článku a kapitálové výdaje jsou sníženy o palivový článek. Zjistilo se, že je výhodnější vyrábět vodík v menším množství, neboť kapitálové a provozní náklady s narůstajícím množstvím produkce rostou rychleji než výnosy z vodíku. Ačkoliv je tato metoda rovněž ztrátová, tak má potenciál stát se výnosnou za podmínky minimalizace provozních nákladů a za vysoké výkupní ceny vyrobeného vodíku.

Seznam obrázků

1.1	Procentní rozdělení celosvětové výroby vodíku	10
1.2	Schéma parního reformování zemního plynu	11
1.3	Schéma parciální oxidace těžkých ropných olejů	12
1.4	Schéma alkalického elektrolyzéry	14
1.5	Siřičito-jódový termochemický cyklus	15
2.1	Dělení skladování vodíku	20
2.2	Plynový tank se stlačeným vodíkem od firmy Linde	20
2.3	Tanker s kapalným vodíkem od firmy Kawasaki	21
2.4	Hmotnostní podíl (oranžově) a objemová (modře) kapacita vybraných způsobů skladování	24
3.1	Schéma palivového článku s chemickými rovnicemi	26
4.1	Schéma power-to-hydrogen-to-power	30
4.2	Citlivostní analýza za použití rozdílu cen	33
4.3	Citlivostní analýza za použití změn ceny vodíku	36
4.4	Citlivostní analýza za použití změn provozních nákladů	37

Seznam tabulek

1.1	Porovnání jednotlivých způsobů výroby vodíku	18
3.1	Porovnání účinností jednotlivých pohonů vozidel	29
4.1	Celkové roční náklady pro šestihodinovou dobu akumulace	31
4.2	Použitý elektrolyzér	32
4.3	Zisky z akumulace a vybíjení elektrické energie	32
4.4	Výpočet NPV u ziskových dob akumulace	33
4.5	Celkové roční náklady pro jednohodinovou výrobu vodíku	35
4.6	Částky za elektřinu při vybraných denních dobách provozu	35
4.7	Výpočet NPV pro vybrané denní doby provozu	35

Literatura

- [1] *Vodík: vlastnosti, výroba a využití* [online]. Citováno 20. 10. 2020. VŠCHT. Dostupné z WWW: <<https://web.vscht.cz/~nadhernl/projektIV/vodik.html>>
- [2] TKÁČ, Martin a Karin STEHLÍK. *Centrální výroba vodíku*. Chemické listy. 2017, roč. 111, č. 2, s. 121-128
- [3] JANÍK, Luděk, Aleš DOUCEK a Petr DLOUHÝ. *Strategická výzkumná agenda rozvoje vodíkového hospodářství v ČR*. Česká vodíková technologická platforma. 2010
- [4] *Výroba vodíku parním reformováním* [online]. Citováno 29. 9. 2020. petroleum.cz. Dostupné z WWW: <<http://www.petroleum.cz/zpracovani/zpracovani-ropy-43.aspx>>
- [5] TUKAČ, Vratislav aj. *Možnosti produkce vodíku parciální oxidací odpadní biomasy*. CHEMagazín. 2009, roč. 19, č. 3, s. 8
- [6] *Výroba vodíku parním reformováním* [online]. Citováno 30. 9. 2020. petroleum.cz. Dostupné z WWW: <<http://www.petroleum.cz/zpracovani/zpracovani-ropy-43.aspx>>
- [7] ŠVÁB, Michal. *Trendy ve vývoji vodíkového hospodářství ve světě a možnosti uplatnění v České republice*. Česká energetická agentura, 2006
- [8] BHANDARI, Ramchandra, Clemens A. TRUDEWIND and Petra ZAPP. *Life cycle assessment of hydrogen production via electrolysis – a review*. Journal of Cleaner Production. 2014, vol. 85, issue 2014, p. 151 - 156
- [9] MORADI, Ramin and Katrina M. GROTH. *Hydrogen storage and delivery: Review of the state of the art technologies and risk and reliability analysis*. International Journal of Hydrogen Energy. 2019, vol. 44, issue 23, p. 12255-12266
- [10] KASAI, Shigeo. *Hydrogen electrical energy storage by high-temperature steam electrolysis for next-millennium energy security*. International Journal of Hydrogen Energy. 2014, vol. 39, issue 36, p. 21358-21370
- [11] DOUCEK, Aleš, Daniel TENKRÁT a Petr DLOUHÝ. *Vodíkové hospodářství a možnosti využití vodíku k regulaci obnovitelných zdrojů energie*. Paliva. 2011, roč. 2011, č. 3, s. 1-7

