

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta



Vozidla na palivové články

Bakalářská práce

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jakub Mařík, Ph.D.

Autor práce: Jakub Čáslavský

PRAHA 2017

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jakub Čáslavský

Silniční a městská automobilová doprava

Název práce

Vozidla na palivové články

Název anglicky

Fuel cell vehicles

Cíle práce

Cílem práce je vytvořit literární rešerši s vlastními komentáři zabývající se vozidly s pohonem na palivové články.

Metodika

- prostudovat základní literaturu v oblasti vozidel s pohonem na palivové články
- vlastní rozbor problematiky
- předpokládaný vývoj v dané oblasti

Doporučený rozsah práce

30 – 40 stran formátu A4

Klíčová slova

palivový článek, elektro-vozidlo, ekonomika provozu

Doporučené zdroje informací

- ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE. TECHNICKÁ FAKULTA, – HROMÁDKO, J. *Speciální spalovací motory*. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2011. ISBN 978-80-213-2168-7.
- HROMÁDKO, J. *Speciální spalovací motory a alternativní pohony : komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol*. Praha: Grada, 2012. ISBN 978-80-247-4455-1.
- Jenn-Jiang Hwang et al., Design of a range extension strategy for power decentralized fuel cell/battery electric vehicles, International Journal of Hydrogen Energy Volume 40, Issue 35, 2015
- KAMEŠ, J. – ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE. KATEDRA AUTOMOBILŮ A TRAKTORŮ. *Speciální motorová vozidla : část: spalovací motory*. [Praha]: Česká zemědělská univerzita, 2010. ISBN 978-80-213-2337-7.
- VLK, F. *Koncepce motorových vozidel : koncepce vozidel, alternativní pohony, komfortní systémy, řízení dynamiky, informační systémy*. Brno: Nakladatelství a vydavatelství Vlk, 2000. ISBN 80-238-5276-0.

Předběžný termín obhajoby

2016/17 LS – TF

Vedoucí práce

Ing. Jakub Mařík, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra vozidel a pozemní dopravy

Elektronicky schváleno dne 15. 1. 2016

doc. Ing. Miroslav Růžička, CSc.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 19. 1. 2016

prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.

Děkan

V Praze dne 23. 03. 2017

Prohlášení

„Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Vozidla na palivové články vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědom, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Jsem si vědom, že moje bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí.

Jsem si vědom, že na mojí bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.“

V Praze dne: 28.3.2017

Podpis: _____
Jakub Čáslavský

Poděkování

Touto cestou bych chtěl mnohokrát poděkovat panu Ing. Jakobovi Maříkovi, Ph.D. za jeho cenné rady a připomínky při zpracování mé bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za veškerou podporu při studiu.

Abstrakt

Tato práce pojednává o palivových článcích, které jsou využívány v automobilovém průmyslu. První kapitola je úvodem celé práce. Objasňuje hlavní téma a popisuje, jak bude celá práce strukturovaná. Druhá kapitola se zabývá historickým vývojem palivového článku. Ve třetí kapitole je objasněn význam funkce palivových článků. Dále se podrobně věnuje výrobě paliva, jímž je vodík, jeho uskladnění a následnému přepravování. Ve čtvrté kapitole jsou detailně popsány typy automobilů, které využívají palivové články. Pátá kapitola pojednává o jednotlivých druzích palivových článků, u kterých jsou znázorněny teploty při provozu, efektivnost, výkon, elektrochemické reakce a jejich výhody a nevýhody. Šestá kapitola se zabývá spojováním jednotlivých článků do jednoho velkého souboru kvůli potřebnému výkonu. Sedmá kapitola porovnává palivové články s akumulátory. V osmé kapitole je popsána konstrukce a funkce vozidla na nejčastěji se využívající palivové články s iontoměničovou polymerní membránou. Devátá kapitola poukazuje na hlavní výhody a nevýhody palivových článků vůči ostatním pohonným ústrojím. Poslední kapitola se věnuje vodíkovým čerpacím stanicím a jejich vývoji v Evropě a v České republice.

