



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

VODÍK JAKO PERSPEKTIVNÍ NOSIČ ENERGIE

HYDROGEN AS A PROMISING ENERGY CARRIER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Marek Pinkas

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

BRNO 2021

Zadaní bakalářské práce

Ústav:	Energetický ústav
Student:	Marek Pinkas
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Energetika, procesy a životní prostředí
Vedoucí práce:	doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
Akademický rok:	2020/21

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

Vodík jako perspektivní nosič energie

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Náplní práce je rešeršní představení problematiky využití vodíku pro dlouhodobou akumulaci energie. V rámci práce budou rešeršním způsobem představeny možnosti výroby vodíku, skladování vodíku a následné přeměny vodíku do využitelné formy energie. Představeny budou dohledatelné realizace vodíkové energetiky a energetická náročnost dílčích transformací. Práce může zahrnovat i jiné související energetické plyny, např. syntézní metan.

Cíle bakalářské práce:

1. Rešeršním způsobem zpracujete problematiku vodíku jako nosiče energie. V rámci rešerše se zaměřte na výrobu vodíku, skladování a jeho další využití.
2. Uveďte vybrané dohledatelné pilotní realizace systémů využívajících vodík v oblasti výroby a distribuce energie.
3. Stručně představte technologii výroby syntézního zemního plynu s využitím vodíku.
4. Porovnejte různé způsoby dlouhodobé akumulace energie využitelné v zásobování energií elektrickou.

Seznam doporučené literatury:

PAVELEK, M., Termomechanika. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 9788021443006.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Vodík se v posledních letech stává nedílnou součástí moderní energetiky. Ačkoliv je ve vodíkové energetice ještě hodně nevyřešených překážek a technologických nedostatků, očekává se, že jeho význam v dalších letech ještě více poroste. Tyto skutečnosti se staly motivací pro napsání této práce. Tato bakalářská práce se zabývá vodíkem jako médiem pro akumulaci a přenos energie. Rešeršně jsou zpracovány jeho vlastnosti, skladování, výroba a využití. V této práci jsou popsány a porovnány různé způsoby dlouhodobé akumulace energie, které se v současnosti používají. Představeny jsou rovněž dohledatelné vodíkové pilotní projekty.

Klíčová slova

Vodík, akumulace energie, power to gas, pilotní projekt, palivový článek

ABSTRACT

In recent years hydrogen has become an integral part of modern energetics. Although there are still many unresolved barriers and technological shortcomings in hydrogen energetics, its importance is expected to grow even more in the coming years. These facts were the motivation for writing this thesis. This bachelor thesis deals with hydrogen as a medium for energy storage and transmission as well as research about its properties, storage, production and use. In this thesis are described and compared various methods of long-term energy storage that are currently used. Presented are various traceable hydrogen pilot projects.

Key words

Hydrogen, energy storage, power to gas, pilot project, fuel cell

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PINKAS, Marek. *Vodík jako perspektivní nosič energie* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132243>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Jiří Pospíšil.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Vodík jako perspektivní nosič energie** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který se nachází na konci této práce.

.....
Datum

.....
Jméno a příjmení

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto doc. Ing. Jiřímu Pospíšilovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za podporu během studia.

OBSAH

ÚVOD	11
1 Vodík	12
1.1 Fyzikální a chemické vlastnosti vodíku	12
1.2 Vodík jako palivo	13
1.3 Skladování a transport	13
2 Výroba vodíku	16
2.1 Produkce z fosilních paliv	17
2.1.1 Zplyňování uhlí	17
2.1.2 Parní reforming	17
2.1.3 Parciální oxidace	18
2.2 Výroba štěpením vody	20
2.2.1 Elektrolýza	20
2.2.2 Termolýza	23
2.2.3 Fotoelektrolýza	23
2.3 Produkce z biomasy	24
2.3.1 Pyrolýza a parní reforming	24
2.3.2 Zplyňování biomasy	24
2.3.3 Fotofermentace	26
2.3.4 Tmavá fermentace	27
2.3.5 Biofotolýza	27
2.4 Porovnání vybraných metod výroby	29
3 Využití vodíku	30
3.1 Palivové články	30
3.1.1 Palivové články s polymerní membránou (PEMFC)	30
3.1.2 Palivové články s alkalickým elektrolytem (AFC)	31
3.1.3 Palivové články s kyselinou fosforečnou (PAFC)	32
3.1.4 Palivové články s tekutým uhlíčitánem (MCFC)	33
3.1.5 Palivové články s tuhými oxidy (SOFC)	34
3.1.6 Palivové články pro přímou reakci metanolu (DMFC)	35
3.1.7 Porovnání jednotlivých typů palivových článků	36
3.2 Spalování vodíku	38
3.2.1 Vodíkové spalovací motory	38
3.2.2 Vodíkový pohon H ₂ i	40
3.3 Vodík jako chemická surovina	41
3.3.1 Amoniak	41
3.3.2 Syntetická paliva	42
4 Vybrané pilotní projekty	44
4.1 Energiepark Mainz	44
4.2 HYBRIT	45
4.3 HESC	46

4.4	Deep Purple	47
5	Akumulace elektrické energie	49
5.1	Mechanické systémy pro akumulaci energie	50
5.1.1	Přečerpávací vodní elektrárny (PHS).....	50
5.1.2	Tlakovzdušné akumulární elektrárny (CAES).....	50
5.2	Baterie	51
5.2.1	Olověné baterie.....	51
5.2.2	Niklové baterie	52
5.2.3	Sodíkové baterie	53
5.2.4	Lithiové baterie.....	53
5.2.5	Průtočné baterie.....	54
5.3	Power to Gas	55
5.4	Porovnání technologií akumulace energie	56
	ZÁVĚR.....	57
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	58
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	66
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	67
	SEZNAM TABULEK.....	68

ÚVOD

Dvěma zásadními problémy, které trápí dnešní svět, jsou globální oteplování a znečištěné ovzduší. Z toho důvodu čím dále více zemí začíná postupně snižovat svoji uhlíkovou stopu a zavazují se k dosažení uhlíkové neutrality v příštích desetiletích. Při současné snaze docílit uhlíkové neutrality nastává otázka, čím nahradit dnes stále hojně používaná fosilní paliva. Díky mnoha výzkumům a již vyvinutým technologiím začínají tato fosilní paliva ustupovat obnovitelným zdrojům, mezi které lze zařadit i vodík. Vodík se považuje za uhlíkově neutrální palivo a velmi slibný nosič energie. Jeho atraktivita spočívá v různých metodách výroby, rozmanitosti metod jeho využití a prakticky nulových emisích při jeho zpracování.

Existuje však mnoho překážek, které je třeba překonat, pokud se má vodík v budoucnosti stát významnou částí moderní energetiky. Mezi problémy při používání vodíku se řadí jeho trochu problematické skladování a transport. Během jeho výroby se používá primárně fosilní paliva než obnovitelné zdroje energie. Při přeměně elektrické energie na vodík a zase zpět, ať už použitím palivových článků nebo jeho spalováním, dochází k energetickým ztrátám, které je třeba minimalizovat. Ačkoliv se nejedná o klasické palivo, potenciál vodíku se ukryvá hlavně v roli nosiče energie.

Tato bakalářská práce je rozdělena do 5 kapitol. První kapitola se zabývá vodíkem jakožto chemickým prvkem. Popisuje jeho vlastnosti, výskyt a jeho využití jakožto paliva. Rovněž jsou popsány technologie jeho skladování a transportování. Následující kapitola představuje jednotlivé metody výroby vodíku, které se momentálně nejvíce používají. Metody výroby jsou rozděleny podle vstupní suroviny, takže na produkci vodíku z fosilních paliv, vody a biomasy. Ve třetí kapitole jsou popsány způsoby využití vodíku, se kterými se lze setkat. Hlavně se jedná o palivové články, spalování vodíku v motorech a použití vodíku pro vytváření jiných látek. Ve čtvrté kapitole jsou představeny dohledatelné realizace pilotních projektů využívajících vodíkových technologií. V poslední kapitole jsou popsány a porovnány vybrané metody akumulace energie. Mezi nimi nechybí technologie P2G, která využívá vodík jako medium pro dlouhodobou akumulaci energie.

1 Vodík

Vodík je nejrozšířenějším prvkem ve vesmíru a hraje v něm velmi důležitou roli. Tvoří téměř 3/4 jeho hmoty. Byl objeven v roce 1776 Cavendishem, název hydrogenium mu dal Lavoisier. V přírodě se elementární vodík nachází ojediněle. Vyskytuje se ve sloučeninách, hlavně ve vodě a uhlovodících. Je to jedna ze základních složek veškeré živé hmoty [1, 2].

1.1 Fyzikální a chemické vlastnosti vodíku

Vodík je nejlehčí plyn, bezbarvý, hořlavý, bez chuti a zápachu. Svými vlastnostmi se blíží ideálnímu plynu. Se vzduchem vytváří výbušnou směs. Tvoří dvouatomové molekuly s kovalentní σ -vazbou. Vodík má dva izotopy Deuterium (v jádře navíc 1 neutron) a Tritium (v jádře navíc 2 neutrony). Deuterium tvořící tzv. těžkou vodu D_2O se kdysi používalo jako účinný moderátor neutronů při jaderných štěpných reakcích. Dnes se využívá k izotopovému značení. Tritium je radioaktivní zářič β^- a je vyráběný uměle v nukleárních reaktorech. Jeho poločas rozpadu je 12,35 let a používá se v termonukleárních náložích (vodíkové bomby) [2, 3].

Vodík se slučuje s většinou prvků, hlavně s kyslíkem a fluorem. S kovy tvoří hydridy a často se používá k redukci oxidů kovů díky jeho afinitě ke kyslíku. Reakcí s nekovy vznikají plynné hydridy. Tekutý vodík se pro jeho nízký bod varu $-253\text{ }^\circ\text{C}$ využívá při studiu supravodivosti a v kryogenní technice. Vybrané vlastnosti vodíku jsou uvedeny v tabulce (1) [3].

Tabulka 1- Vybrané vlastnosti vodíku [4].

Vlastnosti	Vodík
Chemický vzorec	H_2
Molekulární hmotnost	2,01594 g/mol
Hustota plynu (při $0\text{ }^\circ\text{C}$ a 101 325 Pa)	0,08987 kg/m ³
Měrná tepelná kapacita plynu ($25\text{ }^\circ\text{C}$)	14,3 kJ/kg $^\circ\text{C}$
Teplota tání	$-259\text{ }^\circ\text{C}$
Teplota varu (101 325 Pa)	$-253\text{ }^\circ\text{C}$
Hustota v pevném skupenství ($-259\text{ }^\circ\text{C}$)	858 kg/m ³
Hustota v kapalném skupenství ($-253\text{ }^\circ\text{C}$)	708 kg/m ³
Měrná tepelná kapacita v pevném skupenství ($-259\text{ }^\circ\text{C}$)	2,63 kJ/kg $^\circ\text{C}$
Měrná tepelná kapacita v kapalném skupenství ($-253\text{ }^\circ\text{C}$)	8,1 kJ/kg $^\circ\text{C}$

1.2 Vodík jako palivo

Vodík je vysoce hořlavý v širokém rozmezí teplot a koncentrací. V reakci s kyslíkem intenzivně uvolňuje energii ve spalovacích motorech nebo ji tiše uvolňuje v palivových článcích za účelem výroby vody jako svého jediného vedlejšího produktu. Nepochází k žádným emisím kouře, CO, CO₂, NO_x, SO_x nebo O₃ [4]. Plamen při spalování vodíku je světlemodrý a velmi málo viditelný, což může způsobovat problémy při zjišťování, jestli je hořák zapálený. Ačkoli je jeho účinnost spalování vynikající, je zde několik technologických výzev a problémů, jakými jsou cena a bezpečnost výroby, přeprava a skladování [4].

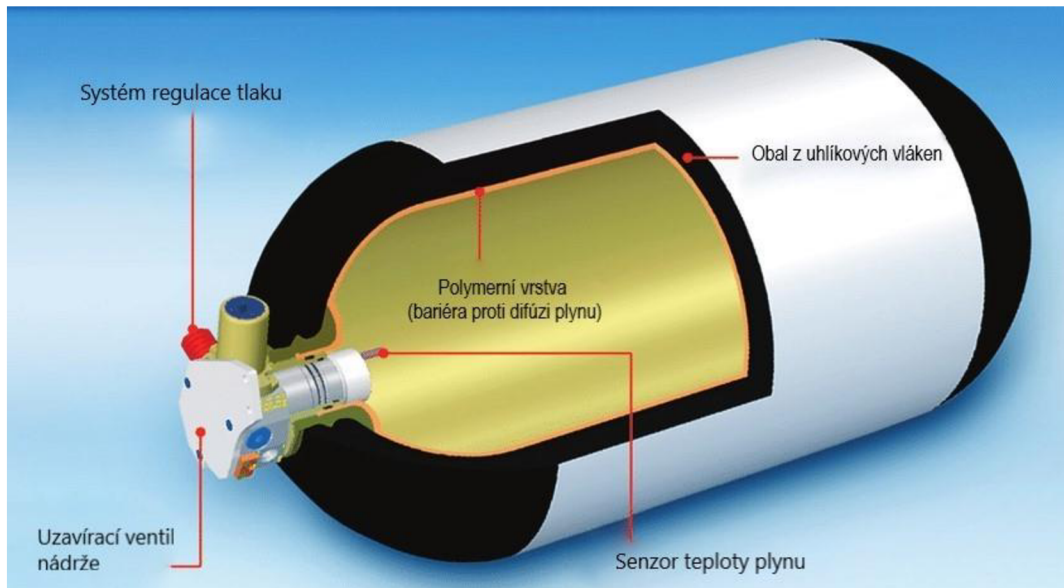
Na jednotku hmotnosti má vodík největší energetický obsah ze všech paliv. Opačná situace je u objemu, kde vodík má nízkou objemovou hustotu, což právě způsobuje problém s jeho uskladněním a přepravou [4].

Tabulka 2 - Porovnání vlastností vodíku a jiných paliv [4]

	Výhřevnost (MJ/kg)	Výhřevnost (kapalné skupen- ství, MJ/m ³)	Teplota plamene (°C)	Rozsah hořlavosti (%)
Vodík	119,9	8,491	2207	4,0–75,0
Metan	50,0	20,920	1914	5,0–15,0
Propan	45,6	23,488	1925	2,1–9,5
Metanol	18,0	15,800	1870	6,7–36,0
Benzín	44,5	31,150	2307	1,3–7,1
Nafta	42,5	31,435	2327	0,6–5,5

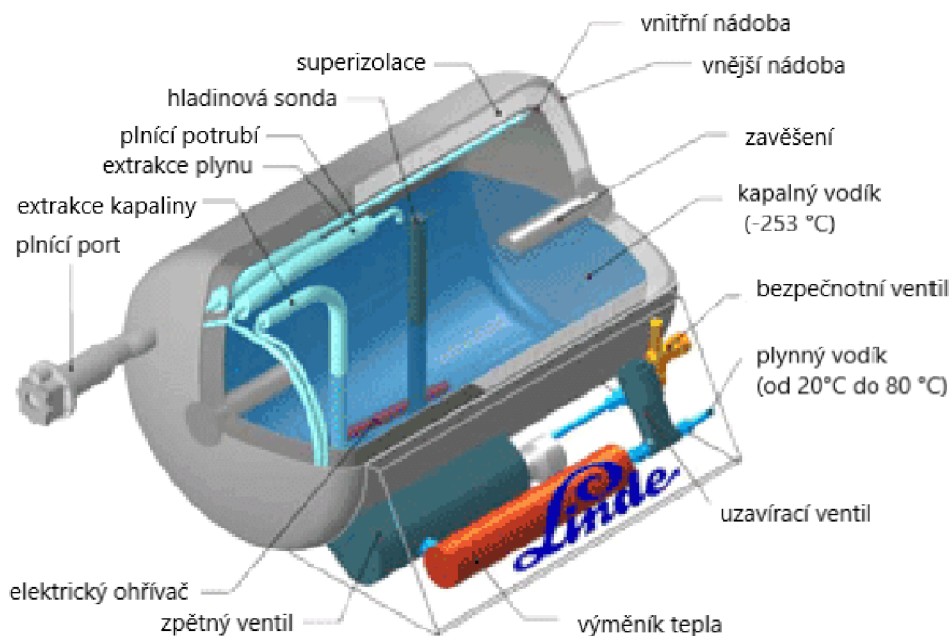
1.3 Skladování a transport

Protože má vodík ze všech plynů nejnižší bod varu a nejmenší hustotu je velmi obtížné jeho skladování a transport. Lze jej skladovat v plynné a tekuté formě (konvekční způsob) nebo rovněž vázaný v chemických sloučeninách jako hydrid (alternativní způsob) [2]. Při skladování H₂ v plynné formě se nejčastěji používá láhve z nízkouhlíkaté nebo legované oceli a taky kompozity. Obvyklý provozní tlak je 350 bar. Vnitřní povrch kompozitních láhví je tvořen tenkou vrstvou kovu nebo speciálního polymeru, aby zabránila úniku plynu. Ke stlačení vodíku na požadovaný tlak se používá pístových kompresorů. Energie potřebná ke stlačení plynu je pro 350 bar přibližně 30 % energie v palivu [5].



Obrázek 1.1 Systém skladování stlačeného vodíku [9]

Kapalný vodík je uskladněn při teplotě -253 °C , což způsobuje zvýšení nároků na použité materiály a energetické nároky na zkapalnění. Pro skladování kapalného H_2 se používá vícevrstvé nádoby s dobrými izolačními parametry. Maximální přetlak nádob je 5 bar a jsou vybaveny mechanismem, který tento tlak reguluje. V nádobě totiž probíhá odpařování vodíku a to z důvodu přestupu tepla z okolí. Odpařený vodík zvyšuje tlak v nádobě a je nutné ho odpouštět, aby nedošlo ke zničení nádrže. Běžně mohou ztráty odpařením dosahovat až 3 % z obsahu na den. Energie potřebná ke zkapalnění vodíku se rovná až 40 % energie v palivu [5].



Obrázek 1.2 Systém skladování kapalného vodíku [10]

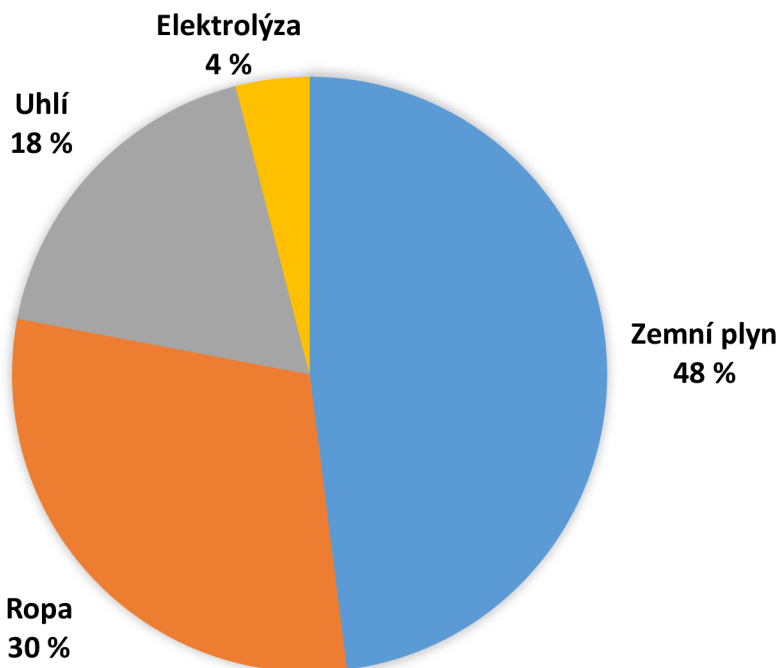
Další technologií skladování je kombinace vlastností stlačeného plynného vodíku a kapalného vodíku. Tato metoda se používá k minimalizaci odpařování vodíku a současně k udržení vysoké hustoty energie. Skladovací nádoba musí být schopna uchovávat vodík při kryogenní teplotě (-253 °C) a vysokém tlaku (min. 300 bar) [6, 8].

Slibným způsobem skladování je vodík vázaný v hydridu kovu. Hydridy jsou schopny absorbovat a desorbovat vodík až už za pokojové nebo zvýšené teploty. Při zahřívání hydridů kovů na teplotu $2\text{--}500\text{ °C}$ dosahuje skladovací kapacita 5–7 % hmot. K desorbci vodíku z hydridu je potřebná teplota $120\text{--}200\text{ °C}$. Výhodou této technologie je vysoký objem skladovaného vodíku, vysoká čistota vodíku a nízké náklady na provoz a údržbu [6]. Kromě hydridů kovů lze vodík chemicky skladovat v dalších látkách a materiálech, jakými jsou amoniak (NH_3), kyselina mravenčí, uhlohydráty a další. Bylo zjištěno, že použití těchto technologií je mnohem efektivnější ve srovnání se skladováním kapalného a plynného vodíku. Existuje ale zatím mnoho omezení jako potřeba vysoké teploty pro hydrogenaci a dehydrogenaci, vysoké náklady, recyklace látek atd. [7,8].

2 Výroba vodíku

Vodík je velmi atraktivní nosič energie, protože se může spalovat podobně jako zemní plyn a benzin nebo v palivovém článku ho lze přeměnit na elektřinu bez jakýchkoliv emisí. Vodík může být produkován z různých zdrojů, jakými jsou například fosilní paliva (ropa, zemní plyn, uhlí), biomasa a voda. Tato rozmanitost zdrojů je hlavním důvodem, proč je považován za slibný nosič energie. Výroba může probíhat jak ve velkých centrálních zařízeních, tak rovněž v malých jednotkách umístěných v blízkosti nebo přímo v místě jeho použití (např. čerpací stanice nebo stacionární elektrárny) [11, 12].

Jelikož jsou obnovitelné zdroje energie (sluneční, větrná, vodní anebo biomasa) dostupné ve všech částech světa, mají všechny země přístup k čistému vodíkovému palivu. Problémem je však cena této výroby. Produkce vodíku z obnovitelných zdrojů je v současnosti nákladnější než z fosilních paliv, proto stále převládá výroba z fosilních zdrojů [14]. Nejvyužívanější metodou je aktuálně parní reforming metanu. Následuje zplyňování uhlí a elektrolýza vody. V posledních letech se výroba vodíku stala efektivnější a levnější, ale zůstává pořád značně energeticky náročná oproti využívání jiných paliv. Abychom mohli o vodíku uvažovat jako o obnovitelném zdroji energie, musíme rozlišovat, jestli je vyráběny z fosilních paliv nebo obnovitelných zdrojů. Dále je třeba brát v potaz, zda byla použita pro jeho výrobu elektrická energie také z obnovitelných zdrojů či nikoliv. Takto vyrobený vodík (při použití pouze obnovitelných zdrojů) se pak nazývá zelený vodík [13].