- [12] *Hydrogen Production* [online]. Citováno 27. 9. 2020. Hydrogen Europe. Dostupné z WWW: <<https://www.hydrogeneurope.eu/hydrogen-production-0byproduct>>
- [13] DAWOOD, Furat, Martin ANDA and G. M. SHAFIULLAH. *Hydrogen production for energy: An overview*. International Journal of Hydrogen Energy. 2020, vol. 45, issue 7, p. 3847-3869
- [14] DURBIN, D. J. and Cecile MALARDIER-JUGROOT. *Review of hydrogen storage techniques for on board vehicle applications*. International Journal of Hydrogen Energy. 2013, vol. 38, issue 34, p. 14595 - 14617
- [15] *Hydrogen Storage* [online]. Citováno 6. 10. 2020. Hydrogen Europe. Dostupné z WWW: <<https://www.hydrogeneurope.eu/hydrogen-storage>>
- [16] DLOUHÝ, Petr a Luděk JANÍK. *Skladování vodíku I* [online]. Citováno 6. 10. 2020. HYTEP. Dostupné z WWW: <<https://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/transport-a-skladovani-vodiku/618-skladovani-vodiku-i>>
- [17] ANDERSSON, Joakim and Stefan GRÖNKVIST. *Large-scale storage of hydrogen*. International Journal of Hydrogen Energy. 2019, vol. 44, issue 23, p. 11901-11919
- [18] *Powered by hydrogen* [online]. Citováno 8. 10. 2020. Linde Engineering. Dostupné z WWW: <<https://www.linde-engineering.com/en/about-linde-engineering/success-stories/h2-mobility>>
- [19] DLOUHÝ, Petr a Luděk JANÍK. *Skladování vodíku II* [online]. Citováno 13. 10. 2020. HYTEP. Dostupné z WWW: <<https://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/transport-a-skladovani-vodiku/620-skladovani-vodiku-ii>>
- [20] BLEHA, Miroslav a Jan ŽITKA. *Palivový článek v energetice*. Vesmír. 2008, roč. 87, č. 11, s. 788
- [21] DLOUHÝ, Petr a Luděk JANÍK. *Palivové články* [online]. Citováno 27. 12. 2020. HYTEP. Dostupné z WWW: <<https://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/vyuziti-vodiku/588-palivove-clanky>>
- [22] DLOUHÝ, Petr a Luděk JANÍK. *Účinnost II* [online]. Citováno 27. 12. 2020. HYTEP. Dostupné z WWW: <<https://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/vyuziti-vodiku/639-ucinnost-ii>>
- [23] PORŠ, Zdeněk. *Palivové články* [online]. Citováno 27. 12. 2020. Ústav Jaderného Výzkumu Řež, a.s. Dostupné z WWW: <<https://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/palivove-clanky.pdf>>
- [24] DLOUHÝ, Petr a Luděk JANÍK. *Účinnost* [online]. Citováno 27. 12. 2020. HYTEP. Dostupné z WWW: <<https://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/vyuziti-vodiku/637-ucinnost>>

- [25] DÍAZ-GONZÁLEZ Francisco et al. *A review of energy storage technologies for wind power applications*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2012, vol. 16, issue 4, p. 2160
- [26] NIKOLAIDIS, Pavlos and Andreas POULLIKKAS. *A comparative overview of hydrogen production processes*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017, vol. 67, p. 597-611
- [27] VOBOŘIL, David. *Power to Gas - budoucnost akumulace elektriny?* [online]. Citováno 20. 04. 2021. oEnergetice.cz. Dostupné z WWW: <oenergetice.cz/elektrina/power-to-gas-budoucnost-akumulace-elektriny>
- [28] PEER, Václav a Pavel FRIEDEL. *Zplyňování – principy a reaktory* [online]. Citováno 24. 04. 2021. TZB-info.cz. Dostupné z WWW: <<https://vytapeni.tzb-info.cz/vytapime-pevnymi-palivy/13729-zplynovani-principy-a-reaktory>>
- [29] *DOE Technical Targets for Hydrogen Production from Electrolysis* [online]. Citováno 2. 5. 2021. Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. Dostupné z WWW: <<https://www.energy.gov/eere/fuelcells/doe-technical-targets-hydrogen-production-electrolysis>>
- [30] *Manufacturing Cost Analysis of 100 and 250 kW Fuel Cell Systems for Primary Power and Combined Heat and Power Applications* [online]. Citováno 2. 5. 2021. U.S. Department of Energy. Dostupné z WWW: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/07/f33/fcto_battelle_mfg_cost_analysis_pp_chp_fc_systems.pdf>
- [31] *Zásady cenové regulace pro regulační období 2021-2025 pro odvětví elektroenergetiky, plynárenství, pro činnosti operátora trhu v elektroenergetice a plynárenství a pro povinně vykupující* [online]. Citováno 3. 5. 2021. Energetický regulační úřad. Dostupné z WWW: <<https://www.eru.cz/documents/10540/6348085/Zasady-cenove-regulace-2021-2025.pdf/8641d8e0-0d66-47eb-8515-40c530f3973e>>

Přílohy

- (1) vypocty_BP.xlsx
- (2) model_akumulace.c
- (3) vypocet_nakladu_elektrina.c