Klíčová slova: palivový článek, vodík, kyslík, elektroda, elektrolyt, elektrovozidlo, energie, reakce

Summary

This thesis is focused on fuel cells, which are used in the car industry. The first chapter is an introduction of the whole work. It clarifies the main topic and discusses how all the work will be structured. The second chapter analyses the history of the fuel cells. In the third chapter, the importance and function of the cell are described. Moreover the production of hydrogen (a fuel used in these cells), its storage and transport are explained. Following chapter lists and describes types of cars, which use the fuel cells, in detail. Next chapter – number five – describes different types of fuel cells including the temperature, effectiveness, power and electro-chemical characteristics, summarizing their advantages and disadvantages. Connection of single fuel cells to a larger system in order to gain more power is a concern of the sixth chapter. Next chapter, number seven, compares the fuel cells and batteries. The eighth chapter describes the construction and function of a vehicle using fuel cells with ion-changing polymer membrane. In the ninth chapter, the main advantages and disadvantages of using fuel cells instead of other fuel systems are summarised. Finally, the last chapter is focused on hydrogen filling stations and their progression in the Czech Republic and across Europe.

Keywords: fuel cell, hydrogen, oxygen, electrode, electrolyte, electric vehicle, energy, reaction

Obsah

1	Úvod	1
2	Historie	2
3	Význam palivových článků	3
3.1	Podstata funkce	3
3.2	Elektroda s třífázovým rozhraním	4
3.3	Palivo	5
3.3.1	Produkce vodíku.....	5
3.3.1.1	Parní reformace zemního plynu	6
3.3.1.2	Elektrolýza vody	7
3.3.1.3	Vysokoteplotní elektrolýza	8
3.3.1.4	Termochemické cykly štěpení vody.....	8
3.3.1.5	Siřičíto - jódový cyklus	9
3.3.1.6	Biotechnologická produkce vodíku.....	10
3.3.2	Uskladnění vodíku	11
3.3.2.1	Uskladnění vodíku v kapalném skupenství.....	12
3.3.2.2	Uskladnění vodíku v plynném skupenství	12
3.3.3	Transport vodíku	13
3.3.3.1	Transport pomocí tlakových nádob.....	13
3.3.3.2	Transport pomocí plynovodů	14
3.3.4	Základ bezpečnosti při manipulaci s vodíkem	15
4	Typy automobilů využívající palivové články	16
4.1	Kia Borrego FCEV	16
4.2	Honda FCX Clarity	17

4.3	Toyota Mirai	18
4.4	Hyundai ix35 FCEV	19
4.5	Audi h – tron quattro.....	20
4.6	Hyundai H350 Fuel Cell	20
4.7	Mercedes - Benz Citaro Fuel Cell - Hybrid.....	21
5	Druhy palivových článků	22
5.1	Palivové články s polymerní iontoměničovou membránou.....	23
5.2	Palivové články s alkalickým elektrolytem	26
5.3	Palivové články s kyselinou fosforečnou.....	28
5.4	Palivové články s taveninou alkalických uhličitánů	30
5.5	Palivové články s pevným elektrolytem	32
5.6	Palivový článek pro přímou reakci metanolu	34
6	Sloučení jednotlivých palivových článků do svazku	36
7	Porovnání palivových článků s akumulátory	37
8	Soustava vozidla na palivové články s polymerní iontoměničovou membránou ..	38
9	Výhody a nevýhody palivových článků	39
10	Čerpací stanice na vodík	40
10.1	Evropa	40
10.2	Česká republika.....	41
11	Závěr.....	42
	Seznam použité literatury	43
	Seznam zkratk	48
	Seznam obrázků.....	49
	Seznam tabulek.....	51

1 Úvod

V dnešní době všechna vozidla spalující fosilní paliva znečišťují naše životní prostředí. Veškeré zplodiny vznikající ze spalovacích motorů se dostávají do ovzduší, a tím nastává problém globálního oteplování. Se zmenšováním ozonové vrstvy se Země otepluje, ledovce začínají tát a hladina moře postupně stoupá. Je evidentní, že tímto směrem se dále nesmíme ubírat. Nejen že bychom postupně přišli o všechny primární energetické zdroje, ale také bychom si znečistili celou planetu. Nastává otázka, jak se k dané věci postavit. Je mnoho způsobů, jak nahradit klasické spalovací motory s fosilními palivy. Jedním z těchto způsobů je řešení pomocí plně obnovitelných energetických zdrojů v podobě palivových článků.