Obrázek 2.1 Podíl zdrojů na výrobě vodíku v současnosti [14]

2.1 Produkce z fosilních paliv

2.1.1 Zplyňování uhlí

Uhlí je komplexní a vysoce variabilní látka, z které lze získat mnoho produktů. Zplyňováním uhlí můžeme vyrábět energii, kapalná paliva, chemikálie a právě vodík. Uhlí reaguje za vysokých teplot (800–1200 °C) a tlaku (0,1–4 MPa) s vodní párou a vzduchem. Reakcí vzniká vodík, oxid uhelnatý, oxid uhličitý a další plyny podle reakcí (1) a (2). Oxid uhelnatý dále reaguje s vodní párou za vzniku dalšího vodíku (3) [15].



Škodlivé složky v plynu jako H_2S , COS , CO , CO_2 se nejčastěji odstraňují pomocí vy-píracího procesu s podchlazeným metanolem. Tyto složky lze tedy zachytit a uložit. Z toho důvodu může být výroba vodíku touto metodou velmi ekologická [15, 16].



Obrázek 2.2 Průmyslová výroba vodíku zplyňováním uhlí [16]

2.1.2 Parní reforming

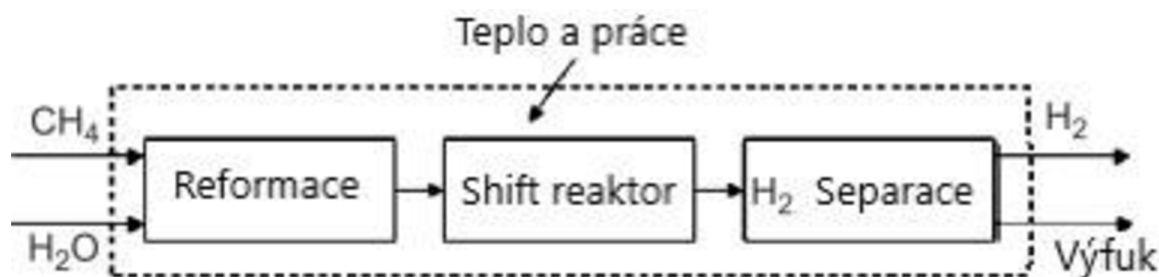
Primární parní reforming probíhá za teplot 700 až 900 °C a tlaku 2 až 4 MPa. Při této metodě se používá nikl jako katalyzátor. Zemní plyn je společně s přehřátou vodní párou veden do reaktoru, kde spolu reagují podle rovnice (4) [16].



Reakce je endotermická a v praxi se potřebné teplo dodává spalováním dalšího metanu, jednoduchou výměnou tepla nebo odpadním teplem. Syngas (syntézní plyn) opouštějící reformátor je veden do reaktoru, který přeměňuje CO obsažené v syngasu na CO_2 a H_2 při použití další vodní páry. Děj lze zapsat rovnicí (5) [17].



Posledním krokem parního reformingu je separace vodíku z plynu vycházejícího z reaktoru. Tuto separaci se provádí více způsoby. Třemi nejpoužívanějšími způsoby jsou adsorpce s tlakovým výkyvem (PSA) pro separaci vodíku, PSA pro separaci oxidu uhličitého a kondenzaci zbývajících páry, membránová separace vodíku. Separáčnické techniky PSA poskytují čistotu koncového proudu vodíku až 99 %, ale jsou velmi energeticky náročné. Slibnou a stále se vyvíjející technologií je použití vodíkové membrány, která rovněž zajistí čistotu proudu vodíku kolem 99 % [17].



Obrázek 2.3 Schéma parního reformingu [17]

2.1.3 Parciální oxidace

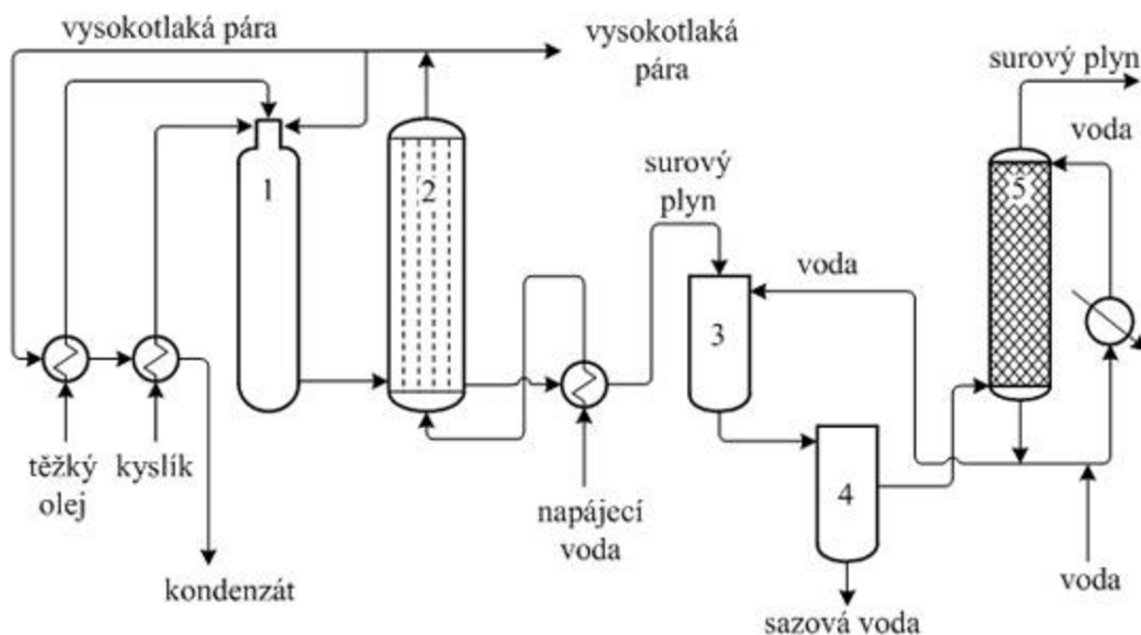
Jedná se o rozšířený způsob výroby syntézních plynů a vodíku. Vstupní surovinou mohou být plynné nebo kapalné frakce získané ze zpracování ropy. Nejčastěji se používají těžké ropné frakce. Oxidace se provádí kyslíkem a vodní párou za teplot 1300–1500 °C a tlaku 3–8 MPa. Nevýhodou této oxidace je, že je potřebný kyslík o čistotě 95–99 %, který lze získat destilací vzduchu, což zvýší náklady na výrobu. U parciální oxidace probíhají nejprve dvě vysoce exotermní reakce (6) a (7) [18].



Část vstupní suroviny, která nebyla zoxidovaná kyslíkem se zplyňuje vodní párou endotermní reakcí (8). Tato reakce vede ke vzniku většího množství vodíku než v případě oxidace kyslíkem a zároveň, jelikož reakce je endotermní, sníží se teplota produktů [18].



Během reakcí se sirné sloučeniny, které se nachází ve vstupní surovině, převedou na sulfan (H_2S) a karbonylsulfid (COS). Parciální oxidací vždy vzniká směs CO , CO_2 , H_2O , H_2 , CH_4 a sirných sloučenin H_2S , COS . Vznikají také saze jako vedlejší nežádoucí produkt [18].



Obrázek 2.4 Schéma parciální oxidace [18]
(1 – generátor, 2 – kotel na výrobu páry, 3 – chladič, 4 – separátor, 5 – pračka)

Generátorový plyn o teplotě okolo 1350 °C je veden do kotle na výrobu páry. Plyn se zde ochladí nad teplotu nasycené vodní páry (cca 260 °C) a zároveň je zde vyráběna vysokotlaká pára o tlaku až 12 MPa. Část páry se využije v procesu pro oxidaci vstupní suroviny (cca 20 %) a zbylá pára se používá k jiným účelům. Následně v chladiči se plyn chladí nástřikem vody, přičemž dojde k odstranění většiny sazí. Zbylé saze se dále odstraňují v pračce, kde rovněž dochází k vyprání sulfanu a oxidu uhličitého, který vzniká konverzí oxidu uhelnatého. Zbytek sloučenin CO a CO₂ se po vyprání metanizuje. Příklad složení plynu (v % obj.) po parciální oxidaci mazutu je uveden v tabulce (3) [18].

Tabulka 3 - Složení plynu po parciální oxidaci mazutu [18]

Složka	Surový generátorový plyn	Za vypírkou CO ₂	Za metanizací
CO ₂	6,7	0,1	< 0,001
CO	46,0	0,4	
H ₂	49,3	98,1	98,1
CH ₄	0,2	0,2	0,8
N ₂ +Ar	1,1	1,2	1,2
H ₂ S	0,7	< 0,002	< 0,002

2.2 Výroba štěpením vody

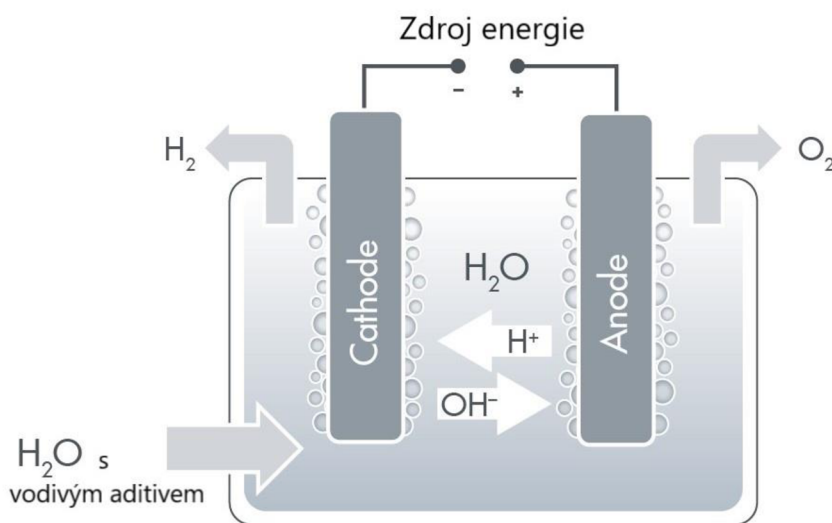
2.2.1 Elektrolýza

Dobře známá a zavedená metoda, která představuje neúčinnější metodu štěpení vody. Je to proces, při kterém se díky působení elektrické energie (stejnosměrný proud) voda štěpí na kyslík a vodík (9) [19].



Základním prvkem systému této výroby vodíku je elektrolyzní článek. Články se zapojují sériově nebo paralelně a tvoří tak modul elektrolyzátoru. Vodu přiváděnou do článků se předem upravuje, aby nedocházelo k usazování minerálů a vzniku dalších chemických reakcí. Elektrolyzéry jsou tiché a nevyžadují velkou údržbu, protože nemají téměř žádné pohyblivé části. Jsou značně modulární, a proto je možné používat je v decentralizovaných aplikacích [20]. Přestože se elektrolyzéry používá už značnou dobu je zde mnoho aspektů, které je zapotřebí zlepšit. Především snížení výrobních a instalačních nákladů a zvýšení účinnosti. Rozlišují se tři typy elektrolyzátoru: alkalické, polymerní elektrolytické membrány (PEM) a vysokoteplotní elektrolyzéry na bázi pevných oxidů (SOEC) [20].

V alkalickém elektrolyzátoru jsou elektrody ponořené do kapalného elektrolytu, kterým je nejčastěji vodný roztok KOH (25–30 % hm.). Někdy se používají roztoky NaOH nebo NaCl. Elektrody jsou odděleny plynotěsnou membránou. Po přivedení stejnosměrného proudu na elektrody vzniká na anodě kyslík a na katodě vodík. Při tvorbě vodíku na katodě se voda redukuje na hydroxidové anionty, které prostupují membránou k anodě, kde se rekombinují za vzniku kyslíku. Proces popisují reakce (10, 11). Anoda je obvykle vyrobená z niklu nebo oceli potažená niklem a katoda z oceli potažená různými katalyzátory [20].



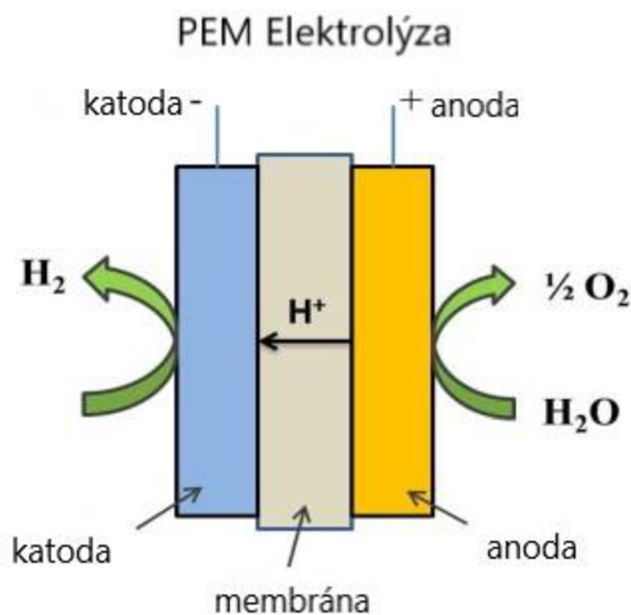
Obrázek 2.5 Schéma alkalické elektrolýzy [21]

Membrána je nepropustná pro plyny a propustná pro ionty, čímž brání smísení produkovaných plynů. U běžných elektrolyzérů je používán azbest jako membránový materiál (tloušťka přibližně 3 mm). Kvůli své zdravotní závadnosti je dnes často nahrazován jinými materiály. Energetická náročnost elektrolyzérů je závislá na provozních podmínkách a charakteristikách použitých elektrod [20]. Atmosférické (tlak do 6 bar) potřebují navíc energii ke kompresi vyrobeného vodíku, čímž se zvýší energetická spotřeba na 4,5–7 kWh/Nm³ H₂. U vysokotlakých elektrolyzérů (tlak od 6 do 60 bar) je spotřeba na stlačení menší a celková náročnost dosahuje hodnot 4,5–5 kWh/Nm³ H₂. Účinnost alkalických elektrolyzérů je 78–85 % a životnost až 30 let. Jsou velmi bezpečné, spolehlivé a jedná se o komerčně nejrozšířenější technologii elektrolyzy. Čistota kyslíku a vodíku dosahuje až 99,9 % [20].

Technologie PEM (proton exchange membrane) na rozdíl od alkalických elektrolyzérů nepotřebuje kapalný elektrolyt. Jako elektrolyt slouží tenká plynatěsná polymerní membrána. Nejčastěji z materiálu zvaného nafion. Elektrody jsou vyrobené z ušlechtilých kovů jako například platina a iridium. Elektrolyza probíhá podle reakcí (12, 13) [20].

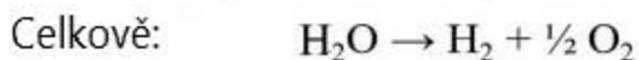
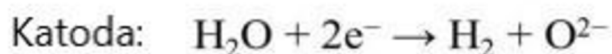
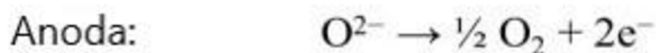
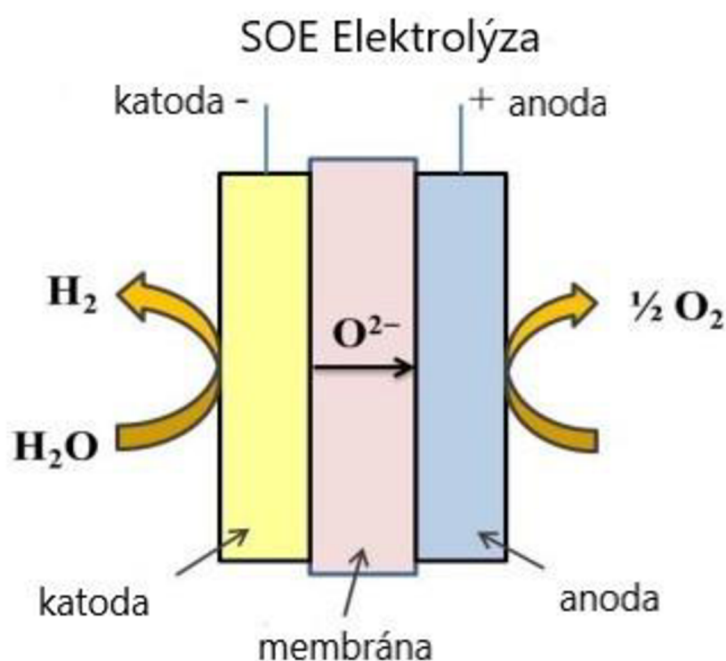


Voda na anodě oxiduje a vznikají elektrony, protony a kyslík. Protony procházejí skrz membránu na katodu a zde jsou redukovány na vodík. Vyráběný vodík dosahuje vysoké čistoty až 99,99 % a to bez čištění. Provozní podmínky jsou běžně 80 °C a tlak 15 bar. Energetická náročnost výroby je 6–8 kWh/Nm³ H₂ a účinnost dosahuje 67–82 %. Oproti alkalickým mají PEM elektrolyzéry schopnost pracovat pod střídavým proudem. Hlavní nevýhodou těchto elektrolyzérů jsou vysoké investiční náklady z důvodu použití ušlechtilých kovů a drahých materiálů na elektrody a membránu [20].



Obrázek 2.6 Schéma PEM elektrolyzy [22]

Elektrolyzéry SOE (solid oxide electrolyzers) pracují při vysokých teplotách (do 1000 °C), díky čemu dosahují vyšší účinnosti oproti alkalickým a PEM. Vodní pára a recyklovaný vodík se přivádějí na katodu, kde se pára redukuje za vzniku vodíku a oxidových aniontů, které dále procházejí pevným elektrolytem na anodu, kde se re-kombinují a vytváří kyslík. Katoda je cermet (kompozitní materiál) vyrobený z niklu a YSZ (yttrium stabilizované zirkonium), anoda vyrobená z perovskitu (minerál) a pevný elektrolyt rovněž z YSZ [20]. Tato technologie vznikla za účelem snížení energetické náročnosti a tím i provozních nákladů na výrobu vodíku pomocí elektrolýzy. Při této parní elektrolýze lze až 40 % potřebné energie k výrobě dodávat pomocí tepla při provozní teplotě 1000 °C, a tím potřebná elektrická energie se sníží až o 25 %. Díky tomuto faktoru dosahuje technologie SOE vyšší účinnosti než jiné a je tak atraktivní pro aplikace, kde je zdroj vysoké teploty (např. jaderné reaktory, geotermální energie). Nevýhodou těchto elektrolyzérů je materiál membrány. Při změně zatížení a ztrátě tepla vznikají mikrotrhliny v membráně a tím se snižuje její životnost [20].



Obrázek 2.7 Schéma SOE elektrolýzy [22]

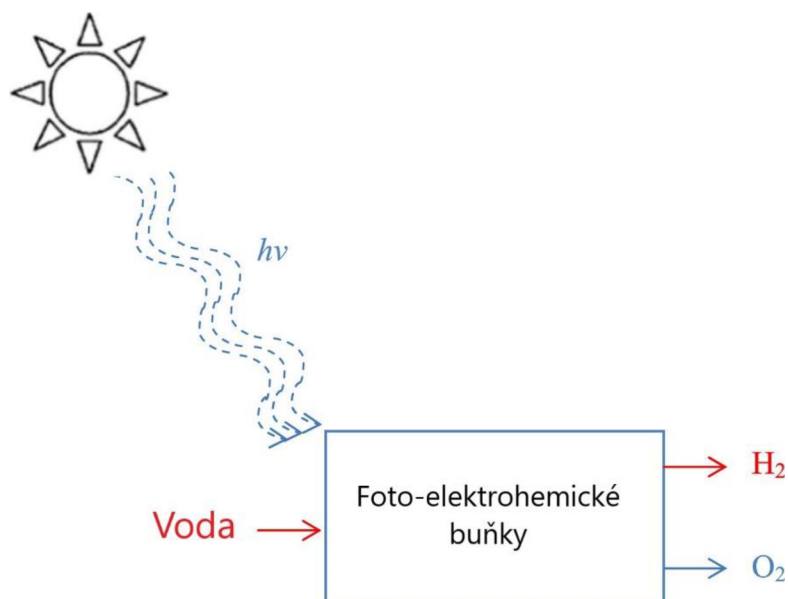
2.2.2 Termolýza

Termochemické štěpení vody je proces, kdy se voda po zahřátí na vysokou teplotu štěpí na vodík a kyslík. Tento proces vyžaduje velmi vysoké teploty až 2500 °C. Jelikož dosažení a udržení tak vysoké teploty je velmi energeticky náročné a těžko udržitelné, používá se pro tento proces několik termochemických cyklů, kterými se sníží požadovanou teplotu pro štěpení a zvýší se celková účinnost [19]. Příkladem je třeba jód–sírový cyklus (14, 15, 16). Voda vlivem vysoké teploty reaguje s jódem a oxidem siřičitým za vzniku jodovodíku a kyseliny sírové. Dalšími reakcemi obdržíme rovněž již zmíněný jód a oxid siřičitý, které se recyklují a použijí na počátku procesu. Nejvíce energie spotřebuje rozklad kyseliny sírové, který probíhá za teploty okolo 1000 °C. Rozklad kyseliny způsobuje vysoce agresivní podmínky, proto je třeba při tomto procesu používat chemicky odolné materiály. Nakonec se vodík separuje elektrodialýzou a membránou. Odseparovaný vodík dosahuje čistoty až 99 % [23].



2.2.3 Fotoelektrolýza

Během fotoelektrolýzy je k přímému rozkladu vody použito sluneční světlo. Princip a používané materiály jsou podobné jako u fotovoltaiky. Fotokatoda, která je vyrobena z materiálu typu p s nadbytkem děr, a fotoanoda (n-typ s nadbytkem elektronů) jsou ponořeny do vodného elektrolytu. Místo vytváření proudu, jak je tomu u fotovoltaiky, je voda štěpena na vodík a kyslík. Bohužel zatím účinnost fotoelektrod dosahuje pouze 16 %. Důvodem jsou nedokonalosti v krystalické struktuře, vlastnosti povrchu elektrod a odolnost materiálů proti korozi. Výhodou fotoelektrolýzy je nízká cena používaných materiálů a dosažení obdobné čistoty vodíku jako u alkalické elektrolýzy [23].