Palivové články nejsou závislé na fosilních palivech. Fungují jako zařízení k výrobě elektrické energie v elektro-vozidlech. Automobily s alternativním pohonem pomocí palivových článků neprodukují žádné nežádoucí škodlivé plyny do ovzduší jako spalovací motory. Výhodou těchto článků při reakci je neměnnost konstrukce. Palivový článek má nepřerušovaný přísun paliva a kyslíku. Dokud je v provozu přívod oksylichovadla a paliva, aby mohla probíhat reakce, bude palivový článek teoreticky stále produkovat elektrickou energii. Účinnost u spalovacího motoru je totiž dvakrát menší než u této technologie. Výjimkou jsou uhlovodíková paliva, kde vzniká oxid uhličitý. Avšak všechny nebezpečné skleníkové plyny jako oxid uhelnatý a oxid dusíku jsou plně odstraněny. Na rozdíl od sluneční, větrné a geotermální elektrárny mají palivové články mnohem bližší budoucnost a veliké uplatnění.

Cílem této práce je vytvořit rešerši o problematice palivových článků, poukázat na jejich postupný historický vývoj a také zachytit, jak palivový článek funguje. Dalším cílem je popsat nesnadnou produkci paliva, jeho uskladnění a přepravu. V neposlední řadě také charakterizovat jednotlivé typy automobilů využívající palivové články a jejich parametry.

2 Historie

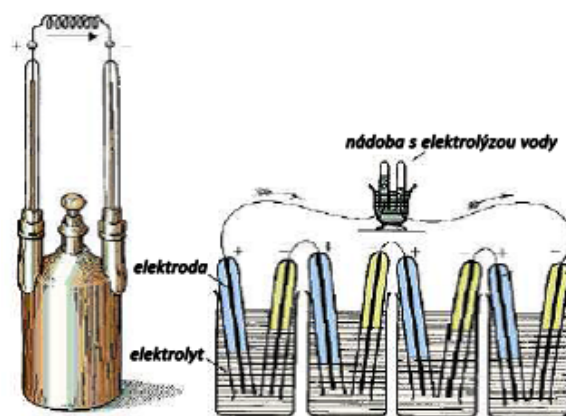
Roku 1838 švýcarský vědec Christian Friedrich Schönbein odhalil koncepci palivového článku. Nadále v lednu roku 1839 o palivovém článku publikoval. Dle této publikace poprvé vznikl pracující článek již v témže roce. Za tento výtvar vděčíme vědci siru Wiliamovi Robertu Groveovi, viz Obrázek 1, který se narodil v roce 1811 a zemřel v roce 1896. Pracoval také v justici ve Velké Británii. Tento vědec stanovil řešení, jak vytvářet elektrickou energii v ději opačném k elektrolýze vody.

Článek, který vynalezl, viz Obrázek 2, se skládal z platinových elektrod, které byly usazené ve skleněných trubičkách. Spodní části trubiček byly potopeny do elektrolytu, v tomto případě je elektrolytem kyselina sírová, a vrchní nepropustný úsek je zaplněn vodíkem a kyslíkem. Tento článek vyvíjel napětí zhruba jeden volt. Nádržka, ve které se odehrávala elektrolýza vody, fungovala jako ukazatel vytvořeného elektrického proudu a napětí. Tento aparát jako celek nevytvářel dostatečné množství elektrické energie, proto tento palivový článek nemohl být použit jako industriální komponent.



Obrázek 1 Sir William Robert Grove [33]

Nadále v historii měli vliv na vývin palivového článku Ludwig Mond a Charles Langer. Název „palivový článek“ uvedli tito vědci roku 1889. Byli na nejlepší cestě k výrobě účelného palivového článku reagujícího se svítiplynnem a vzduchem. William White Jacques poprvé aplikoval elektrolyt ve formě kyseliny fosforečné. Roku 1932 Dr. Francis Thomas Bacon vytvořil zdařilý mechanismus fungující na principu palivového článku, kde jsou niklové elektrody aplikované do kyslíko-



Obrázek 2 Palivový článek sira W. R. Grovea [33]

vodíkových článků. Tento typ palivového článku byl vytvořen i jako lacinější varianta pro katalyzátory Ludwiga Monda a Charlese Langer. Zásaditý elektrolyt (KOH) byl zaměněn za kyselý. Oba druhy elektrolytu, jak zásaditý, tak kyselý, pracují stejně. Jediná nevýhoda kyselého elektrolytu byla ta, že působil korozivně na elektrody. Dr. Francis Thomas Bacon zkonstruoval roku 1952 se svými kolegy soustavu s palivovým článkem o výkonu 5 kW.

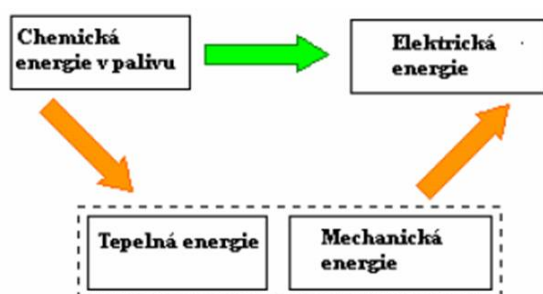
V šedesátých letech dvacátého století se začaly používat funkční palivové články, čehož využila NASA a tyto palivové články realizované v Pratt & Whitney začala uvádět do vesmírných modulů (např. Gemini a Appolo) v podobě zásobníků elektrické energie. Impuls vydaný touto organizací v této technologii se rozrostl po celém světě. Způsobil tak obrovský rozvoj výzkumu této problematiky, na čemž participovaly různé univerzity, vědecké ústavy, a dokonce i průmysl. [2]

3 Význam palivových článků

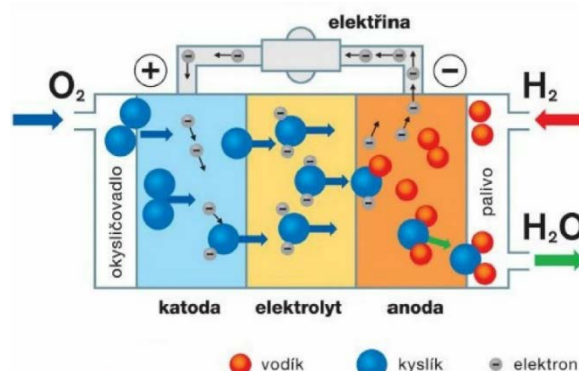
Palivové články vyrábí elektrickou energii pro elektromotor v elektrovozidle. Vzniká v něm reakce vodíku s kyslíkem na elektrodách. Dochází k převádění chemické energie na stejnosměrný elektrický proud. Pokud palivový článek dokáže vytvářet nejen elektrickou energii, ale i energii tepelnou, dá se říct, že pracuje s efektivností 85 %. Co se týče pouze elektrické energie produkované palivovým článkem, jeho efektivnost dosahuje 60 %. [31]

3.1 Podstata funkce

Zásada palivového článku spočívá v mechanismu elektrochemických reakcí elektrody a elektrolytu. Chemická energie v palivu se v elektrochemickém mechanismu bezprostředně reformuje díky působení oxidačních a redukčních reakcí nadále v elektrickou energii. Přeměna energie je zobrazena ve schématu na Obrázku 3. Toto je u všech palivových článků jednotné. Různé typy se liší různou strukturou materiálu elektrod a elektrolytu, popřípadě okysličovadla, paliva, rozdílnými teplotami ve výrobním procesu nebo chemickým pochodem na jednotlivých elektrodách. Palivový článek je složen z elektrod, které mají po svém povrchu póry, a elektrolytu, jenž odděluje dvě elektrody, katodu a anodu. [1]



Obrázek 3 Přeměna energie – schéma [33]

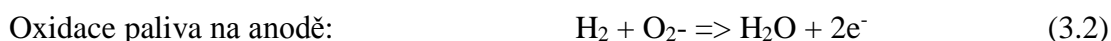


Obrázek 4 Pracující palivový článek v řezu [26]

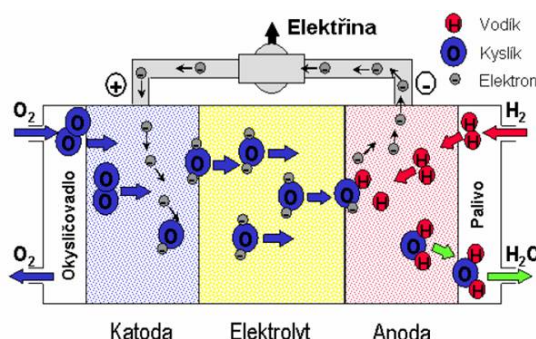
Na Obrázku 4 je znázorněno schéma palivového článku v řezu při jeho činnosti. Palivové články pohánějí elektromotor v automobilech spojením jednotlivých palivových článků do jednoho celku. Anoda a katoda je propojena elektrolytem. Na zápornou elektrodu (anodu) je přiváděné palivo v podobě čistého vodíku a na kladnou elektrodu (katodu) se dopravuje jako okysličovadlo čistý kyslík nebo kyslík ze vzduchu. Elektrolytem je většinou membrána. Ta při elektrochemické reakci umožní jedině kladným elektronům prostup jen v jednom směru. Poté zbylé záporné elektrony, které jsou pomocí membrány posílány přes elektrický obvod, vyrábí elektrický proud. Na katodě nastává děj, kde se elektrony - po projití elektrickým obvodem - a protony spojí s okysličovadlem. [20]