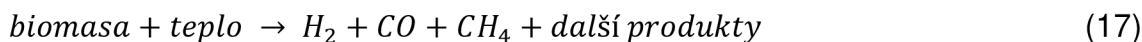
Obrázek 2.8 Diagram procesu fotoelektrolýzy [19]

2.3 Produkce z biomasy

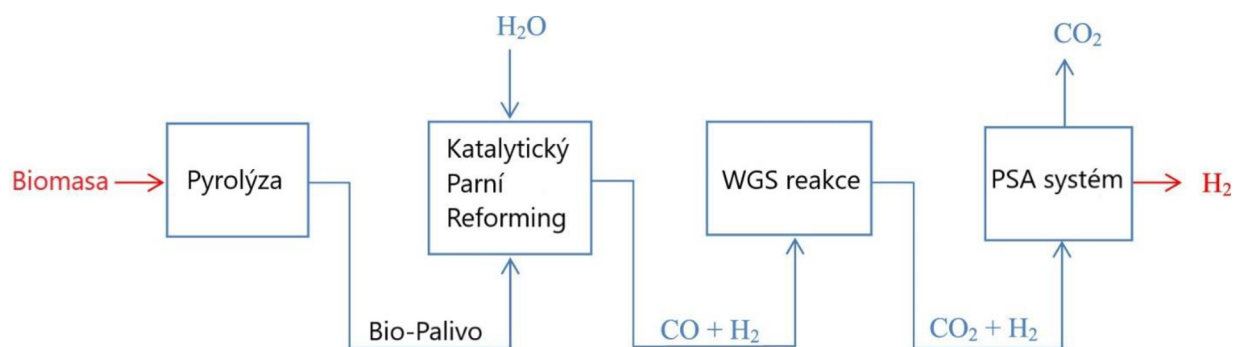
Technologie přeměny biomasy na vodík se dělí na termochemické a biochemické procesy. Častěji se používají termochemické procesy, protože jsou levnější. Takými procesy jsou zplyňování a pyrolýza. Vzniklý proud plynu neboli syngas je směsí vodíku, oxidu uhelnatého a případně dalších plynů. Pro procesy termochemické je vhodná suchá biomasa. V případě biomasy s vysokým obsahem vody je třeba použít procesy biochemické, kdy reakce jsou katalyzovány mikroorganismy ve vodném prostředí a za nízkých teplot a tlaku. Takými procesy mohou být vodíková fermentace, fotofermentace a biofotolýza [24, 25].

2.3.1 Pyrolýza a parní reforming

Pyrolýzu se provádí zahřátím biomasy na teplotu 350–500 °C a následně zvyšováním teploty na 700–800 °C při tlaku 1–5 bar a bez přístupu vzduchu. Jedná se o složitý proces rozkladu organických složek v biomase. Reakcemi získáme kapalné oleje, tuhé uhlí a plynné produkty. Pyrolýzu lze rozdělit na pomalou a rychlou. Při výrobě vodíku bereme v potaz rychlou pyrolýzu, při které se biomasa rychle zahřívá za vzniku výsledných produktů dle reakce (17). Ačkoli se pyrolýza primárně používá pro výrobu biopaliva, vzniká při tomto procesu rovněž vodík, jehož množství lze zvýšit následným parním reformingem popsaným reakcí (18) [26].



Přeměna CO na oxid uhličitý a další vodík se provádí reakcí WGS (19). Následné čištění plynu se provádí metodou PSA, která spočívá v separaci plynů pomocí poréznicích nebo neporéznicích membrán. Jednotlivé kroky procesu jsou zobrazeny na obrázku (2.9) [19].

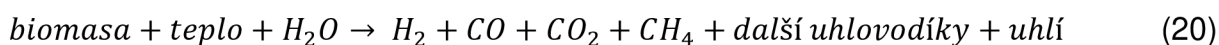


Obrázek 2.9 Diagram procesu pyrolýzy biomasy [19]

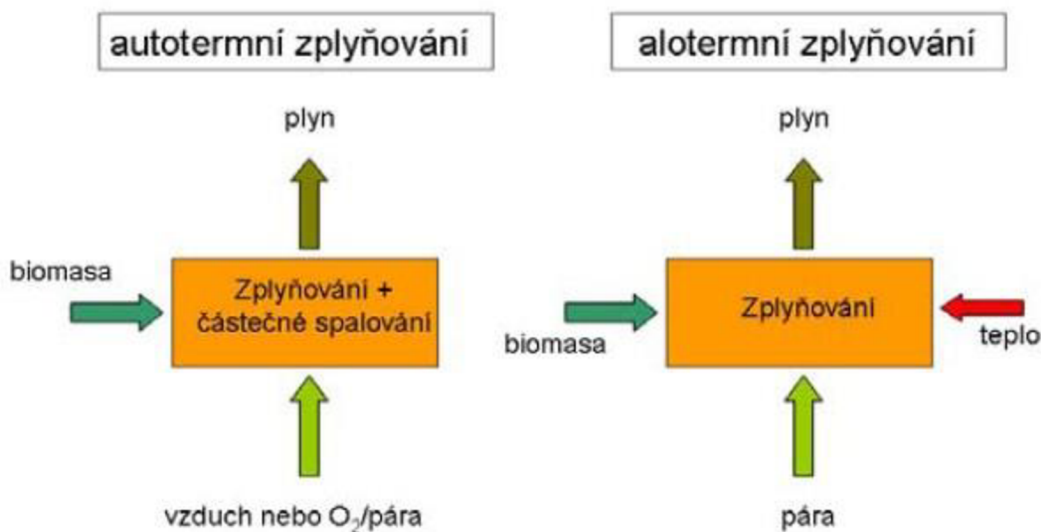
2.3.2 Zplyňování biomasy

Zplyňování je termochemická přeměna uhlíkatého materiálu na energetický plyn pomocí zplyňovacích médií a tepla. Je to komplexní proces, kterého se účastní více reakcí. Obecně jej lze rozdělit na čtyři fáze: sušení, pyrolýza, redukce a oxidace. Tyto fáze probíhají současně nebo postupně. Na rozdíl od pyrolýzy se zplyňování provádí

za přítomnosti kyslíku [27]. Primárním cílem zplyňování je výroba plynných produktů, oproti pyrolýze, kde primárním cílem je výroba kapalného biopaliva a dřevěného uhlí. Částice biomasy částečně oxidují, což vede ke vzniku plynu a uhlí. Následně se dřevěné uhlí redukuje. Tento proces lze zapsat reakcí (20). Vzniklý plynný produkt (generátorový plyn) se dále reformuje párou za účelem vzniku dalšího vodíku, stejně jak tomu bylo u pyrolýzy. Ke zplyňování je vhodná biomasa s obsahem vlhkosti menší než 35 %. Problémem u tohoto procesu je tvorba dehtu [26]. Nežádoucí dehet může tvořit dehtové aerosoly a způsobovat polymerizaci na složitější struktury, které nejsou příznivé pro reformování párou. Pro minimalizaci tvorby dehtu se používá katalyzátory a přísady, správnou konstrukci zplynovače a regulaci. Jako přísadu lze použít dolomit. Při jeho použití je možné dehet úplně eliminovat. Katalyzátory a přísady kromě snížení obsahu dehtu také zvyšují kvalitu plynného produktu. Nejčastěji používanými katalyzátory kromě dolomitu jsou oxidy alkalických kovů a katalyzátory na bázi Ni [26].



Potřebné teplo ke zplynění biomasy může být vyprodukováno přímo v reaktoru oxidací části paliva (autotermní způsob) nebo dodáváno z okolí (alotermní způsob) [27].

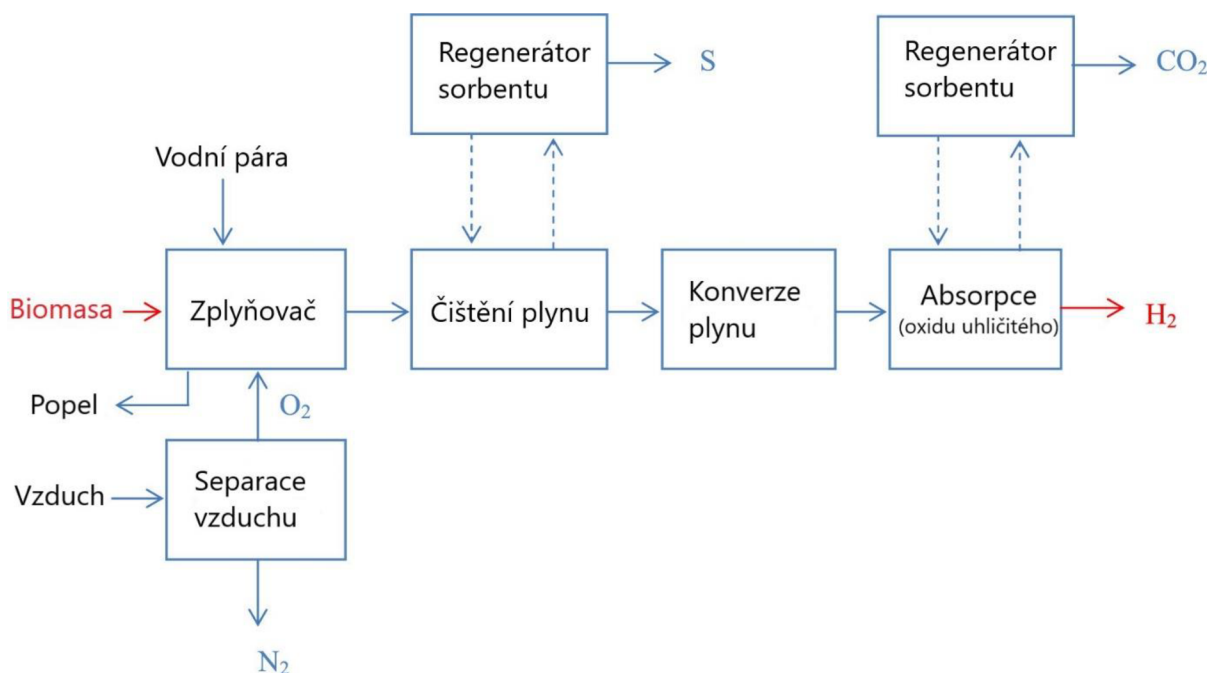


Obrázek 2.10 Autotermní a alotermní zplyňování [27]

Autotermní zplyňování vyžaduje přívod kyslíku, aby docházelo k potřebným spalovacím reakcím, které pokryjí spotřebu tepla pro tento proces. Běžně se používá kyslík obsažený ve vzduchu, což ale způsobuje naředění vyprodukovaného plynu dusíkem a snížení jeho výhřevnosti. Lze tomu předejít použitím čistého kyslíku, to ale způsobí navýšení investičních nákladů. Pro pokrytí tepelných nároků se v reaktoru spálí přibližně 20–25 % hm. paliva [27].

Alotermním zplyňováním získáme plyn s větší výhřevností a širší možností využití, ale je třeba zajistit přísun tepla pro reaktor, což způsobí navýšení nákladů. Jako zplyňovací médium se používá pára a přísun tepla se realizuje: předehřevem páry a paliva anebo otopem stěn reaktoru [27].

Výsledný syntézní plyn je třeba očistit od znečišťujících látek. To se provádí cyklóny, filtry, mokrymi vypírkami nebo katalytickými reaktory. Čištění lze rozdělit na nízkoteplotní a vysokoteplotní a jejich použití závisí na následném zpracování plynu. Ze syntézního plynu lze kromě vodíku vyrobit jiná alternativní paliva [27]. Vodík ze syntézního plynu se získává podobně jako při procesu pyrolýzy, což je znázorněno na obrázku (2.11). Výtěžek vodíku je závislý hlavně na typu biomasy, teplotě a poměru páry k biomase. Při parním zplyňování biomasy je výtěžek mnohem lepší než při rychlé pyrolýze. Účinnost procesu dosahuje až 52 % [19].

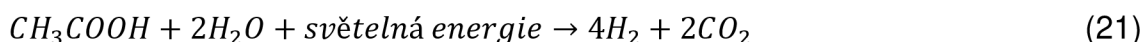


Obrázek 2.11 Diagram procesu zplyňování biomasy [19]

Při použití zplyňovače s fluidní vrstvou je možné dosáhnout produkce 60 % objemových vodíku. Díky tak vysoké účinnosti je zplyňování biomasy atraktivním způsobem výroby vodíku. Náklady na výrobu jsou rovněž konkurenceschopné s parním reformingem zemního plynu. Výroba vodíku z biomasy termochemickými procesy se ukázala jako velmi ekologická a ekonomicky atraktivní metoda. V blízké budoucnosti se očekává vývoj v této oblasti a produkce vodíku ve větší míře [26].

2.3.3 Fotofermentace

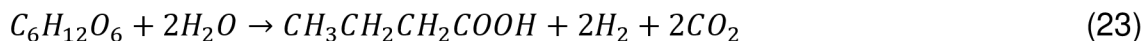
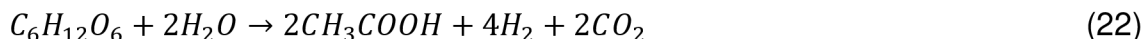
Fotosyntetizující bakterie mají schopnost produkovat vodík za pomoci nitrogénázy a při použití sluneční energie a organických kyselin nebo biomasy [26]. Fotofermentace se provádí při nedostatku dusíku. Bakterie přeměňují kyseliny na vodík a oxid uhličitý podle reakce (21) [28].



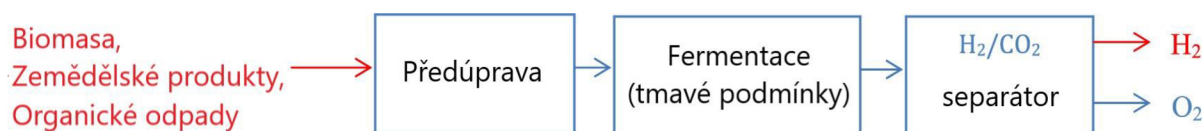
Větší intenzita světla stimuluje výtěžnost vodíku a rychlost reakce, ale snižuje účinnost přeměny světla. Přestože je produkce za osvětlených podmínek vyšší než za tmavých, využití této metody limituje její účinnost, komplikované foto-bioreaktory a dostupnost organických kyselin [19].

2.3.4 Tmavá fermentace

Během tmavé fermentace se primárně používá anaerobní bakterie za bezkyslíkových a tmavých podmínek. Pro fermentaci se používá substráty bohaté na uhlohydráty, přičemž lze uvést glukózu jako modelový příklad (22, 23) [19].



Glukóza, jakožto preferovaný zdroj pro tento proces, je poměrně drahá, ale lze ji získat ze zemědělského odpadu. Je možné použít rovněž jako alternativu suroviny obsahující škrob nebo celulózu, která je hlavní složkou rostlinné biomasy. Množství produkce vodíku velmi závisí na hodnotě pH, která by optimálně měla být udržována mezi 5–6. Dalším omezením je nutnost odvádět vyráběný vodík, aby nedocházelo ke zvýšení tlaku v reaktoru, jelikož vyšší tlak způsobuje pokles produkce vodíku [19]. Tmavá fermentace je poměrně jednoduchým procesem, který nepotřebuje zdroj světla a vodík tak lze vyrábět nepřetržitě ve dne i v noci. Kladným aspektem tohoto procesu je využití široké škály potenciálně využitelných surovin jako odpadních vod a jiných odpadních produktů [19].



Obrázek 2.12 Diagram procesu tmavé fermentace [19]

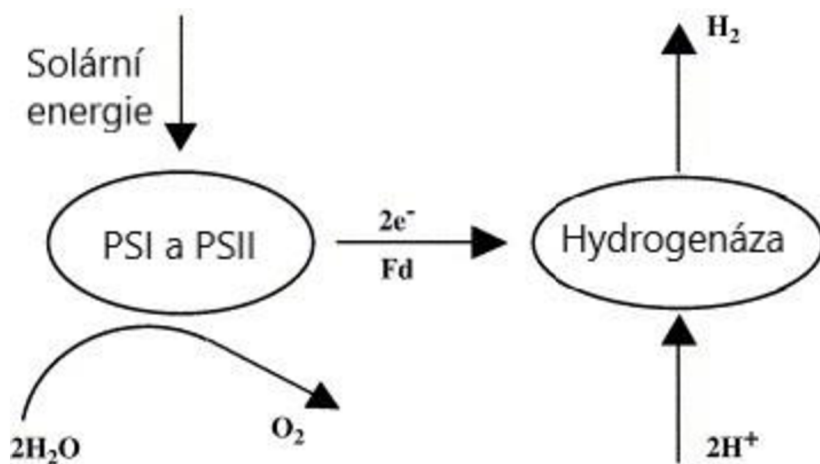
2.3.5 Biofotolýza

Biologický proces využívající stejný princip jako u fotosyntézy rostlin a řas. U biofotolýzy se používá řasy, které obsahují enzymy schopné za určitých podmínek produkovat vodík. Zvláště zelené a modrozelené řasy jsou schopné rozdělit vodu na kyslík a vodíkové ionty a to procesem přímé nebo nepřímé biofotolýzy [19].

Při přímé biofotolýze dochází k několika složitým reakcím, které zahrnují dva fotosyntézní systémy PSI a PSII. Systémy využívají schopnosti řas (např. *Chlamydomonas reinhardtii*) a sinic ke generování vodíkových a kyslíkových iontů [28]. Mikrořasy jako zelené a modrozelené řasy (Cyanobacteria) obsahují hydrogenázu a s její pomocí jsou schopny produkovat vodík. PSII absorbuje světelnou energii a generuje elektrony. Elektrony jsou dále transformovány na ferredoxin (Fd), za pomoci sluneční energie absorbované systémem PSI. Hydrogenáza přijímá elektrony z ferredoxinu a z vodíkových iontů vytváří vodík. Tento proces lze zapsat reakcí (24) [26].

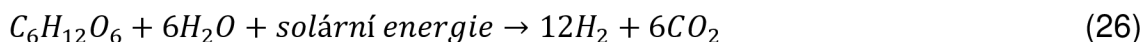
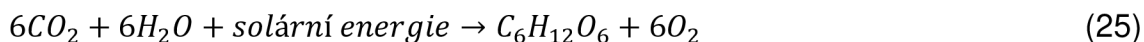


Důležité je udržovat obsah kyslíku do 0,1 %, jelikož je na něj hydrogenáza velice citlivá. Tuto podmínku jsou schopné zajistit specializované mikroorganismy jako zelené řasy. Nevýhodou této technologie je velmi nízká účinnost 5 %. Díky odvození mutantů z mikrořas, kteří zvyšují produkci vodíku a nejsou tak citliví na kyslík, se podařilo dosáhnout vyšší účinnosti, ale pouze na 15 % [28].

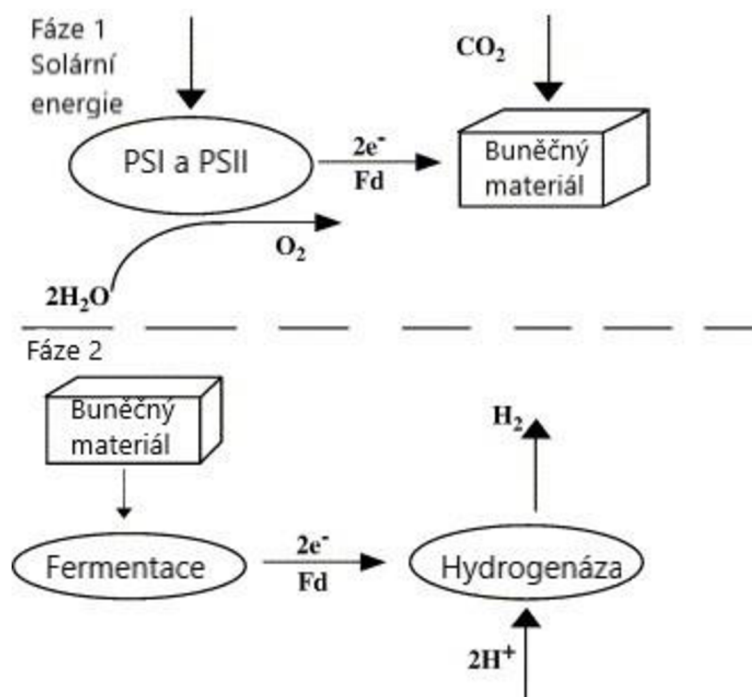


Obrázek 2.13 Schéma přímé biofotolýzy [26]

Nepřímá biofotolýza využívá cyanobakterii a lze ji zapsat reakcemi (25, 26). Celý tento proces se skládá ze čtyř kroků: produkce biomasy fotosyntézou, koncentrace biomasy, aerobní tmavá fermentace a konverze acetátu na vodík. Produkce probíhá jak hydrogenázou, tak nitrogenázou [28].



Studie nepřímé biofotolýzy, při které byla použita cyanobakterie *gloeocapsa alpicola*, zjistila, že pro optimální produkci vodíku je třeba udržovat pH média na hodnotách 6,8–8,3. Zvýšení produkce je možné dosáhnout rovněž zvýšením teploty [26].



Obrázek 2.14 Schéma nepřímé biofotolýzy [26]

2.4 Porovnání vybraných metod výroby

V současné době se vodík vyrábí hlavně z fosilních paliv. Tyto metody představují rozvinutou a vyspělou technologii výroby prostřednictvím již existujících infrastruktur. Ve srovnání s jinými metodami poskytují efektivnější přeměnu energie (až 85 %) a jsou rovněž ekonomicky nejvýhodnější. Naproti tomu závislost těchto metod na fosilních palivech v kombinaci s vysokou produkcí emisí oxidu uhličitého vede k většímu výzkumu v oblasti alternativních metod výroby a snaze vyrábět vodík pomocí obnovitelných zdrojů energie. Momentálně je celková účinnost výroby vodíku elektrolýzou vody velmi nízká, a proto se v této oblasti provádí mnoho výzkumů, jelikož se počítá, že právě elektrolýza by mohla v budoucnu hrát zásadní roli v produkci H₂ [19, 22].

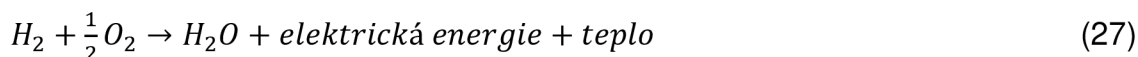
Tabulka 4 - Porovnání metod výroby vodíku [19, 22].

Metody výroby	Účinnost procesu (%)	Výhody	Nevýhody	Cena výroby (\$/kg H ₂)
Zplyňování uhlí	60	Osvědčena technologie	Závislost na fosilních palivech	1,63
Parní reforming	74–85	Vyspělá technologie a stávající infrastruktura	Závislost na fosilních palivech a emise CO ₂	2,27
Parciální oxidace	60–75	Zavedená technologie, infrastruktura	Emise CO ₂ , vznik těžkých olejů a ropného koksu	1,48
Elektrolýza	60–80	Známá technologie, nulové emise	Malá celková účinnost, vysoká cena	10,30
Termolýza	20–45	Čistá a udržitelná metoda	Vysoké investiční náklady, koroze	8,00
Fotoelektrolýza	0,06	Bezemisní metoda, jediný produkt O ₂	Velmi nízká účinnost, vyžaduje sluneční světlo	8,00–10,00
Pyrolýza biomasy	35–50	Použití levné suroviny, CO ₂ neutrální	Kolísavá výtěžnost H ₂ , tvorba dehtu	1,59–1,70
Zplyňování biomasy	30–40	Použití levné suroviny, CO ₂ neutrální	Kolísavá výtěžnost H ₂ , tvorba dehtu	1,77–2,05
Fotofermentace	0,1	Recyklace odpadů, CO ₂ neutrální	Nízká účinnost, velké reaktory, citlivost na O ₂	2,83
Tmavá fermentace	60–80	Jednoduchá metoda, CO ₂ neutrální	Nízká výtěžnost H ₂ , objemné reaktory	2,57
Biofotolýza	10–11	Spotřeba CO ₂ , vedlejší produkt je kyslík	Potřeba světla, nízká výtěžnost H ₂ , náklady	2,13

3 Využití vodíku

3.1 Palivové články

Palivový článek je elektrochemické zařízení, které za pomoci vodíku a kyslíku vyrábí elektrickou energii. Díky absenci spalování nevytváří žádné škodlivé emise, ale jediným vedlejším produktem je voda a teplo. V podstatě v palivovém článku probíhá elektrolyza v opačném směru. Palivový článek se skládá ze dvou elektrod, které odděluje elektrolyt. Anoda přijímá vodík a katoda shromažďuje kyslík. Katalyzátor na anodě rozkládá vodík na elektrony a kladně nabitě vodíkové ionty, ty dále migrují přes elektrolyt na katodu, kde se slučují s kyslíkem za vzniku vody [29]. K pohybu elektronů dochází pouze v případě připojení externího obvodu, tím pádem je celý obvod uzavřený. Elektrolyt je navržený tak, aby umožňoval pouze tok iontů a ne elektronů, zároveň zabraňuje smísení reaktantů. Celkovou reakci v palivovém článku lze zapsat rovnicí (27) [30].



Různé typy palivových článků se rozlišují podle použitého elektrolytu, provozních podmínek a vstupního paliva. Existuje více typů používaných elektrolytů v pevném nebo kapalném stavu, které pracují při vysokých nebo nízkých teplotách. Palivové články pracující za nízkých teplot potřebují katalyzátor k urychlení chemické reakce. Nejčastěji používaným katalyzátorem je platina (Pt), která ovšem výrazně zvyšuje cenu. Primárně se jako palivo používá čistý vodík, ale pro některé typy PČ je možné použít například metanol, etanol nebo zemní plyn. Čistý vodík má ovšem oproti jiným palivům vyšší elektrochemickou reaktivitu [31].

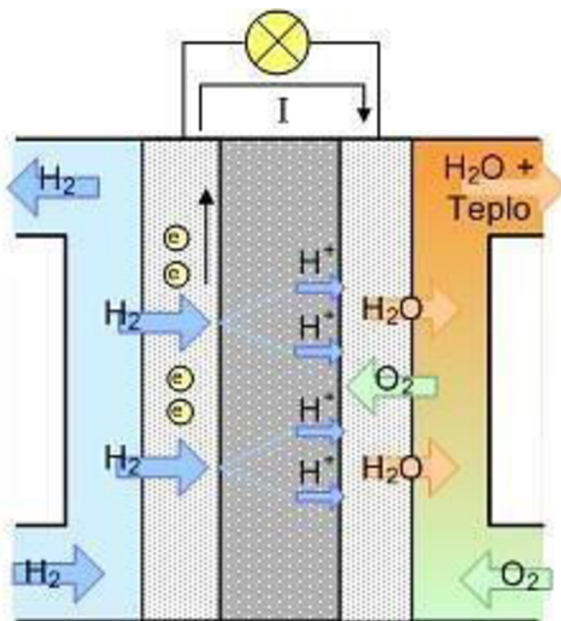
Druh membrány PČ určuje jeho provozní charakteristiky a především teplotu. Jestliže provozní teplota přesahuje 600 °C, je považován za vysokoteplotní, a to umožňuje použití uhlovodíkových paliv. Ty se přímo v PČ díky zvýšené teplotě reformují na vodík. Za nízkoteplotní se považují PČ fungující při teplotách pod 250 °C [31].

3.1.1 Palivové články s polymerní membránou (PEMFC)

Zvané také palivovými články s výměnou protonů. Článek se skládá z elektrolytu neboli membrány tvořené pevným polymerem s provozní teplotou 70–90 °C a dvou elektrod. Membrána umožňuje tok protonů H^+ z anody na katodu. Typické napětí PEMFC je 1,1 V a lze ho navýšit zapojením vícero článků do série. Elektrochemické reakce zde probíhající je možné zapsat reakcemi (28, 29) [31].



V PEMFC je reakce vodíku na anodě aktivována katalyzátorem za vzniku vodíkového iontu (protonu) a elektronu. Proton přechází přes membránu, zatímco elektron proudí z anody do vnějšího obvodu a vytváří elektrickou energii. Elektron poté proudí zpět na katodu a reaguje s kyslíkem a vodíkovým iontem a vytváří vodu [31].



Obrázek 3.1 Palivový článek s polymerní membránou [33]

Z hlediska účinnosti platí, čím vyšší pracovní teplota, tím je vyšší účinnost. Nicméně teplota nad 100 °C způsobí odpařování vody, což vede k dehydrataci membrány a snížení její protonové vodivosti. Nejčastěji se elektrická účinnost pohybuje v rozmezí 40–50 % a výkon může být až 250 kW. Systémy PEMFC se uplatnily především v přenosných aplikacích. Převážně se tyto systémy využívají v dopravních prostředcích, protože poskytují nepřetržitý přísun energie, vysokou účinnost, dobrý výkon a vyžadují minimální údržbu [32]. Nevýhodou těchto palivových článků je problémové odvádění tepla a vody ze systému a potřeba čistého vodíku jako paliva. Přesto je PEMFC slibným kandidátem na nahrazení spalovacích motorů ve vozidlech a v letectví [31].

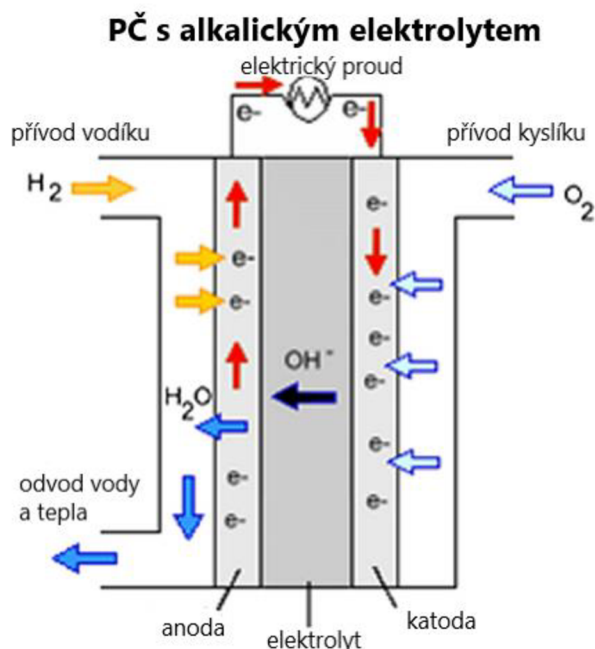
3.1.2 Palivové články s alkalickým elektrolytem (AFC)

AFC palivový článek používá jako elektrolyt alkalický roztok, jakým je například NaOH nebo KOH, a pracuje při teplotách 23–70 °C. Kvůli své vysoké vodivosti je nejvíce používaným elektrolytem roztok KOH [31]. Na anodě je plynný vodík kombinovaný se záporně nabitými hydroxylovými ionty. Společně vytvářejí molekuly vody a elektrony podle reakce (30). Elektrony putují vnějším obvodem na katodu, kde reagují s vodou a kyslíkem za vzniku hydroxylových iontů, což lze zapsat reakcí (31) [32].



AFC články jsou klasifikované jako palivové články s nízkou provozní teplotou a nízkonákladovými katalyzátory. Platínu, kterou se nejčastěji používá jako katalyzátor, lze zde nahradit niklem nebo slitinami niklu. Účinnost alkalických článků je okolo 60 % a jsou schopné dosáhnout výkonu 20kW [31]. Hlavní nevýhodou AFC je nesnášenli-

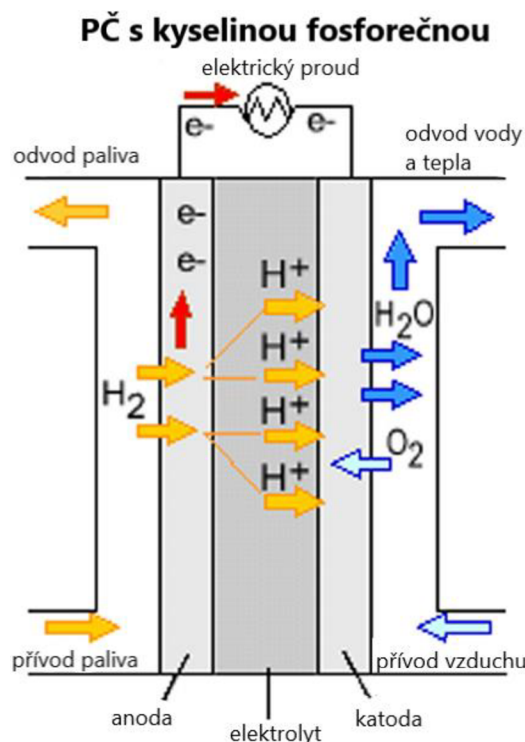
vost elektrolytu (roztok KOH) s oxidem uhličitým, tyto látky spolu reagují a vytváří uhličitan draselný. Tato uhličitanová sůl snižuje iontovou vodivost elektrolytu, a tím způsobuje pokles celkového výkonu a účinnosti. Z toho důvodu je třeba přiváděný vzduch čistit nebo používat čistý kyslík. V současné době se alkalické palivové články nejvíce využívají v ponorkách, na lodích a ve vysokozdvizných vozících [31].



Obrázek 3.2 Palivový článek s alkalickým elektrolytem [34]

3.1.3 Palivové články s kyselinou fosforečnou (PAFC)

Jako elektrolyt se u tohoto palivového článku používá kyselinu fosforečnou. Článek pracuje za teplot 150–220 °C, protože při této teplotě je iontová vodivost kyseliny neoptimálnější. Elektrochemické reakce zde probíhající jsou podobné reakcím v PEMFC. Z důvodu vyšší provozní teploty je tento článek atraktivní pro aplikace kombinované výroby elektrické energie a tepla. Jelikož oxid uhličitý nijak nereaguje s elektrolytem a neovlivňuje výkon článku, používá se místo čistého kyslíku vzduch [31]. Nevýhodou je vyšší cena z důvodu použití Pt katalyzátoru, nižší iontová vodivost a omezený rozsah konstrukčních materiálů z důvodu vysoké provozní teploty. V současné době dosahují systémy PAFC výkonu do 200 kW a ve fázi testování jsou systémy schopné dosáhnout až 11 MW. Elektrická účinnost tohoto typu palivového článku se pohybuje mezi 40–50 % [32].



Obrázek 3.3 Palivový článek s kyselinou fosforečnou [35]

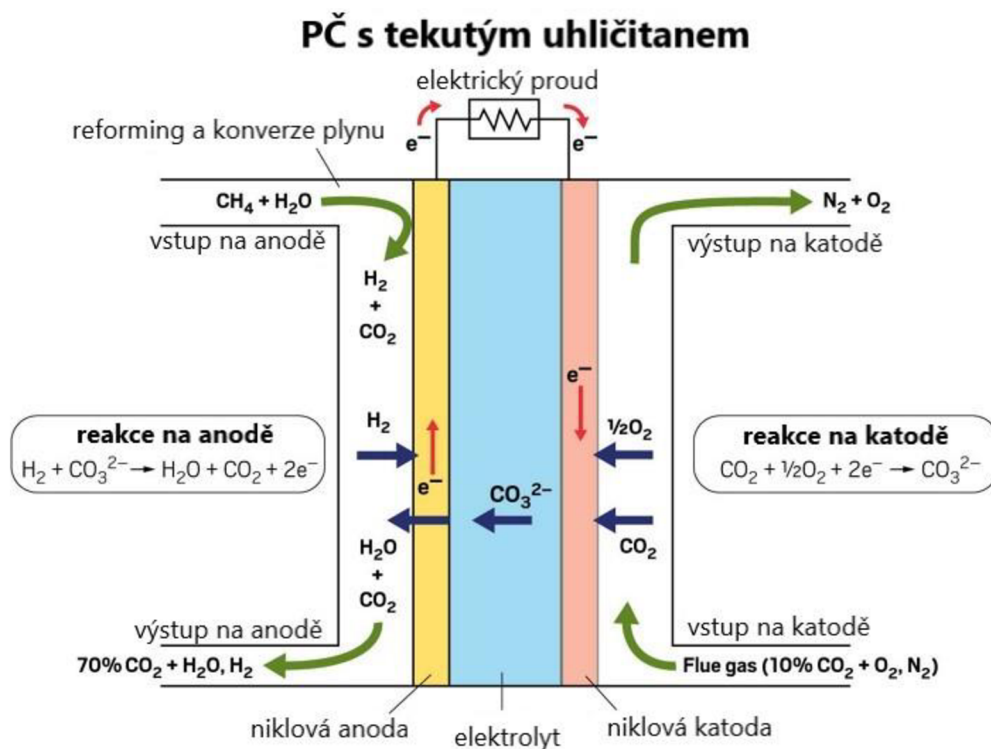
3.1.4 Palivové články s tekutým uhličitánem (MCFC)

Palivové články s tekutým uhličitánem se řadí mezi vysokoteplotní články, protože pracují při teplotách 550–700 °C. Elektrolytem jsou zde roztavené uhličitánové soli, zejména se používá uhličitán lithný a draselný. Elektrody jsou vyráběné z prášků na bázi niklu [31]. V MCFC dochází na anodě k reakci vodíku s uhličitánovým iontem, které spolu tvoří oxid uhličitý, vodu a elektrony. Jeli článek poháněn jiným palivem než vodíkem, dochází na anodě nejprve k reformaci paliva. Oxid uhelnatý vzniklý reformací paliva je dále spotřebováván elektrochemickou reakcí s uhličitánovým iontem. Při použití metanu je celý tento proces popsán reakcemi (32, 33, 34, 35) [32].



Na katodě dochází k redukci a tvorbě nových uhličitánových iontů, které proudí přes elektrolyt na anodu. Redukci lze zapsat rovnicí (36) [32].





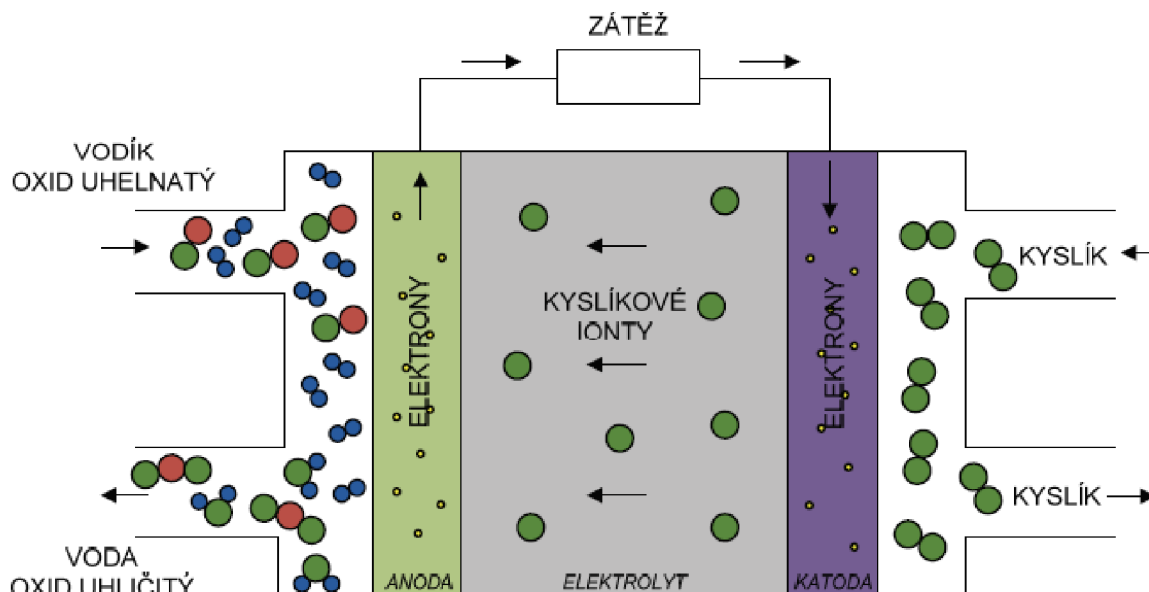
Obrázek 3.4 Palivový článek s tekutým uhličitánem [36]

V současné době se MCFC používá v elektrárnách na zemní plyn a uhlí, v průmyslových a vojenských aplikacích. Článek může být poháněn vodíkem, oxidem uhelnatým, zemním plynem a propanem. Nepotřebuje katalyzátory z ušlechtilých kovů, protože pracuje při vysokých teplotách, což snižuje pořizovací náklady. Na druhou stranu z důvodu vysokých provozních teplot může docházet ke korozi [32].

3.1.5 Palivové články s tuhými oxidy (SOFC)

Dalším vysokoteplotním palivovým článkem je SOFC, který pracuje za teplot dosahujících 600–1100 °C. Pevný elektrolyt je často vyráběn z ytrium stabilizovaného zirkonia (YSZ) a to z důvodu jeho vysoké tepelné a chemické stability a dobré iontové vodivosti. Na materiál pro katodu jsou kladeny specifické požadavky jako je tepelná stabilita, stabilní iontová vodivost a katalytická aktivita. Jedním z vhodných materiálů je lanthan stronťatý manganit (LSM). Anoda může být vyrobena z YSZ na bázi niklu, to má za následek urychlení oxidační reakce vodíku [31]. Na katodě dochází za vysoké teploty k oxidaci kyslíku na oxidový iont, zatímco na anodě tyto ionty reagují s vodíkem za vzniku vody a elektronů. Reakce je možné zapsat rovnicemi (37, 38) [32].





Obrázek 3.5 Palivový článek s tuhým oxidem [37]

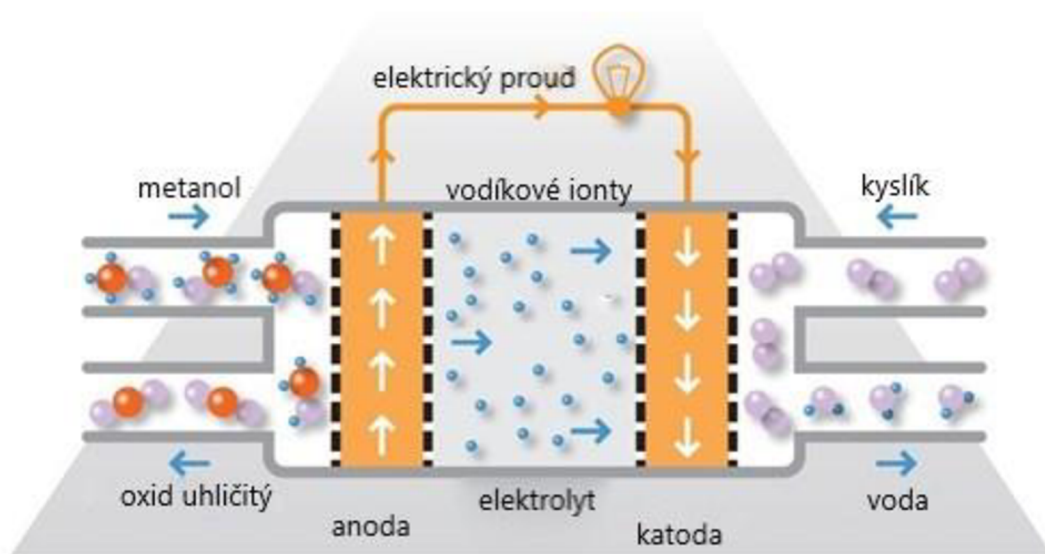
Palivový článek s tuhými oxidy má mnoho předností. Při využití odpadního tepla pro kogeneraci dosahuje účinnosti až 80 %. Pro jeho konstrukci není potřeba ušlechtilých kovů, čímž ho činí cenově dostupným. Může využívat různé typy paliv, včetně metanolu a bioplynu. Má bezhlučný provoz a nízké náklady na údržbu. Nevýhodou je dlouhá doba spouštění a různé problémy s mechanickou a chemickou kompatibilitou. Často je používán jako místní systém výroby energie pro oblasti bez přístupu k veřejné síti [32].

3.1.6 Palivové články pro přímou reakci metanolu (DMFC)

Tento palivový článek je velmi podobný PEMFC, jelikož jako elektrolyt používá také membránu. Jako palivo používá metanol, případně ho lze nahradit etanolem nebo jiným alkoholem. Na anodě se metanol reformuje na oxid uhličitý, vodíkové ionty a elektrony, zatímco na katodě se z kyslíku získaného ze vzduchu vytváří voda nebo vodní pára. To se děje podle reakcí (39, 40) [32].



Metanol je přiváděn ve formě páry nebo kapaliny. Z hlediska napětí článku a jeho výkonu je efektivnější metanol ve formě páry. Na druhou stranu tato pára způsobuje dehydrataci membrány, snižuje životnost a je vyžadována vyšší teplota pro odpaření paliva. Z toho důvodu je zapotřebí složitější a nákladnější reformátor. Tento typ není příliš vhodný pro přenosné aplikace [32].



Obrázek 3.6 Palivový článek pro přímou reakci metanolu [38]

3.1.7 Porovnání jednotlivých typů palivových článků

Palivové články jsou schopné produkovat široký rozsah energie, a proto je lze použít v téměř jakékoliv aplikaci, která vyžaduje elektrickou energii. Použití konkrétního typu článku závisí na tom, která technologie je nejvhodnější pro danou aplikaci. Jedno z možných využití palivových článků je v elektronických zařízeních, jako jsou mobilní telefony a počítače. Mezi středně výkonné energetické aplikace patří osobní vozidla, veřejná doprava a domácí spotřebiče. Nejvýkonnější palivové články se využívají v energetických distribučních sítích [32].

V tabulce (5) je uveden souhrn provozních parametrů, účinností a možných aplikací jednotlivých typů palivových článků.

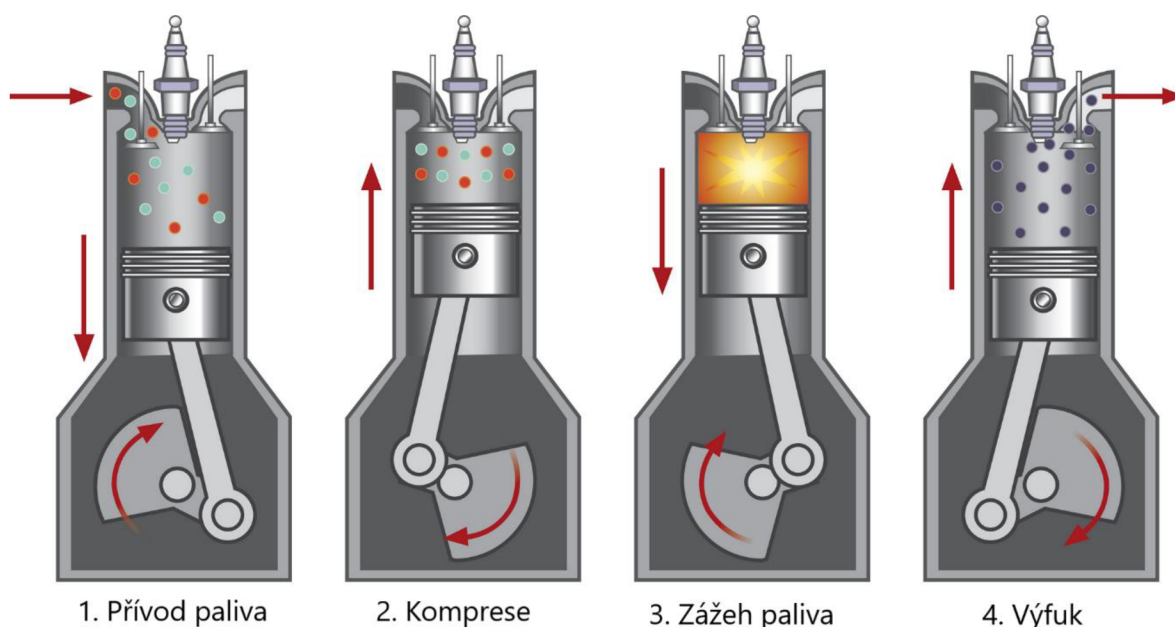
Tabulka 5 - Porovnání vlastností palivových článků [31, 39]

Typ palivového článku	Účinnost (%)	Provozní teplota (°C)	Výkon	Palivo	Použití
PEMFC	50–70	80	1 W–500 kW	Vodík	Záložní napájení, přenosný výkon, speciální vozidla a přeprava
AFC	60–70	23–70	10 W–200 kW	Vodík	Ponorky, armádní a vesmírná technika, záložní zdroj
PAFC	55	180	50 kW–1 MW	Vodík	Decentralizovaná výroba el. energie
MCFC	55	550–700	1 kW–1 MW	Metan, vodík	Decentralizovaná výroba el. energie, záložní zdroj
SOFC	60–65	700–1000	5 kW–3 MW	Metan, vodík	Pomocný výkon, decentralizovaná výroba el. energie
DMFC	35–60	60–200	1 W–100 kW	Metanol	Mobilní telefony, počítače a přenosná zařízení

3.2 Spalování vodíku

Kromě uplatnění vodíku jako paliva pro palivové články, lze vodík rovněž spalovat v plynových turbínách za účelem výroby tepla nebo elektrické energie. V současné době se však tento způsob využití vodíku příliš neuplatňuje. Je to způsobeno konstrukčními požadavky na hořáky a emisemi NO, které lze však řešit zředěním vodíku s vodní párou nebo dusíkem. Hlavní důvod těchto problémů spalování je vyšší reaktivita vodíku ve srovnání se zemním plynem. Problémem spalování vodíku je také nestabilita plamene a riziko zpětného rázu. Aktuálně probíhají výzkumy v této oblasti za účelem vyřešení daných problémů a vyvinutí efektivní a komerčně použitelné technologie spalování vodíku [40].

Vodík však lze použít jako palivo také přímo ve spalovacích motorech, které jsou velmi podobné benzínovým motorům se zážehovým zapalováním. Tento chemický proces je totožný s tradičním spalováním, jenom místo fosilních paliv se spaluje vodík. Zážehový motor se skládá z válce a jednoho nebo více pohyblivých pístů. Jeho fungování je znázorněno na obrázku (3.7) [41].



Obrázek 3.7 Fungování zážehového motoru [41]

3.2.1 Vodíkové spalovací motory

První spalovací motor na vodík byl zkonstruován už v roce 1804 francouzsko-švýcarským vynálezcem Isaacem de Rivazem. Dnes tyto motory prokazují schopnost efektivně pohánět různá vozidla od automobilů po autobusy. V současnosti se také pracuje na pohonu letadel [41]. Vzhledem k širokému rozsahu hořlavosti je vodík vynikajícím kandidátem pro použití v zážehových motorech. Díky vysoké teplotě samovznícení, zpoždění úplného zapálení a vysoké rychlosti šíření plamene mají vozidla s vodíkovým spalovacím motorem (HICE) menší tendenci ke klepání motoru oproti benzínovým motorům. Vodík nelze přímo použít v naftovém nebo benzínovém motoru z důvodu zmíněné vysoké teploty samovznícení. V dieselových motorech se proto používá zapalovací svíčky nebo malé množství nafty k zapálení plynu, známé jako pilotní zapalování [4].



Obrázek 3.8 Vodíkový spalovací motor [42]

Vozidla HICE lze pohánět konvekčním způsobem nebo jako hybridní HICE vozidla. U konvekčního pohonu motor spalující vodík mechanicky pohání kola vozidla, podobně jak tomu je u benzínových motorů. Zatímco v hybridních HICE vozidlech motor pohání elektrický generátor, který vytvořeným elektrickým proudem pohání kola vozidla a bývá často rozšířen o napájení z baterie nebo ultrakondenzátoru [4]. Nejčastějším problémem u vodíkových spalovacích motorů je tzv. preignice. Předčasné vznícení nastane, když se palivová směs zapálí ve spalovací komoře dříve, než jí zapálí zapalovací svíčka. To způsobí nárůst tlaku ve válcích, akustické oscilace a neefektivní běh motoru. Preignici lze zabránit identifikací jejich zdrojů a následně k tomu uzpůsobenou konstrukcí motoru [4].

V současnosti již bylo představeno několik HICE vozidel, ze kterých jsou některá i komerčně dostupná. Jejich komerční využití však brzdí chybějící infrastruktura pro tankování, jejich stále vysoká cena a cena vodíku [4]. Ve vývoji těchto vozidel se nejvíce angažují automobilky BMW, Mazda a Ford. Automobilka BMW vydala v roce 2007 model BMW Hydrogen 7, což je vozidlo s dvanáctiválcovým spalovacím motorem. Má dvě nádrže na vodík a benzín, mezi kterými může za pomoci tlačítka přepínat [43].



Obrázek 3.9 BMW Hydrogen 7 [44]

3.2.2 Vodíkový pohon H2i

Jedním z příkladů vodíkových spalovacích motorů je technologie H2i. Jedná se o systém výroby a spalování vodíku společně s primárním palivem za účelem pohonu vozidla. Hlavní částí je titanový článek, který vysokofrekvenční elektrolýzou vyrábí přesné množství plynného vodíku. Tento tzv. vodíkový generátor produkuje pomocí palubního napětí 12–15 V velmi čistý vodík a kyslík [45]. Nenachází se zde žádná tlaková nádoba, vodík je skladován ve formě vody a po jeho přeměně na plyn je ihned spotřebováván. Celý proces začíná nastartováním auta. V tom momentě začíná elektrolýzér vyrábět z vody vodík a ten je vzduchovým sáním okamžitě přisáván do motoru. Dávkování vodíku je konstantní a nelze ho nijak měnit, ani sešlápnutím plynového pedálu. Sání motoru je rovněž neměnné a všechny vyráběný vodík je spotřebováván. Systém se vypne po vypnutí motoru [45].

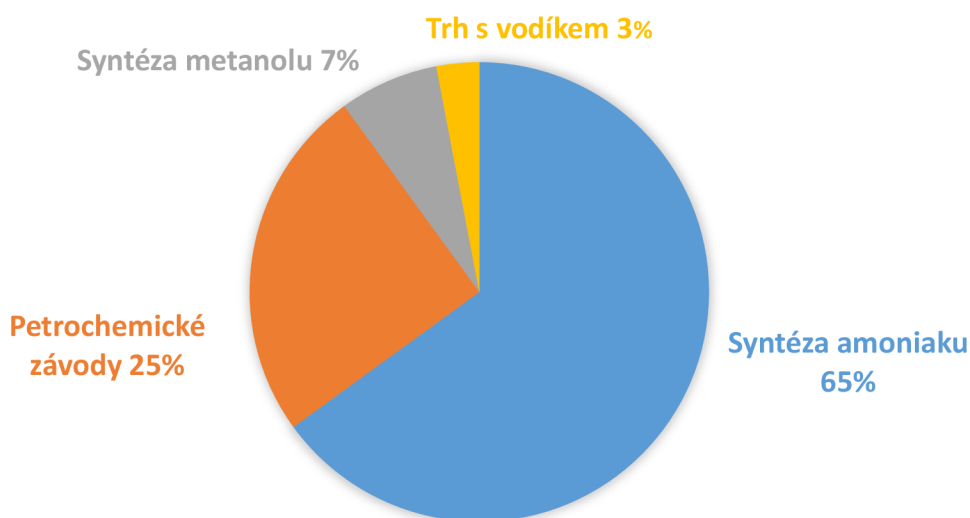


Obrázek 3.10 Plakát výhod technologie h2i [45]

Vodík společně s kyslíkem podporují proces spalování fosilního paliva v motoru. Toto aditivum se nejčastěji používá v poměru 66 % vodíku a 34 % kyslíku. Technologie H2i zbavuje nánosů v motoru, které jsou způsobeny nedokonalým spalováním fosilních paliv [45]. Tento systém je schopen tyto nánosy postupně odstranit a dále udržovat motor v dobré kondici. Motory se systémem H2i díky dekarbonizaci, efektivnějšímu spalování, nižší teplotě spalin a nízkým emisím dosahují vyššího výkonu, rychlejší akcelerace i za vyšší rychlosti a vykazují vysokou spolehlivost [45].

3.3 Vodík jako chemická surovina

Vodík je základní surovinou pro výrobu dalších potřebných látek. Často je využíván v průmyslu chemickém, metalurgickém, petrochemickém, elektrotechnickém a potravinářském. Je to příklad látky, která se vyrobí a spotřebuje v rámci jednoho závodu. Pouze 3 % vyrobeného vodíku jde na trh [46]. Přibližně 65 % vyprodukovaného vodíku je spotřebováno při syntéze amoniaku, respektive výrobě hnojiv. Dalších 25 % je použito při rafinaci a hydrogenaci ropy v petrochemických závodech, kde se nejčastěji vodík přímo pro tyto účely vyrábí. Zhruba 7 % se využívá pro syntézu metanolu či jiných syntetických paliv [46].



Obrázek 3.11 Způsob využití vyrobeného vodíku ve světě [vlastní tvorba]

3.3.1 Amoniak

Amoniak (čpavek) je jednou z klíčových chemických látek, která je široce používána v moderním průmyslu a zemědělství. Pro svůj vysoký obsah vodíku (17,6 % hmotn.), vysokou hustotu energie (4,25 kWh/l) a snadný způsob skladování a přepravy může sloužit rovněž jako slibný bezuhlíkový nosič energie [47]. V současnosti se pro průmyslovou výrobu amoniaku používá Haberův-Boschův proces. Proces spočívá v reakci dusíku s vodíkem za vysoké teploty (400–500 °C) a tlaku (10–30 MPa) a za přítomnosti kovového katalyzátoru [47].

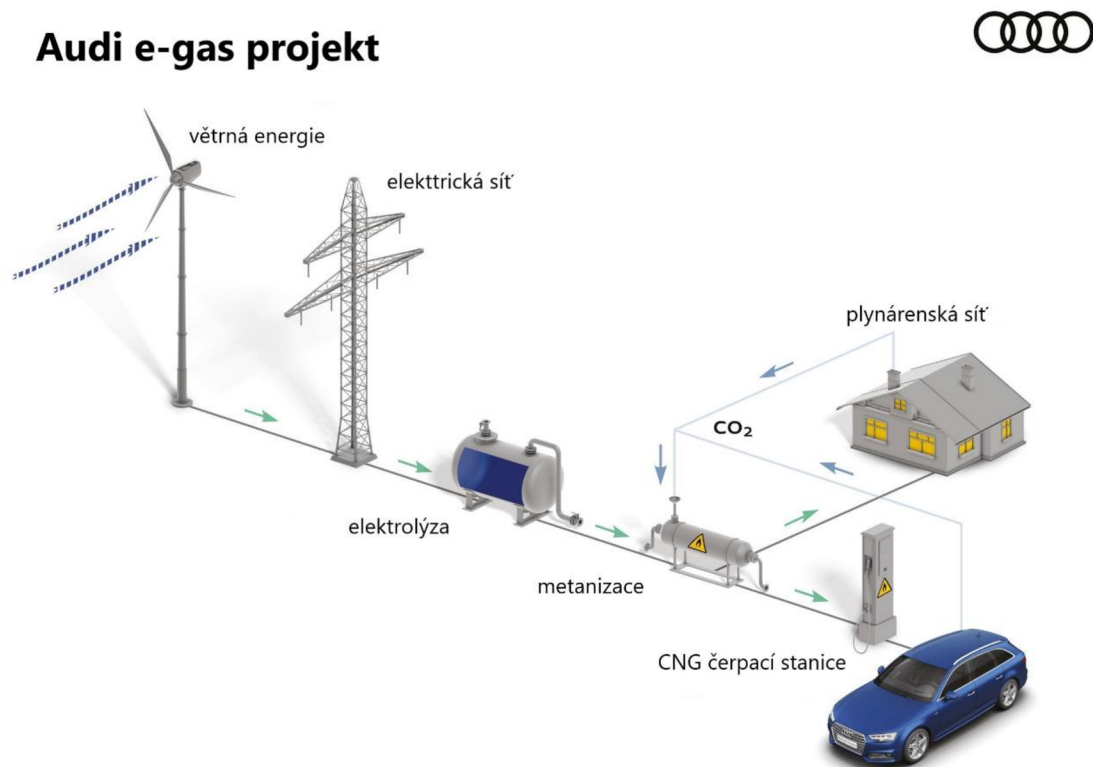


Pro uskutečnění reakce je katalyzátor nezbytný, protože způsobí disociaci dusíku a vodíku na monoatomické částice, které jsou mnohem reaktivnější. Celosvětově se amoniaku vyrábí přibližně 180 milionu tun ročně (rok 2017), což spotřebovává 1–2 % celkové spotřeby energie ve světě. Až 80 % vyrobeného amoniaku se dále používá na výrobu hnojiv, dále je užíván k výrobě kyseliny dusičné, která je zpracovávána na výrobu výbušnin, plastu, barviv a léčiv [48].

3.3.2 Syntetická paliva

Syntetická paliva (e-paliva, zelená paliva) slouží jako médium pro uchování energie. Jsou také stejně využitelná jako jejich fosilní protějšky, a to jak energeticky pro pohon vozidel nebo vytápění, tak jako materiál pro výrobu plastů, kosmetiky a dalších. Syntetická paliva se vyrábí z vodíku získaného elektrolýzou vody za pomoci čisté elektrické energie [49]. Kromě vodíku je zároveň potřebný také uhlík. Oxid uhličitý se nejčastěji zachytává ze spalin za pomoci technologie CCS, popřípadě novější technologii DAC, která má však stále několik nedostatků. Jedním z nich je vysoká energetická náročnost. Dva základní procesy pro výrobu syntetických paliv jsou Sabatierova reakce, která se používá pro výrobu syntetického metanu, a Fischer-Tropschova syntéza, která společně s procesy od ní odvozenými slouží k vytváření různých kapalných uhlovodíků (e-nafta, e-benzín, e-ethanol) [49].

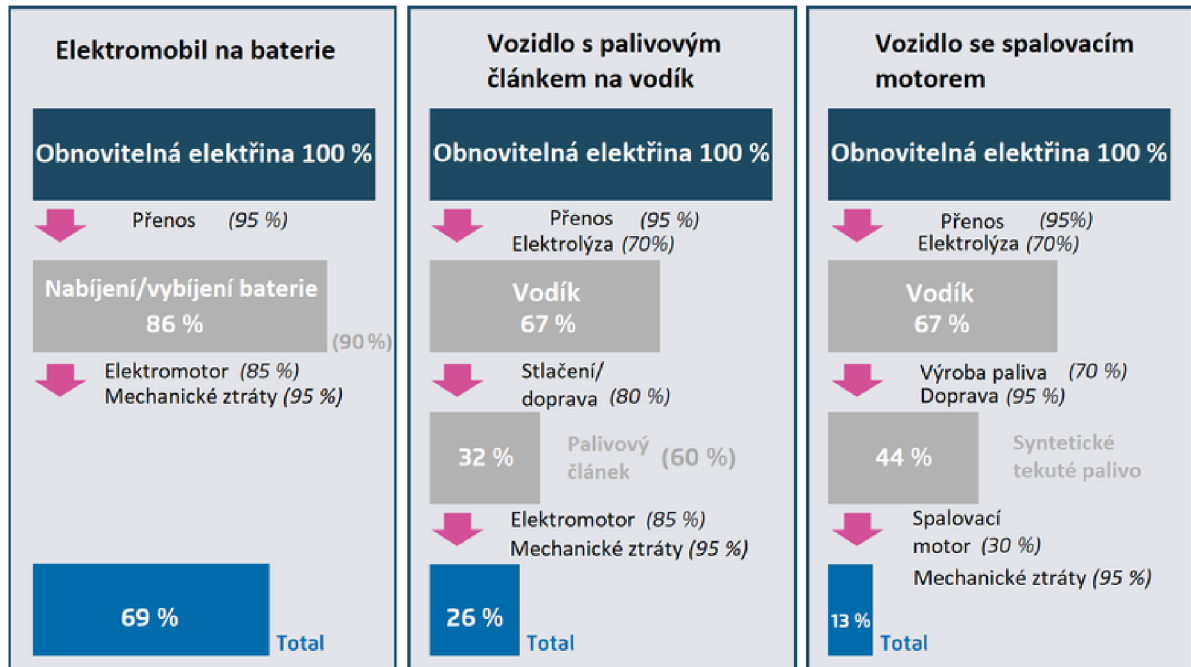
Jako příklad je zobrazen na obrázku (3.12.) proces, kde společnost Audi a její partneři vyrábějí tzv. Audi e-gas (syntetický metan) [50].



Obrázek 3.12 Schéma výroby syntetického metanu společnosti Audi [50]

Výhodami syntetických paliv jsou jejich uhlíková neutralita, možnost dlouhodobého skladování energie a jejich čistota, jelikož neobsahují žádné nežádoucí příměsi jen uhlík a vodík. S jejich pomocí lze dekarbonizovat sektory, které se bez fosilních paliv neobejdou, například výroba plastů. Jelikož se téměř neliší od fosilních paliv, mohou využívat jejich infrastrukturu pro skladování a dopravu. Případně je možné míchat syntetická paliva s fosilními palivy [49]. Nevýhodou těchto paliv je však jejich náročná výroba. Důvodem je snaha o minimalizaci emise CO₂, což komplikuje jejich výrobu a

zvyšuje náklady a energetickou náročnost těchto procesů. Právě energetická náročnost a s tím spojené energetické ztráty způsobené přeměnami energie do konečné podoby, jsou hlavní překážkou této technologie. Na obrázku (3.13) je ilustrativně znázorněno, jak velký vliv mohou mít energetické ztráty na konečnou účinnost pohonů vozidel [49].

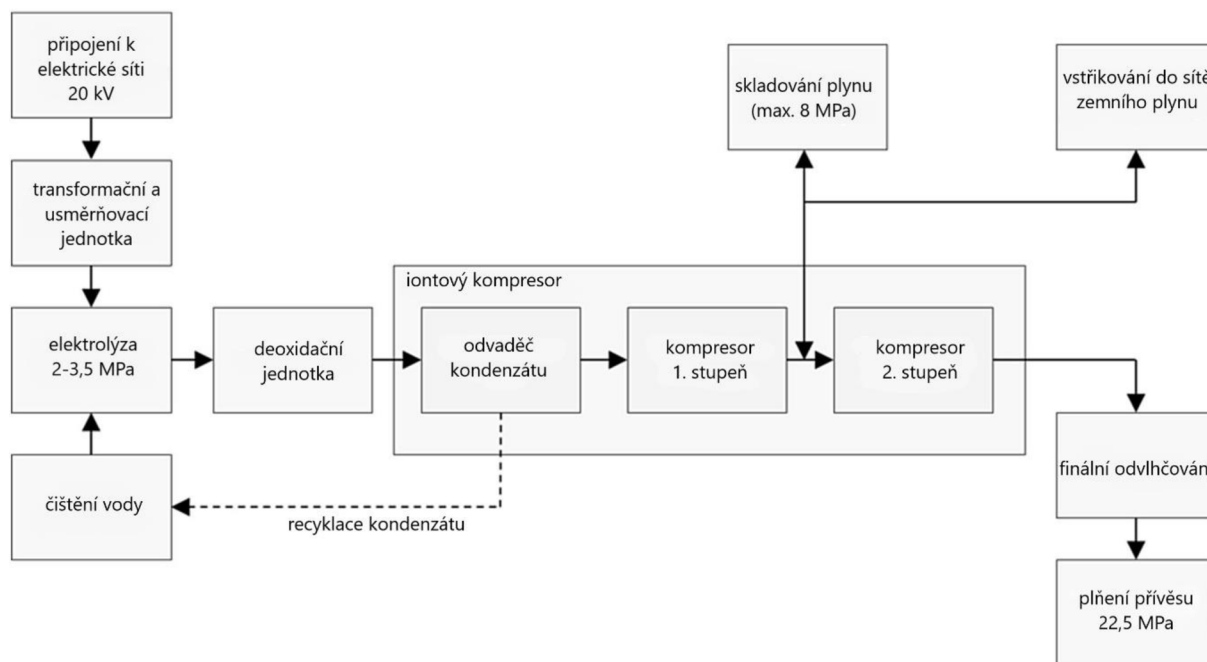


Obrázek 3.13 Porovnání účinností vybraných pohonů [49]

4 Vybrané pilotní projekty

4.1 Energiepark Mainz

V roce 2015 byl v německém Mohuči oficiálně zahájen provoz zařízení Energiepark Mainz. Jedná se o doposud největší zařízení na výrobu vodíku pomocí obnovitelných zdrojů energie a zároveň systém přeměny a akumulace energie P2G. Energiepark využívá přebytečnou energii ze sousedních větrných elektráren k výrobě zeleného vodíku a to pomocí tří PEM elektrolyzérů. Ty dosahují celkového špičkového výkonu až 6 MW. Vyroběný vodík je stlačován iontovým kompresorem ve dvou stupních až do 22,5 MPa. Vodík je následně uskladněn a použit v případě potřeby [51].



Obrázek 4.1 Diagram systému P2G v Energiepark Mainz [52]

Surový vodík je veden z elektrolyzátorů přes katalyzátor, aby se přeměnil zbytkový kyslík na vodní páru. Většina vlhkosti kondenzuje před a po kompresi a kondenzát je recyklován zpět do elektrolyzátorů [52]. Stlačený vodík je uskladněn v tlakových nádobách nebo může být rovnou vstříkovan do soustavy zemního plynu. Následně po průchodu druhým stupněm komprese se vodík ještě vysuší a může být dodáván do čerpacích stanic nebo pro potřeby chemického průmyslu [52].

Vodík je možné vstříkovat do vysokotlaké rozvodné sítě zemního plynu, která zásobuje zdejší okres Mainz-Ebersheim. Vodíku se do zemního plynu přimíchává v poměru 0–15 %, následně je tato směs využívána v běžných aplikacích připojených k této síti, jakými jsou topné systémy, plynové hořáky a elektrárny [51]. Hlavním cílem Energiepark Mainz je vývoj, testování a aplikace technologii výroby vodíku pomocí elektrolyzy vody a použití systému P2G pro akumulaci energie [52].



Obrázek 4.2 Elektrolyzéry na výrobu vodíku v hale Energiepark Mainz [51]

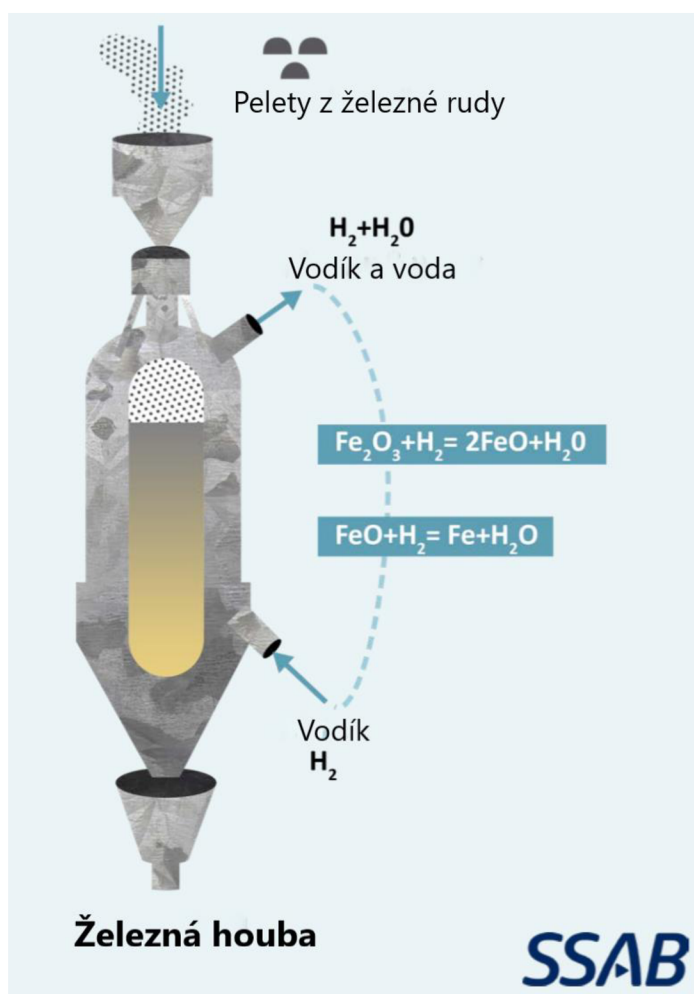
4.2 HYBRIT

Iniciativa HYBRIT vytvořená společnostmi SSAB, LKAB, Vattenfall a podporována Švédskou energetickou agenturou má za cíl vyvinout technologii výroby oceli z železné rudy bez použití fosilních paliv. Běžně používané uhlí je nahrazeno elektřinou vyrobenou z bezemisních zdrojů a vodíkem [53]. Výstavba závodu začala v roce 2018 ve městě Luleå. Tento pilotní projekt má mezi lety 2021–2024 vyrábět bezemisní ocel a následně přejít do další fáze testování. V současné době je ocelářský průmysl jedním z odvětví s největší produkcí uhlíku a představuje až 7 % celosvětových emisí CO₂. Pokud bude projekt úspěšný, mohl by snížit emise CO₂ Švédska až o 10 % [54].



Obrázek 4.3 Závod na výrobu oceli společnosti HYBRIT [53]

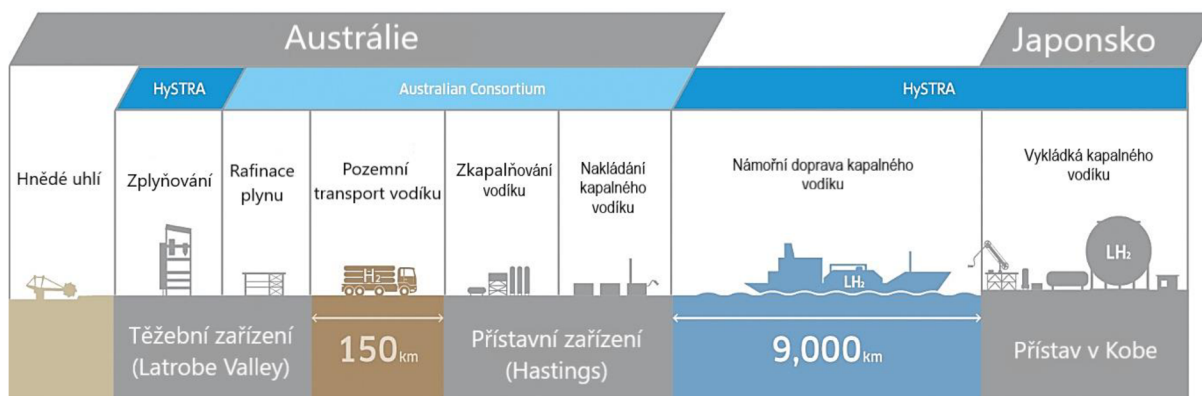
Nahrazení uhlíku vodíkem k redukcí železné rudy je technicky nejslibnějším způsobem snížení emisí oxidu uhličitého v procesu výroby oceli. Cílem toho výzkumného projektu je prozkoumat a vyhodnotit možné způsoby realizace celého procesu této výroby, od těžby železné rudy přes přímou redukcí v peci až po konečný produkt. Výzkum projektu HYBRIT je rozdělen do šesti oblastí. Mezi ně patří: Dodávka elektřiny bez fosilních paliv a dopady na elektrickou soustavu, Výroba a skladování vodíku, Výroba pelet ze železné rudy bez fosilních paliv, Redukce železné rudy za pomoci vodíku, Výroba oceli z železné rudy redukované vodíkem a Model obchodního trhu. V roce 2025 je plánováno uvést do provozu demonstrační závod, kde bude představen celý bezfosilní hodnotový řetězec ve velkém měřítku [53].



Obrázek 4.4 Výroba oceli přímou redukcí [55]

4.3 HESC

Australská, japonská a viktoriánská vláda pracují společně s několika průmyslovými partnery na vytvoření prvního na světě řetězce pro dodávání vodíkové energie (HESC). Projekt vyrábí zkapalněný vodík z hnědého uhlí a dodává ho do Japonska [56]. Aktuálně je HESC v testovací pilotní fázi, která potrvá přibližně rok. Závod na výrobu plyného vodíku se nachází v Latrobe Valley a používá k tomu metodu zplyňování uhlí. Vyrobený vodík je potom transportován do přístavu Hastings, kde je zkapalněn a následně speciálními tankery dopravován do Japonska [56].

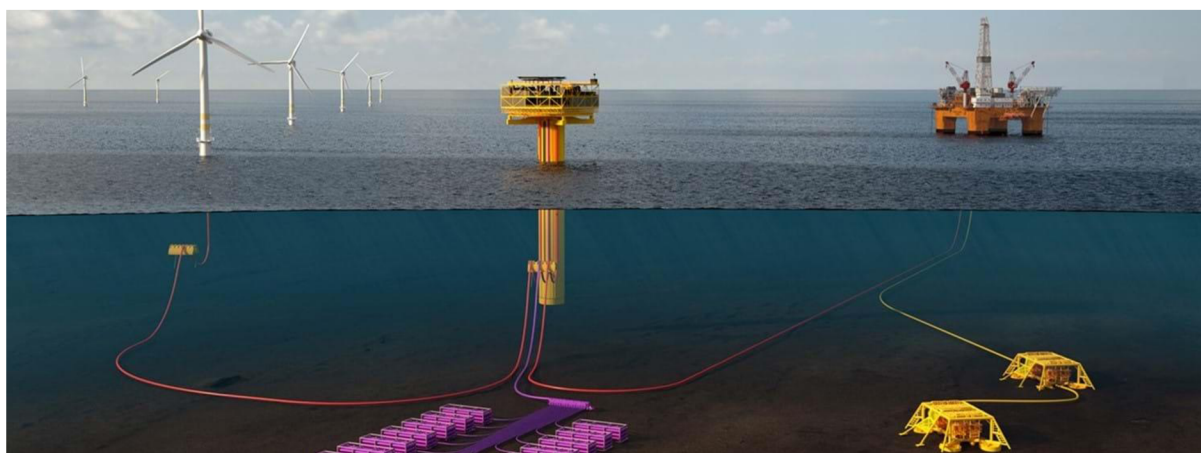


Obrázek 4.5 Schéma vodíkového řetězce HESC [57]

Pokud HESC postoupí do fáze komerční výroby bude potřeba pro větší produkci vodíku oxid uhličitý, který se bude zachycovat a dodávat pomocí technologie CSS. Ta v Austrálii funguje bezpečně a efektivně již 45 let. HESC má potenciál rychle přispět k dekarbonizaci v různých odvětvích a vytvořit globální dodavatelský řetězec pro vodík, po kterém roste poptávka [56].

4.4 Deep Purple

Pilotní projekt Deep Purple je systém, který využívá větrnou energii k extrakci zeleného vodíku z mořské vody. Projekt vede nadnárodní společnost TechnipFMC, která se jinak zabývá ropnými a plynárenskými službami. Společnost vede konsorcium složené z předních průmyslových partnerů, které má za úkol systém Deep Purple postavit a otestovat. Tento pilotní projekt umožní partnerům konsorcia připravit systém pro rozsáhle komerční využití [58].



Obrázek 4.6 Koncept projektu Deep Purple [59]

Ve žlutém zařízení na obrázku (4.6) se nacházejí elektrolyzéry a palivové články. Zásobníky vodíku jsou fialové [59]. Když fouká vítr vyrábějí větrné turbíny elektrickou energii, která je dodávána přímo spotřebitelům. Během období přebytku vyráběné energie, se tato elektřina používá na výrobu vodíku elektrolýzou vody. Sladká voda pro tento proces je vyráběná z mořské vody pomocí reverzní osmózy. Vyrobený vodík

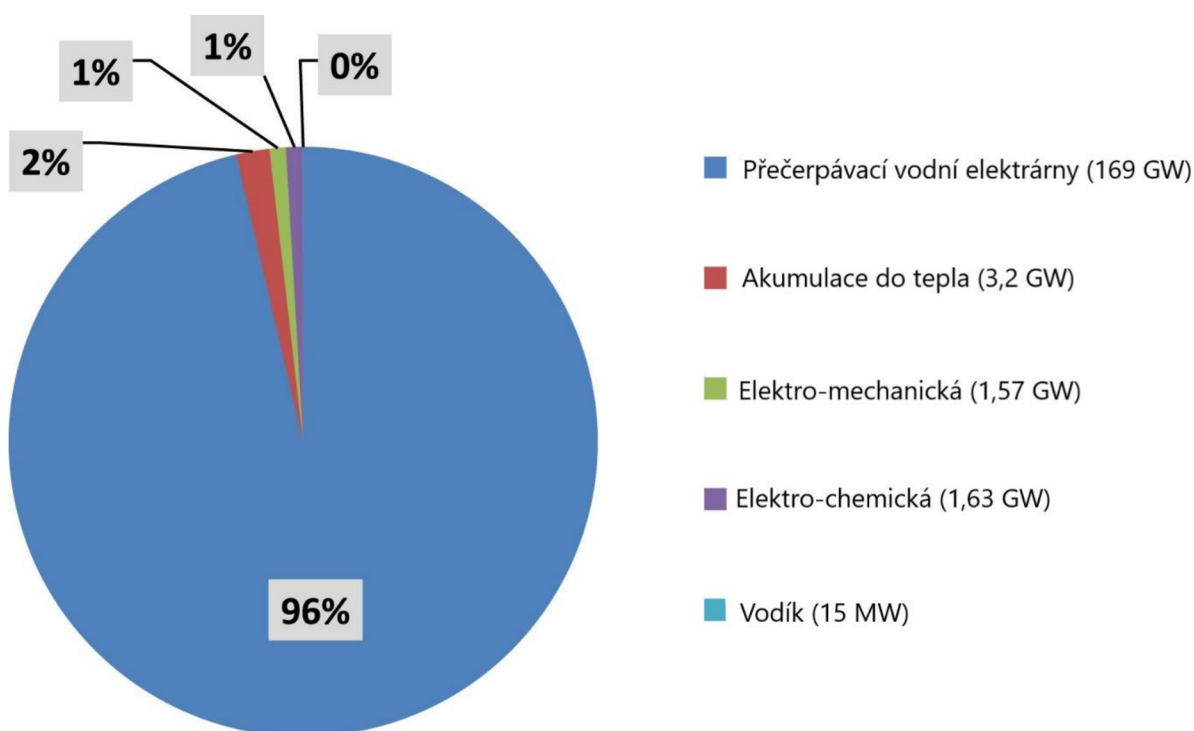
je skladován pod tlakem v nádržích umístěných na mořském dně [58]. V období bezvětrí nebo vysoké poptávky po elektrické energii je vodík přeměněn v palivových článcích zpět na elektřinu. Tento zelený vodík lze také dodávat spotřebitelům přímo na moři nebo exportovat potrubím na břeh. Cíle tohoto projektu je vyřešení problému se skladováním energie z obnovitelných zdrojů [58].

5 Akumulace elektrické energie

Akumulace neboli skladování elektrické energie je proces vratné přeměny elektrické energie na jinou formu, kterou lze uskladnit a v případě potřeby přeměnit zpět na elektřinu. Akumulační systémy jsou v energetice z hlediska výroby a spotřeby elektrické energie velmi důležitou součástí. Elektřina je problematickou komoditou a její distribuce naráží na problém okamžité poptávky a nabídky. Ačkoliv již existuje mnoho způsobů, jak elektřinu skladovat, jsou tyto technologie stále ve vývoji [60].

Rozvoj obnovitelných zdrojů energie a snahy o snížení emisí oxidu uhličitého vylouly větší zájem a snahu o skladování energie, které je klíčovou součástí zařízení na výrobu obnovitelné energie. Skladování energie je považováno za jedno z řešení stabilizace dodávek elektřiny k odvrácení neekonomické výroby energie a snížení vysokých cen ve špičkách [60]. Mezinárodní energetická agentura (IEA) předpovídá do roku 2035 nárůst podílu obnovitelných zdrojů energie na celkové výrobě elektřiny na 23,1 % (v roce 2015 činil podíl OZE 6,9 %) v rámci Evropské unie. Z toho důvodu Evropská komise uznala skladování elektřiny jako jednu ze strategických technologií při dosahování energetických cílů EU [60].

Současným nepoužívanějším řešením akumulace energie jsou přečerpávací vodní elektrárny, které poskytují 96 % veškeré akumulační kapacity. Data na obrázku (5.1) jsou z roku 2017 [61]. V této kapitole jsou popsány a následně porovnány vybrané způsoby dlouhodobé akumulace energie.

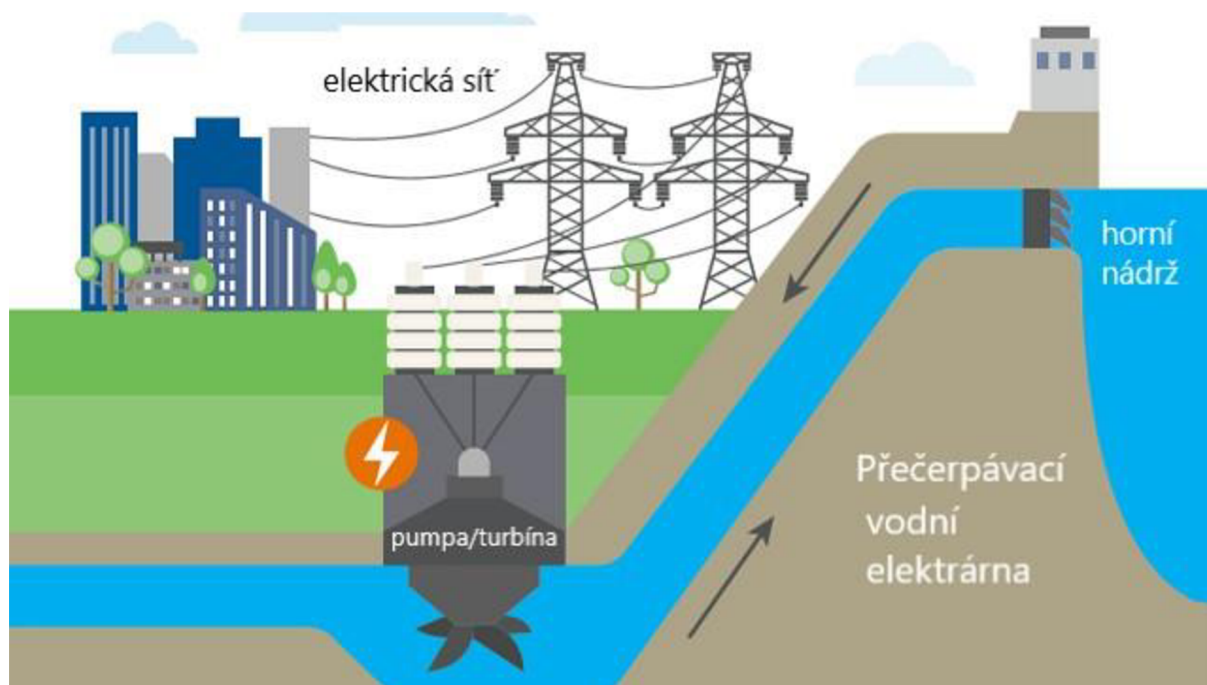


Obrázek 5.1 Technologie akumulace energie ve světě [61]

5.1 Mechanické systémy pro akumulaci energie

5.1.1 Přečerpávací vodní elektrárny (PHS)

Z celkové kapacity skladované elektřiny na světě představuje PHS až 96 %. Jedná se o nepoužívanější a nejspolehlivější technologii pro ukládání elektrické energie [60]. Charakterizuje se dlouhou životností, vysokou účinností, rychlým náběhem a energetickou kapacitou až 2 GW. Mezi základní prvky PHS patří horní a dolní nádrž, turbína a generátor. Elektrárna je uváděná do čerpadlového nebo turbínového cyklu podle aktuálních požadavků [60]. Princip fungování je velmi jednoduchý. Pomocí přebytečné energie je voda čerpána do horní nádrže, kde je uložena ve formě potenciální energie (čerpadlový cyklus). Během období poptávky po elektřině se voda pohybuje do dolní nádrže, roztáčí turbínu a generátorem je produkován elektrický proud (turbínový cyklus). Jako dolní nádrž může sloužit například jezero nebo otevřená moře, ale musí se nacházet v blízkosti kopce [61].



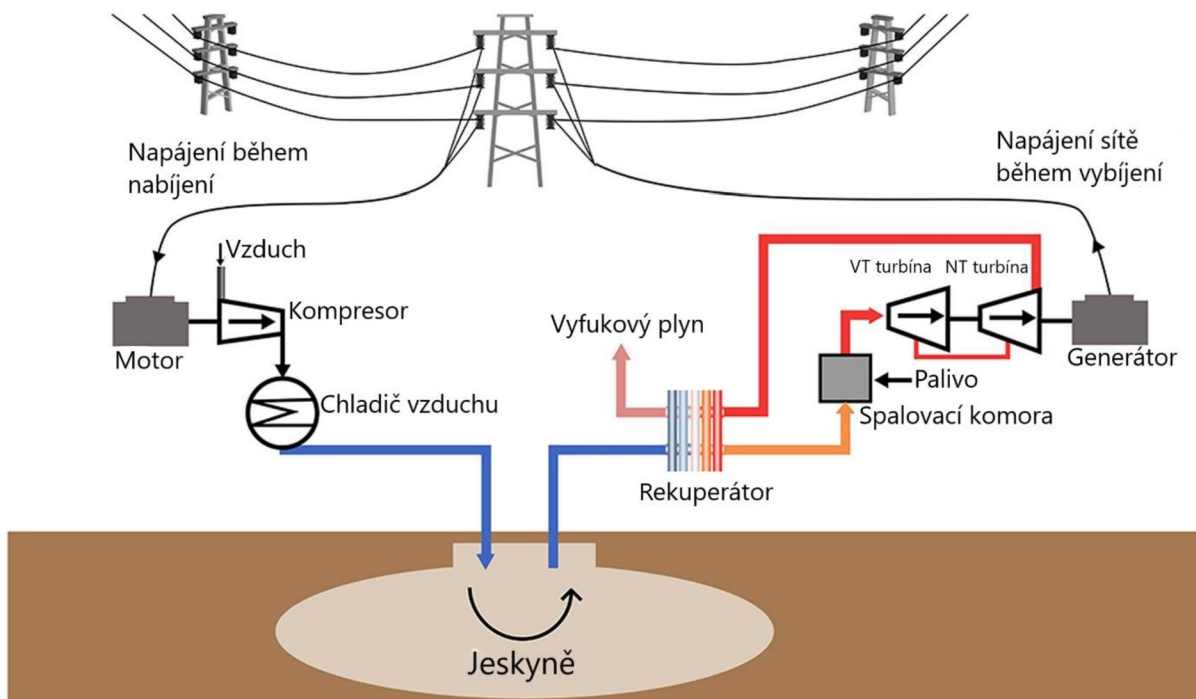
Obrázek 5.2 Schéma přečerpávací vodní elektrárny [62]

Mezi nevýhody PHS patří dlouhá doba realizace projektu a jeho investiční náklady. Celé zařízení má rovněž negativní dopad na životní prostředí a je obtížné najít vhodnou oblast s velkou vodní kapacitou [61].

5.1.2 Tlakovzdušné akumulární elektrárny (CAES)

Systémy CAES ukládají přebytečnou energii mechanickým stlačováním vzduchu do přírodních nebo vytvořených jeskyní. Jedná se o dlouhodobou metodu skladování (až 1 rok). Základními prvky elektrárny jsou kompresor, zásobník na stlačený vzduch, plynová turbína a generátor [61]. Princip provozu CAES je podobný konvekční plynové turbíně. V době nízké poptávky po elektřině se tato levná energie používá pro stlačení vzduchu do zásobníku pomocí kompresoru [63]. V případě potřeby nebo vysoké ceny elektřiny je vysokotlaký vzduch využíván při spalování v plynové turbíně a je vyráběna

elektrická energie. Tato metoda není zcela bez emisí, jelikož je stlačený vzduch nutno ohřát před vstupem do turbíny a k tomu je používán zemní plyn. Systém CAES je schopný vyrábět třikrát více elektřiny než běžná plynová turbína při stejném množství paliva [63].



Obrázek 5.3 Diagram tlakovzdušné akumulační elektrárny [61]

V posledních letech se tato technologie vylepšila rekuperací tepla (AA-CAES). Teplo vytvářené kompresním procesem se ukládá a používá k opětovnému ohřátí vzduchu před turbínou. Celková účinnost procesu je vyšší než u běžných CAES a spotřeba paliva může být zcela eliminována. Výhody těchto systémů jsou podobné systémům PHS. Vyznačují se velkou energetickou kapacitou, dlouhou dobou skladování, rychlým spouštěním a vysokou účinností až 80 % [61].

5.2 Baterie

Baterie jsou vyspělá a hojně používaná zařízení pro ukládání energie. Akumulují energii vytvářením elektricky nabitých iontů pomocí chemických reakcí mezi anodou a katodou. Jinak řečeno během nabíjení se elektřina mění na chemickou energii a během vybíjení se chemická energie přeměňuje zpět na elektřinu. Baterie se skládají převážně z více článků, které jsou spolu propojeny paralelně nebo v sérii podle požadovaných provozních parametrů [61]. V následující části jsou podrobněji popsány některé z používaných typů baterií.

5.2.1 Olověné baterie

Olověné baterie jsou jedny z nejdříve vyvinutých a široce používaných elektrochemických akumulátorů, zejména ve vozidlech a stacionárních zařízeních. Baterie se skládá ze dvou elektrod ponořených do elektrolytu [61]. Anoda je vyrobena z olova, katoda z oxidu olovnatého a jako elektrolyt se používá kyselinu sírovou. Životnost

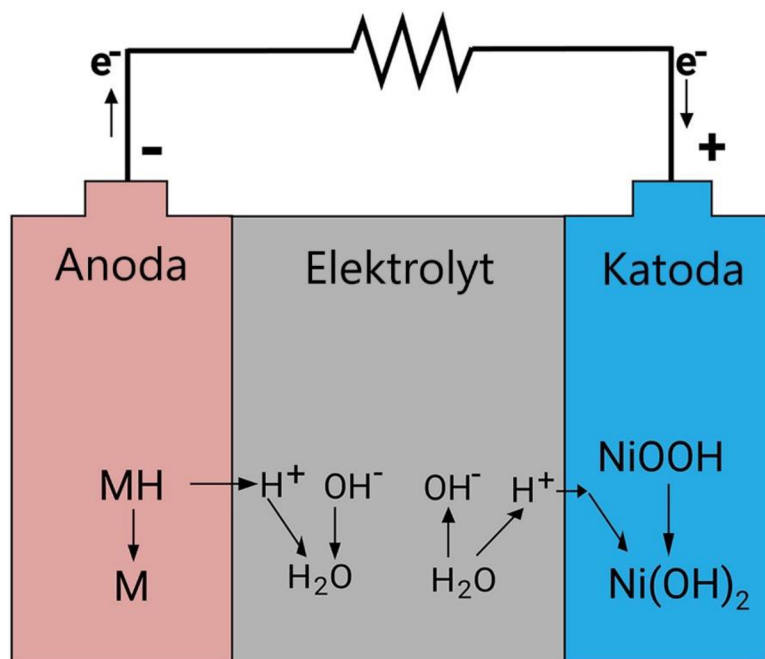
těchto baterií je 3–12 let, účinnost může dosahovat až 80 % a jsou považovány za nízkonákladová zařízení. Mají rychlou dobu odezvy a malou denní míru samovybíjení. Mezi nevýhody olovených baterií patří nízký měrný výkon, vysoké náklady na údržbu, negativní dopady na životní prostředí a omezená životnost, která mimo jiné závisí na provozní teplotě. Ta musí být udržována v mezích stanovených výrobcem. Na životnost baterie má rovněž vliv hloubka jejího vybíjení [61].

Nové vylepšené baterie používají uhlík k vytvoření super kondenzátoru v záporné elektrodě a dosahují tím až desetkrát delší životnosti než běžné olovené baterie [61].

5.2.2 Niklové baterie

V současné době je k dispozici nebo je ve výzkumu několik druhů niklových baterií. Nejrozvinutějšími a široce používanými typy jsou NiCd a NiMH, ačkoliv mají ve srovnání s jinými nižší účinnost (70 %) [61].

Nikl-kadmiové (NiCd) akumulátory používají hydroxid nikelnatý a kadmium jako elektrody a jako elektrolyt alkalický vodný roztok. Dokážou dobře fungovat při velmi nízkých teplotách (až $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$). Mezi výhody se řadí jejich dlouhá životnost a hustota energie [61]. Nevýhodou je toxicita používaných materiálů (kadmium, nikl) a jejich snižující se životnost a maximální kapacita z důvodu opakovaného dobíjení po částečném vybití (tzv. paměťový efekt). NiCd baterie se komerčně příliš nepoužívají a nepředpokládá se jejich použití pro rozsáhlejší ukládání energie [61].

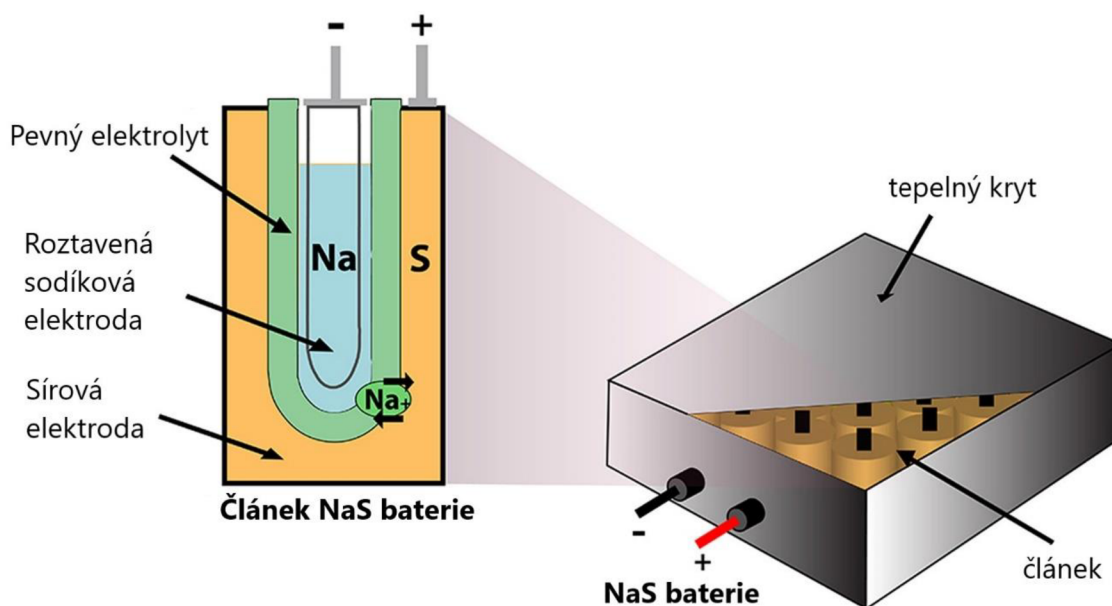


Obrázek 5.4 Diagram reakce NiMH baterie během vybíjení [61]

Nikl-metal hydridové akumulátory (NiMH) se liší od NiCd tím, že kadmium je na anodě nahrazeno speciální kovovou slitinou absorbující vodík. Jsou ekologičtější, nejsou tolik zasažené paměťovým efektem, mají vyšší energetickou kapacitu a výkon. Díky těmto vlastnostem jsou často využívány v hybridních elektrických vozidlech [61].

5.2.3 Sodíkové baterie

Baterie sodík-síra (NaS) je jednou z nejosvědčenějších elektrochemických technologií skladování energie. Anoda baterie je tvořena sírou v kapalné formě, katoda kapalným sodíkem a pevný elektrolyt oxidem hlinitým. Pro udržení sodíku a síry v kapalné formě je potřeba provozní teploty kolem 350 °C, což ztěžuje použití baterie pro domácí aplikace. Životnost baterie dosahuje přibližně 10–15 let [61]. Má nízké nároky na údržbu, vysokou účinnost (až 90 %) a rychlou dobu odezvy. Pro výrobu jsou používány levné netoxické materiály, které lze dobře recyklovat. Nevýhodou jsou vyšší provozní náklady a bezpečnostní rizika. Pokud by se elektrody dostaly při vysoké teplotě do přímého kontaktu, může dojít k požáru a výbuchu [61].



Obrázek 5.5 Schéma NaS baterie [61]

Obdobou akumulátoru NaS je baterie na bázi chloridu nikelnatého (NaNiCl). Jedná se rovněž o vysokoteplotní baterii, ve které se místo síry používá jako katoda chlorid nikelnatý a k oddělení elektrod keramický elektrolyt. Oproti NaS baterii má lepší bezpečnostní vlastnosti, delší životnost, nízké samovybíjení a menší korozní vlastnosti. Je úspěšně používána v elektrických vozidlech. V současné době pokračuje výzkum na využití v hybridních elektromobilech a skladování energie z obnovitelných zdrojů [61].

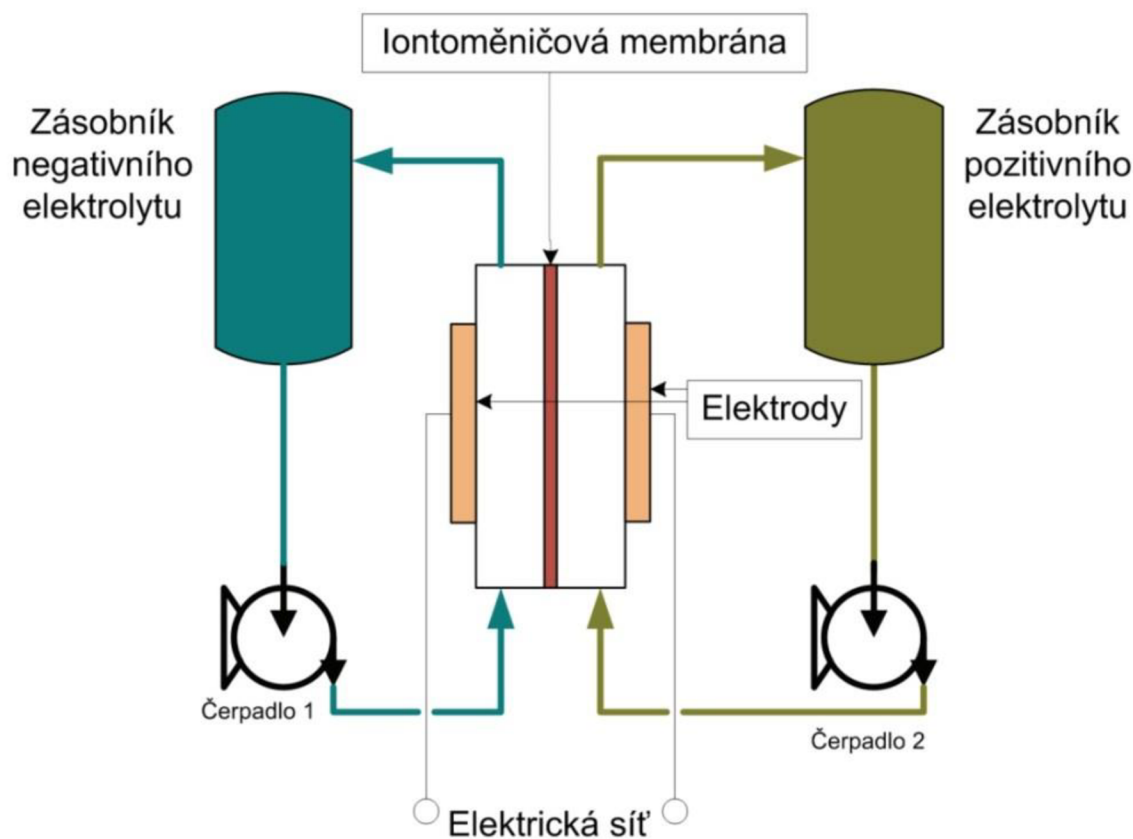
5.2.4 Lithiové baterie

Provoz lithium-iontových baterií (Li-Ion) je založen na přenosu lithiových iontů mezi elektrodami. Katoda se skládá ze sloučenin na bázi lithia (např. LiCoO_2) a anoda z grafitu. Elektrolyt je tvořen lithnými solemi rozpuštěnými v organickém rozpouštědle. Baterie potřebují pro bezpečný a efektivní provoz regulaci teploty. Ve světě jsou oblíbenou formou skladování energie [61]. Mají vysokou účinnost (90–97 %), nízkou rychlost samovybíjení a dlouhou životnost, která je ale závislá na provozní teplotě. Zvýšená teplota může způsobit rozklad elektrod a uvolnění kyslíku spolu s tepelnou energií. Z toho důvodu je baterie vybavena monitorovací jednotkou, aby nedocházelo k nad-

měrnému nabíjení a vybíjení. V současné době je tato technologie využívána v přenosné spotřební elektronice, zejména v noteboocích a mobilních telefonech, dále v aplikacích hybridních a elektrických vozidel a má potenciál pro skladování energie ze sítě [61].

5.2.5 Průtokové baterie

Průtokové baterie jsou relativně nová a slibná zařízení pro ukládání energie. Příliš se neliší svojí konstrukcí od konvekčních baterií. Mají také dvě elektrody a elektrolyt. Rozdílný je elektrolyt, který je rozdělen na pozitivní a negativní. Jsou externě skladované v nádržích. Každá nádrž má svoje čerpadlo, které vhná elektrolyty do reakční komory, kde probíhá reakce skrz iontoměničovou membránu, jež tyto elektrolyty odděluje od sebe. Během nabíjení je jeden elektrolyt oxidován na anodě a druhý elektrolyt je redukován na katodě [64].

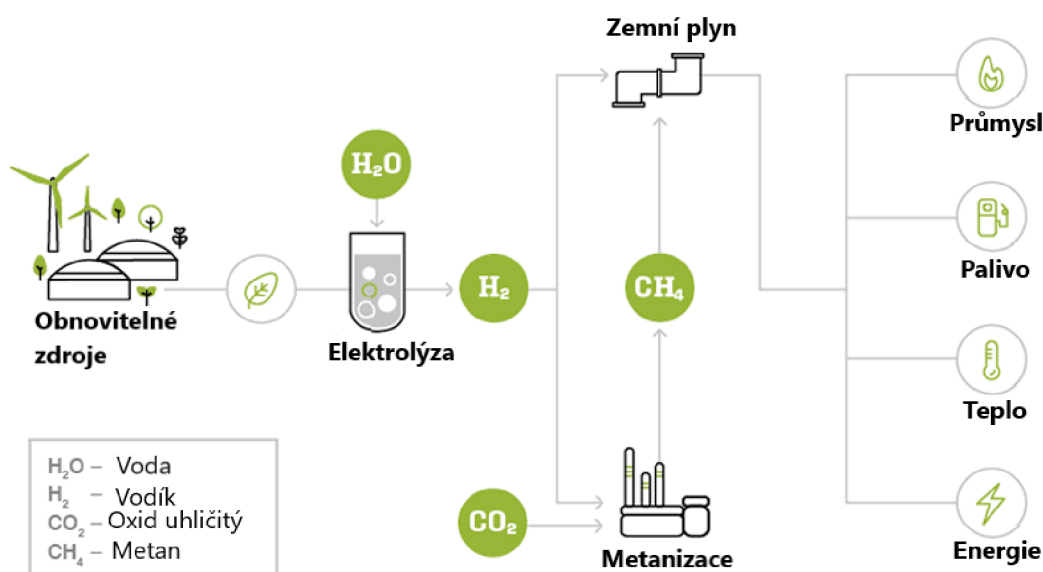


Obrázek 5.6 Schéma průtokové baterie [64]

Kapacita těchto baterií je lehce nastavitelná, jelikož lze snadno vyměnit nebo zvýšit množství elektrolytů. Existuje více typů průtokových baterií, jednou z nich je vanadium redoxní baterie (VRB). Je velmi stabilní, lze ji nechat ve vybitém stavu delší dobu bez způsobení jakéhokoliv poškození či snížení životnosti. Životnost dosahuje 30–50 let [64]. Složitější systém a nutnost čerpadel je činí nevhodnými pro skladování v malém měřítku. Naopak jsou atraktivní pro rozsáhlé systémy a stacionární aplikace. Díky svým vlastnostem a rychlému přechodu z nabíjení na vybíjení jsou VRB baterie vhodné pro vyrovnávání výkyvů výkonu fotovoltaických a větrných elektráren [64].

5.3 Power to Gas

Obnovitelné zdroje energie mají často nepředvídatelné a přerušované dodávky energie do sítě. Slibným řešením tohoto problému se jeví skladování energie pomocí systému P2G. Jedná se o speciální elektrochemickou metodu akumulace energie, která je praktickým řešením variability energetického výkonu zdrojů [65]. Principem technologie P2G je výroba vodíku pomocí elektrolýzy vody při použití přebytečné energie z obnovitelných zdrojů. Vodík se následně využívá jako uhlíkově neutrální palivo pro automobily přidáním do soustavy zemního plynu anebo k výrobě syntetického zemního plynu (SNG). Díky tomu lze přebytečnou elektřinu generovanou OZE akumulovat ve formě plynu a v případě potřeby energie ji z tohoto plynu zase získat [65].



Obrázek 5.7 Technologie Power to Gas [66]

Systémy skladování těchto plynů jsou kompatibilní se stávající infrastrukturou skladování a přepravy zemního plynu. Tento způsob akumulace energie v plynu se vyznačuje vysokou hustotou energie a marginálními ztrátami. Technologie P2G se často propojuje s procesem zachycování a ukládání uhlíku (CCS) [60].

Reakcí zachyceného oxidu uhličitého a vodíku se vytváří syntetický zemní plyn (SNG). K metanizaci dochází pomocí Sabatierovy exotermické reakce (42) za vysokého tlaku a teploty [67].



Účinnost elektrolýzy dosahuje až 80 %, následná metanizace má za příznivých podmínek účinnost okolo 90 %. Celý proces výroby metanu tak dosahuje 70% účinnosti, ovšem záleží na metodě získávání oxidu uhličitého, využití vzniklého tepla a dalších okolnostech. Opětovná výroba elektrické energie spalováním SNG dosahuje konečné účinnosti okolo 40 %, což je srovnatelné s konvekčními zdroji [65].

5.4 Porovnání technologií akumulace energie

Tabulka 6 - Porovnání způsobů akumulace energie [61, 63]

	Účinnost (%)	Samovybíjení (%/den)	Energetické náklady (\$/kWh)	Výhody	Nevýhody
PHS	65–85	0,01	5–430	Vysoká kapacita, nízké náklady na jednotku kapacity	Narušení životního prostředí
CAES	70–80	0,5	40–150	Vysoká kapacita, nízké náklady na jednotku kapacity	Nízké účinnosti bez použití rekuperace tepla
Olověné baterie	65–85	0,1–0,3	150–500	Nízké investiční náklady	Recyklace olova
Niklové baterie	60–70	0,2–1,2	200–2400	Vysoký výkon a hustota energie, dobrá účinnost	Toxicita, nutná recyklace
Sodíkové baterie	75–90	0,05–5	100–500	Vysoká účinnost a hustota energie	Vysoké výrobní náklady, recyklace
Lithiové baterie	90–97	0,1–0,3	600–4000	Vysoký výkon a hustota energie, dobrá účinnost	Vysoké náklady, nutná recyklace
Průtočné baterie	75–85	0,15	150–1500	Vysoká kapacita	Nízká hustota energie
P2G (při použití PČ)	20–50	Téměř žádné	2–15	Dlouhodobá akumulace	Nízká účinnost

ZÁVĚR

Vodík má spoustu vlastností, které ho činí velmi atraktivním pro využití v energetice. Má největší energetický obsah na jednotku hmotnosti ze všech paliv, vysokou účinnost spalování a nulové emise při jeho spalování. I přes některé své nedostatky jako například skladování a transport, stává se čím dál tím více důležitou součástí energetiky na celém světě.

Vodík se zatím v drtivé většině vyrábí z fosilních paliv. Je tomu tak, jelikož procesy jako parní reforming metanu, zplyňování uhlí a parciální oxidace ropných frakcí jsou jedny z nejkonomičtějších způsobů jeho výroby. Je tedy faktem, že výroba vodíku není až na výjimky v současnosti příliš ekologická. Na druhou stranu již existují způsoby výroby vodíku, které jsou prakticky bezemisní a šetrné k životnímu prostředí. Ty však ještě potřebují větší vývoj a výzkum, aby se staly komerčně atraktivními. Důležitá bude rovněž finanční podpora investorů a jednotlivých států. Dá se však předpokládat, že do několika let by výroba vodíku z obnovitelných zdrojů (voda, biomasa) mohla dosáhnout majoritního podílu z celkové produkce ve světě.

V současnosti je už vodík ve větší míře využíván v palivových člancích. Ty jsou používány v nejrůznějších aplikacích. Slouží jako pohon dopravních prostředků, uplatňují se ve vojenské a vesmírné technice a slouží také jako stacionární záložní zdroje. Spalování vodíku v plynových turbínách není zatím příliš možné, ale probíhá v tomto směru několik výzkumů. Zato se lze setkat se spalovacími motory na vodík, které pohání vozidla. Zde je zatím ještě problematická vysoká cena vozidel a vodíku. Vodík se už několik let úspěšně používá v různých odvětví průmyslu, a to především při výrobě amoniaku a syntetických paliv.

O popularitě vodíku svědčí mnoho započatých pilotních projektů. Do těchto projektů se kromě firem zapojuje mnoho zemí například Německo, Švédsko, Japonsko, Austrálie, Kanada, Norsko a další. S finanční pomocí těchto států lze očekávat postupný rozvoj projektů a vodíkových technologií. O tom, zda tyto projekty budou úspěšné, rozhodne až za několik let vyhodnocení dat z pilotní fáze.

Tato bakalářská práce pojednává o vodíku jako o nosiči energie. Právě přenos a akumulace energie se jeví jako nejsilnější stránka vodíku. Koncepce P2G je již několik let známá a je intenzivně zkoumán její potenciál. Akumulace přebytku energie do vodíku a možnost následné přeměny na syntetický metan se jeví jako elegantní způsob, jak využít energii z OZE, která by se jinak zmařila.

S různými vodíkovými technologiemi a aplikacemi se už dnes lze v praxi běžně setkat. Cena vodíku začíná pozvolna klesat a čím dále tím více investorů rozjíždí nejrůznější vodíkové pilotní projekty. Ačkoliv je zde pořád mnoho nedokonalostí, je vodík vnímán jako médium s velkým potenciálem, které může výrazně pomoci při dekarbonizaci energetiky a různých odvětví průmyslu. Rovněž může významně pomoci se stabilizací dodávek elektrické energie z OZE a ukládání jejich přebytků v době, kdy je nízká poptávka.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] KULVEITOVÁ, Hana. *Chemie II: (chemie prvků)*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2007. ISBN 978-80-248-1322-6.
- [2] HAVRLAND, Bohumil, Jaime Osvaldo MUÑOZ JANS a Sergej UŠŤAK. *Aplikované zemědělské inženýrství*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2004. ISBN 80-213-1181-9.
- [3] KAMENÍČEK, Jiří. *Anorganická chemie*. 3. vyd. Olomouc: Univerzita Palackého, 2006. ISBN 80-244-1290-x.
- [4] GUPTA, Ram B. *Hydrogen fuel: production, transport, and storage*. Boca Raton: CRC Press, c2009. ISBN 9781420045758.
- [5] JANÍK, Luděk a Petr DLOUHÝ. Transport a skladování vodíku. *Česká vodíková technologická platforma* [online]. [cit. 2021-4-05]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/transport-a-skladovani-vodiku/618-skladovani-vodiku-i>
- [6] NIAZ, Saba, Taniya MANZOOR a Altaf Hussain PANDITH. Hydrogen storage: Materials, methods and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2015, **50**, 457-469 [cit. 2021-5-19]. ISSN 13640321. DOI: 10.1016/j.rser.2015.05.011. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115004694?via%3Dihub>
- [7] SREEDHAR, I., Krutarth M. KAMANI, Bansi M. KAMANI, Benjaram M. REDDY a A. VENUGOPAL. A Bird's Eye view on process and engineering aspects of hydrogen storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2018, **91**, 838-860 [cit. 2021-5-19]. ISSN 13640321. DOI: 10.1016/j.rser.2018.04.028. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211830248X#!>
- [8] ABDALLA, Abdalla M., Shahzad HOSSAIN, Ozzan B. NISFINDY, Atia T. AZAD, Mohamed DAWOOD a Abul K. AZAD. Hydrogen production, storage, transportation and key challenges with applications: A review. *Energy Conversion and Management* [online]. 2018, **165**, 602-627 [cit. 2021-5-19]. ISSN 01968904. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.03.088. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890418303170?via%3Dihub#s0100>
- [9] EBERLE, Ulrich a Rittmar VON HELMOLT. GM HydroGen4 - A Fuel Cell Electric Vehicle based on the Chevrolet Equinox. STOLTEN, Prof. Detlef, Dr. Remzi C. SAMSUN a Dr. Nancy GARLAND, ed. *Fuel Cells: Data, Facts and Figures* [online]. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., 2016, 2016-02-19, s. 75-86 [cit. 2021-5-19]. ISBN 9783527693924. DOI: 10.1002/9783527693924.ch08. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/308420229_GM_HydroGen4_-_A_Fuel_Cell_Electric_Vehicle_based_on_the_Chevrolet_Equinox

- [10] KRISHNA, Rahul, Elby TITUS, Maryam SALIMIAN, et al. Hydrogen Storage for Energy Application. LIU, Jianjun, ed. *Hydrogen Storage* [online]. InTech, 2012, 2012-09-05 [cit. 2021-5-19]. ISBN 978-953-51-0731-6. DOI: 10.5772/51238. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/257924806_Hydrogen_Storage_for_Energy_Application
- [11] SIMPSON, A a A LUTZ. Exergy analysis of hydrogen production via steam methane reforming. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2007, **32**(18), 4811-4820 [cit. 2021-5-19]. ISSN 03603199. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2007.08.025. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036031990700482X>
- [12] KAYFECI, Muhammet, Ali KEÇEBAŞ a Mutlucan BAYAT. Hydrogen production. *Solar Hydrogen Production* [online]. Elsevier, 2019, 2019, s. 45-83 [cit. 2021-5-19]. ISBN 9780128148532. DOI: 10.1016/B978-0-12-814853-2.00003-5. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128148532000035>
- [13] SINGH, Vineet. Fundamentals and use of hydrogen as a fuel. *Journal of Mechanical Engineering* [online]. 2015, 6, 63-68 [cit. 2021-04-07]. ISSN 0976-7371. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/279502814_FUNDAMENTALS_AND_USE_OF_HYDROGEN_AS_A_FUEL
- [14] LIU, Wenguo, Haibin ZUO, Jingsong WANG, Qingguo XUE, Binglang REN a Fan YANG. The production and application of hydrogen in steel industry. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2021, **46**(17), 10548-10569 [cit. 2021-5-19]. ISSN 03603199. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.12.123. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319920347376?via%3Dihub>
- [15] Hydrogen Production: Coal Gasification. *Energy.gov* [online]. Washington DC: The U.S. Department of Energy, 2002 [cit. 2021-5-19]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-coal-gasification>
- [16] DROBNÝ, Josef. Výroba vodíku z fosilních paliv. In: *HydroRACE4schools* [online]. 2019 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://www.hydro-race.eu/V%C3%BDroba-vod%C3%ADku-z-fosiln%C3%ADch-paliv>
- [17] SIMPSON, A a A LUTZ. Exergy analysis of hydrogen production via steam methane reforming. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2007, **32**(18), 4811-4820 [cit. 2021-5-11]. ISSN 03603199. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2007.08.025. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036031990700482X>
- [18] BLAŽEK, Josef a Vratislav RÁBL. *Základy zpracování a využití ropy*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. s. 107-110. ISBN 80-7080-619-2.

- [19] NIKOLAIDIS, Pavlos a Andreas POULLIKKAS. A comparative overview of hydrogen production processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2017, **67**, 597-611 [cit. 2021-5-11]. ISSN 13640321. DOI: 10.1016/j.rser.2016.09.044. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116305366?via%3Dihub>
- [20] BHANDARI, Ramchandra, Clemens A. TRUDEWIND a Petra ZAPP. Life cycle assessment of hydrogen production via electrolysis – a review. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2014, **85**, 151-163 [cit. 2021-5-11]. ISSN 09596526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.07.048. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965261300509X?via%3Dihub#sec2>
- [21] Hydrogen: SMART, SUSTAINABLE, HOLISTIC: Hydrogen strategy for the future. *Samsongroup.com* [online]. Frankfurt: SAMSON AKTIENGES- ELLSCHAFT, 2021 [cit. 2021-5-19]. Dostupné z: <https://www.samsongroup.com/en/products-applications/solutions/hydrogen/>
- [22] SHIVA KUMAR, S. a V. HIMABINDU. Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review. *Materials Science for Energy Technologies* [online]. 2019, **2**(3), 442-454 [cit. 2021-5-12]. ISSN 25892991. DOI: 10.1016/j.mset.2019.03.002. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589299119300035>
- [23] HADRAVA, Jan, Roman VOKATÝ, Tomáš HLINČÍK a Daniel TENKRÁT. PO- ROVNÁNÍ KVALITY VODÍKU Z RŮZNÝCH TECHNOLOGIÍ VÝROBY [online]. Praha: Chem. Listy, 2013 [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjT1LT_vuHpAhWF-6QKHbIVAK8QFjABegQIA-xAB&url=http%3A%2F%2Fpaliva.vscht.cz%2Fdownload.php%3Fid%3D95&usg=AOvVaw1phfrZcbbPxgjaJgsS-0WE
- [24] SHARMA, Sunita a Sib Krishna GHOSHAL. Hydrogen the future transportation fuel: From production to applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2015, **43**, 1151-1158 [cit. 2021-5-12]. ISSN 13640321. DOI: 10.1016/j.rser.2014.11.093. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114010405#s0015>
- [25] DOUCEK, Aleš. Výroba vodíku z biomasy. In: *Česká vodíková technologická platforma* [online]. 2008 [cit. 2021-05-12]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/vyroba-vodiku/666-vyroba-vodiku-z-bio- masy>
- [26] NI, Meng, Dennis Y.C. LEUNG, Michael K.H. LEUNG a K. SUMATHY. An overview of hydrogen production from biomass. *Fuel Processing Technology* [online]. 2006, **87**(5), 461-472 [cit. 2021-5-12]. ISSN 03783820. DOI: 10.1016/j.fuproc.2005.11.003. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378382005001980?via%3Dihub#aep-section- id17>

- [27] POHOŘELÝ, Michael a Michal JEREMIÁŠ. Zplynování biomasy – možností uplatnění. In: *Biom.cz* [online]. 2010 [cit. 2021-05-12]. Dostupné z: https://biom.cz/cz/odborne-clanky/zplynovani-biomasy-moznosti-uplatneni?add_disc=1
- [28] BIČÁKOVÁ, Olga. MOŽNOSTÍ VÝROBY VODÍKU BIOLOGICKÝMI PROCESY [online]. 2010, roč. 2, č. 4, 103-112 [cit. 2021-05-12]. Dostupné z: <http://paliva.vscht.cz/download.php?id=29>
- [29] BU-210: How does the Fuel Cell Work? *Battery university* [online]. 2021 [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/index.php/learn/article/fuel_cell_technology
- [30] SHARAF, Omar Z. a Mehmet F. ORHAN. An overview of fuel cell technology: Fundamentals and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2014, **32**, 810-853 [cit. 2021-5-13]. ISSN 13640321. DOI: 10.1016/j.rser.2014.01.012. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114000227?via%3Dihub#s0095>
- [31] ABDELKAREEM, Mohammad Ali, Khaled ELSAID, Tabbi WILBERFORCE, Mohammed KAMIL, Enas Taha SAYED a A. OLABI. Environmental aspects of fuel cells: A review. *Science of The Total Environment* [online]. 2021, **752** [cit. 2021-5-13]. ISSN 00489697. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141803. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720353328>
- [32] MEKHILEF, S., R. SAIDUR a A. SAFARI. Comparative study of different fuel cell technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2012, **16**(1), 981-989 [cit. 2021-5-13]. ISSN 13640321. DOI: 10.1016/j.rser.2011.09.020 Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032111004709?via%3Dihub#sec0010>
- [33] MAJLING, Eduard. Palivové články – princip funkce a dělení. In: *oEnergetice.cz* [online]. 2015 [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/akumulace-energie/palivove-clanky-princip-funkce-a-deleni>
- [34] VERHAERT, Ivan, Michel DE PAEPE a Grietus MULDER. Thermodynamic model for an alkaline fuel cell. *Journal of Power Sources* [online]. 2009, **193**(1), 233-240 [cit. 2021-5-13]. ISSN 03787753. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2009.02.095. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775309003541>
- [35] VAGHARI, Hamideh, Hoda JAFARIZADEH-MALMIRI, Aydin BERENJIAN a Navideh ANARJAN. Recent advances in application of chitosan in fuel cells. *Sustainable Chemical Processes* [online]. 2013, **1**(1) [cit. 2021-5-13]. ISSN 2043-7129. DOI: 10.1186/2043-7129-1-16. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-representation-of-an-alkaline-fuel-cell-AFC-2_fig2_268811074

- [36] BETTENHAUSEN, Craig. Can FuelCell Energy's molten carbonate fuel cell help solve the CO2 problem?. *Chemical & Engineering News* [online]. 2021, **99**(11) [cit. 2021-5-13]. ISSN 0009-2347. Dostupné z: <https://cen.acs.org/energy/FuelCell-Energys-molten-carbonate-fuel/99/i11>
- [37] MASTNÝ, Petr, Jiří DRÁPELA, Stanislav MIŠÁK, Jan MACHÁČEK, Michal PTÁČEK, Lukáš RADIL, Tomáš BARTOŠÍK a Tomáš PAVELKA. Obnovitelné zdroje elektrické energie. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, s. 160. ISBN 978-80-01-04937-2. Dostupné z: <https://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/cvut-2-oze.pdf>
- [38] Direct Methanol Fuel Cell. *Fuelcellworks.com* [online]. Montreal, 1999 [cit. 2021-5-19]. Dostupné z: <https://fuelcellworks.com/knowledge/technologies/dmfc/>
- [39] İNCI, Mustafa a Ömer TÜRKSOY. Review of fuel cells to grid interface: Configurations, technical challenges and trends. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2019, **213**, 1353-1370 [cit. 2021-5-14]. ISSN 09596526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.12.281. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618340083?via%3Dihub#sec2>
- [40] GRUBER, Andrea, Mirko R. BOTHERN, Andrea CIANI, Konduri ADITYA, Jacqueline H. CHEN a Forman A. WILLIAMS. Direct Numerical Simulation of hydrogen combustion at auto-ignitive conditions: Ignition, stability and turbulent reaction-front velocity. *Combustion and Flame* [online]. 2021, **229** [cit. 2021-5-14]. ISSN 00102180. DOI: 10.1016/j.combustflame.2021.02.031. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010218021001000#sec0001>
- [41] Hydrogen combustion, explained. *Airbus.com* [online]. AIRBUS, 2020 [cit. 2021-5-19]. Dostupné z: <https://www.airbus.com/newsroom/stories/hydrogen-combustion-explained.html>
- [42] EU Funds Hydrogen Combustion Engine Project. *Springerprofessional.de* [online]. Germany: springerprofessional, 2020 [cit. 2021-5-19]. Dostupné z: <https://www.springerprofessional.de/en/internal-combustion-engine/consumables/eu-funds-hydrogen-combustion-engine-project/18553402>
- [43] BMW Hydrogen 7. *Hydrogencarsnow.com* [online]. 2021 [cit. 2021-5-19]. Dostupné z: <https://www.hydrogencarsnow.com/index.php/bmw-hydrogen-7/>
- [44] BMW Hydrogen 7. *Hydrogen-motors.com* [online]. [cit. 2021-5-19]. Dostupné z: <http://www.hydrogen-motors.com/bmw-hydrogen-7.html>
- [45] *H2i.cz* [online]. Frýdlant nad Ostravicí: HHO Technology, 2008–2019 [cit. 2021-5-19]. Dostupné z: <https://h2i.cz/>

- [46] Česká vodíková technologická platforma: *Strategická výzkumná agenda rozvoje vodíkového hospodářství v ČR* [online]. [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: https://www.hytep.cz/images/dokumenty-ke-stazeni/SVA_HYTEP.pdf
- [47] WU, Tingting, Wenjun FAN, Yang ZHANG a Fuxiang ZHANG. Electrochemical synthesis of ammonia: Progress and challenges. *Materials Today Physics* [online]. 2021, **16** [cit. 2021-5-14]. ISSN 25425293. DOI: 10.1016/j.mtphys.2020.100310. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542529320301346>
- [48] NOSHERWANI, Shahmir Ali a Rui Costa NETO. Techno-economic assessment of commercial ammonia synthesis methods in coastal areas of Germany. *Journal of Energy Storage* [online]. 2021, **34** [cit. 2021-5-14]. ISSN 2352152X. DOI: 10.1016/j.est.2020.102201. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X20320247>
- [49] ZILVAR, Jiří. Syntetická paliva – power to gas, power to liquid: výroba a účinnost. In: *Tzb-info.cz* [online]. 2020 [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/20711-synteticka-paliva-power-to-gas-power-to-liquid-vyroba-a-ucinnost#kap3>
- [50] New Audi e-gas offer as standard: 80 percent lower CO2 emissions. *Audi-mediacenter.com* [online]. Germany: AUDI, 2017 [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.audi-mediacenter.com/en/press-releases/new-audi-e-gas-offer-as-standard-80-percent-lower-co2-emissions-7353>
- [51] *Energiepark Mainz* [online]. Mainz [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.energiepark-mainz.de/en/>
- [52] KOPP, M., D. COLEMAN, C. STILLER, K. SCHEFFER, J. AICHINGER a B. SCHEPPAT. Energiepark Mainz: Technical and economic analysis of the worldwide largest Power-to-Gas plant with PEM electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2017, **42**(19), 13311-13320 [cit. 2021-5-15]. ISSN 03603199. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.12.145. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319917300083>
- [53] *HYBRIT* [online]. Stockholm: Hybrit Development AB [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.hybritdevelopment.se/en/>
- [54] Nel awarded 4.5 MW electrolyser order for HYBRIT steel project. *Fuel Cells Bulletin* [online]. 2019, **2019**(5), 12-13 [cit. 2021-5-15]. ISSN 14642859. DOI: 10.1016/S1464-2859(19)30208-1. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1464285919302081>
- [55] SSAB, LKAB and Vattenfall launch long-term initiative for CO2-free ironmaking for steel production. *Greencarcongress.com* [online]. BioAge Group, © 2004-2021 [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.greencarcongress.com/2016/04/ssab.html>

- [56] HESC [online]. Hydrogen Engineering Australia, © 2020 [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://hydrogenenergysupplychain.com/>
- [57] Hydrogen – the fuel of the future? *Bluenotes.anz.com* [online]. Australia and New Zealand Banking Group Limited, 2020 [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://bluenotes.anz.com/posts/2020/05/hydrogen-australia-japan-kawasaki-heavy-industries>
- [58] Energy Transition, Deep Purple™. *Technipfmc.com* [online]. London: Technip-FMC [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.technipfmc.com/en/what-we-do/subsea/energy-transition-deep-purple/>
- [59] Deep Purple Project Collaboration. *Gceocean.no* [online]. Bergen: GCE Ocean Technology, 2020 [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.gceocean.no/news/posts/2020/july/deep-purple-project-collaboration/>
- [60] ZAKERI, Behnam a Sanna SYRI. Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2015, **42**, 569-596 [cit. 2021-5-17]. ISSN 13640321. DOI: 10.1016/j.rser.2014.10.011. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114008284?via%3Dihub#s0045>
- [61] ARGYROU, Maria C., Paul CHRISTODOULIDES a Soteris A. KALOGIROU. Energy storage for electricity generation and related processes: Technologies appraisal and grid scale applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2018, **94**, 804-821 [cit. 2021-5-17]. ISSN 13640321. DOI: 10.1016/j.rser.2018.06.044. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118304817?via%3Dihub#s0005>
- [62] Pumped Storage Hydropower. *Bv.com* [online]. Black & Veatch Holding Company, 2021 [cit. 2021-5-19]. Dostupné z: <https://www.bv.com/industries/hydropower-hydraulic-structures/pumped-storage-hydropower>
- [63] MAHLIA, T.M.I., T.J. SAKTISAHDAN, A. JANNIFAR, M.H. HASAN a H.S.C. MATSEELAR. A review of available methods and development on energy storage; technology update. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2014, **33**, 532-545 [cit. 2021-5-17]. ISSN 13640321. DOI: 10.1016/j.rser.2014.01.068. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114000902?via%3Dihub#s0025>
- [64] REICHL, Tomáš. Průtoková baterie. In: *oEnergetice* [online]. 2015 [cit. 2021-5-19]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/akumulace-energie/prutokova-baterie>
- [65] VOBOŘIL, David. Power to Gas – budoucnost akumulace elektřiny? In: *oEnergetice.cz* [online]. 2015 [cit. 2021-5-19]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/akumulace-energie/power-to-gas-budoucnost-akumulace-elektriny>

- [66] Key technology – power-to-gas. *Bmp-greengas.de* [online]. München: bmp-greengas, 2021 [cit. 2021-5-19]. Dostupné z: <https://www.bmp-greengas.de/knowledge/key-technology-power-to-gas/?lang=en>
- [67] WAGNER, Vladimír. Velký přehled: Využívané i perspektivní technologie akumulace energie. In: *oEnergetice.cz* [online]. 2018 [cit. 2021-5-19]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/akumulace-energie/velky-prehled-vyuzivane-i-perspektivni-technologie-akumulace-energie>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Význam
AA-CAES	Tlakovzdušná akumulární elektrárna s rekuperací tepla
AFC	Alkalický palivový článek
CAES	Tlakovzdušná akumulární elektrárna
CCS	Carbon Capture and Storage
DAC	Direct air capture
DMFC	Palivový článek pro přímou reakci metanolu
EU	Evropská unie
Fd	Ferredoxin
HESC	Hydrogen Energy Supply Chain
HICE	Hydrogen internal combustion engine
HYBRIT	Hydrogen Breakthrough Ironmaking Technology
IEA	International Energy Agency
LSM	Lanthan strontnatý manganit
MCFC	Palivový článek s tekutým uhlíčitanem
OZE	Obnovitelné zdroje energie
P2G	Power to Gas
PAFC	Palivový článek s kyselinou fosforečnou
PČ	Palivový článek
PEM	Proton Exchange Membrane
PEMFC	Palivový článek s polymerní membránou
PHS	Přečerpávací vodní elektrárna
PSA	Adsorpce s tlakovým výkyvem
PSI	Fotosystém I
PSII	Fotosystém II
SNG	Syntetický zemní plyn
SOE	Elektrolyzér s pevnými oxidy
SOFC	Palivový článek s tuhými oxidy
VRB	Vanadium redoxní baterie
WGS	Konverze vodního plynu
YSZ	Ytria stabilizovaný zirkoničitan

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1	Systém skladování stlačeného vodíku [9].....	14
Obrázek 1.2	Systém skladování kapalného vodíku [10]	14
Obrázek 2.1	Podíl zdrojů na výrobě vodíku v současnosti [14].....	16
Obrázek 2.2	Průmyslová výroba vodíku zplyňováním uhlí [16].....	17
Obrázek 2.3	Schéma parního reformingu [17]	18
Obrázek 2.4	Schéma parciální oxidace [18]	19
Obrázek 2.5	Schéma alkalické elektrolýzy [21].....	20
Obrázek 2.6	Schéma PEM elektrolýzy [22].....	21
Obrázek 2.7	Schéma SOE elektrolýzy [22].....	22
Obrázek 2.8	Diagram procesu fotoelektrolýzy [19]	23
Obrázek 2.9	Diagram procesu pyrolýzy biomasy [19].....	24
Obrázek 2.10	Autotermní a alotermní zplyňování [27].....	25
Obrázek 2.11	Diagram procesu zplyňování biomasy [19].....	26
Obrázek 2.12	Diagram procesu tmavé fermentace [19].....	27
Obrázek 2.13	Schéma přímé biofotolýzy [26]	28
Obrázek 2.14	Schéma nepřímé biofotolýzy [26]	28
Obrázek 3.1	Palivový článek s polymerní membránou [33]	31
Obrázek 3.2	Palivový článek s alkalickým elektrolytem [34]	32
Obrázek 3.3	Palivový článek s kyselinou fosforečnou [35]	33
Obrázek 3.4	Palivový článek s tekutým uhličitánem [36]	34
Obrázek 3.5	Palivový článek s tuhým oxidem [37].....	35
Obrázek 3.6	Palivový článek pro přímou reakci metanolu [38]	36
Obrázek 3.7	Fungování zážehového motoru [41]	38
Obrázek 3.8	Vodíkový spalovací motor [42]	39
Obrázek 3.9	BMW Hydrogen 7 [44]	39
Obrázek 3.10	Plakát výhod technologie h ₂ i [45].....	40
Obrázek 3.11	Způsob využití vyrobeného vodíku ve světě [vlastní tvorba].....	41
Obrázek 3.12	Schéma výroby syntetického metanu společnosti Audi [50].....	42
Obrázek 3.13	Porovnání účinností vybraných pohonů [49].....	43
Obrázek 4.1	Diagram systému P2G v Energiepark Mainz [52].....	44
Obrázek 4.2	Elektrolyzéry na výrobu vodíku v hale Energiepark Mainz [51]	45
Obrázek 4.3	Závod na výrobu oceli společnosti HYBRIT [53]	45
Obrázek 4.4	Výroba oceli přímou redukcí [55]	46
Obrázek 4.5	Schéma vodíkového řetězce HESC [57]	47
Obrázek 4.6	Koncept projektu Deep Purple [59].....	47
Obrázek 5.1	Technologie akumulace energie ve světě [61]	49
Obrázek 5.2	Schéma přečerpávací vodní elektrárny [62]	50
Obrázek 5.3	Diagram tlakovzdušné akumulační elektrárny [61]	51
Obrázek 5.4	Diagram reakce NiMH baterie během vybíjení [61]	52
Obrázek 5.5	Schéma NaS baterie [61]	53
Obrázek 5.6	Schéma průtokové baterie [64].....	54
Obrázek 5.7	Technologie Power to Gas [66]	55

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 - Vybrané vlastností vodíku [4].....	12
Tabulka 2 - Porovnání vlastnosti vodíku a jiných paliv [4]	13
Tabulka 3 - Složení plynu po parciální oxidaci mazutu [18].....	19
Tabulka 4 - Porovnání metod výroby vodíku [19, 22].	29
Tabulka 5 - Porovnání vlastnosti palivových článků [31, 39]	37
Tabulka 6 - Porovnání způsobů akumulace energie [61, 63].....	56