Anoda s katodou se zhotovují technologiemi, jako je například lepení, spékání a lisování jemných kovových, případně uhlíkových zrn. Nejčastějšími surovinami na výrobu povrchu anody a katody jsou měď, nikl, zinek, popřípadě uhlík a z drahých kovů to je stříbro a platina. [30]

Dle rovnic (3.1) a (3.2) vzniká elektrochemický proces redukce oxidantu na elektrodě katoda a oxidace paliva na elektrodě anoda v části třífázového rozmezí.



Kyslíkový anion je přepravován pomocí elektrolytu k anodě. Vytváří se dopravováním molekulárního kyslíku na katodu a tam se se dvěma elektrony snižuje na kyslíkový anion. Vzniku užitečného elektrického proudu je docíleno přiváděním elektronů z anody na katodu. Tyto elektrony jsou uvolněné z anody, kde se dopravovaný vodík zmenšuje kyslíkovým aniontem při vzniku vody. Kvantum elektronů při procesu různých paliv se může měnit. V rovnici (3.3) a na Obrázku 5 je zobrazen proces celkového působení v palivovém článku.



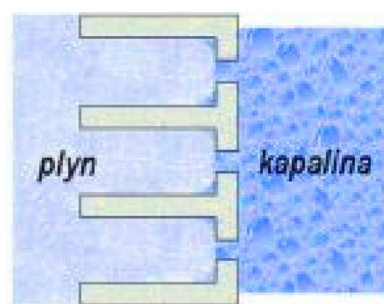
Obrázek 5 Proces palivového článku [33]



3.2 Elektroda s třífázovým rozhraním

Je nutností, aby elektroda bezpodmínečně vedla elektrický proud. Měla by zprostředkovat propojení skládající se ze tří fází, což jsou elektrolyt, plynné reagující látky a elektroda skupenství tuhého. Samotnou elektrodu nezasahuje koroze a též se nemusí podílet na elektrochemickém pochodu. Tato elektroda pak musí přivodit proces mezi reagujícími látkami, kterými jsou okysličovadlo s palivem a kapalným elektrolytem.

Vyskytuje se pár postupů ustálení rozmezí pro plyn - tekutina. Tyto veškeré postupy jsou stanoveny na principu kapilárního efektu. Aby kapalina na elektrodě mohla prostupovat, musí mít elektroda drobné póry. Naproti tomu do rozměrných pórů nepovoluje tlak plynu tekutině vstupovat, což je vyobrazeno na Obrázku 6. Dvě fáze se mohou spojit několika možnostmi. Na interní ploše vnější strany elektrody, kde elektrolyt směřuje ke zhotovování smáčeného slabého povlaku. K chemickému procesu kapaliny a plynu nastává na ploše vnějšku elektrody, na kterém je schopen prosakovat přes mokřenou tenkou vrstvu chemicky reagující plyn, který se komplikovaně rozkládá v elektrolytu. Mokřený povlak má být na povrchu elektrody co největší, dle tohoto se zhotovuje složení elektrody. [1]



Obrázek 6 Pórovitá elektroda – schéma v řezu [33]

3.3 Palivo

Vodík je nejvíce obsáhlým prvkem ve vesmíru. Využívá se jako palivo v palivových článcích, kde se prozatím uplatňuje nejvíc. Vodík v palivovém článku bezprostředně reaguje. Při vytváření elektrické energie v palivovém článku může vodík bezprostředně vstupovat do chemické reakce.

Mimořádnou pozornost zasluhují i takzvaná nepřímá paliva. Proto vodík nemusí být pro veškeré využití palivových článků vždy vhodným palivem. V těchto nepřímých palivech se používá proces reformování, pomocí kterého se získává vodík. Nejvýznamnějšími zástupci nepřímých paliv jakožto původci vodíku jsou metanol, metan, etanol, zemní plyn a eventuálně amoniak.

Oxidy uhlíku a vodík se vytvářejí takzvanou parciální oxidací, která probíhá při značně velkých teplotách, anebo vodní párou prostřednictvím úpravy nepřímých paliv.

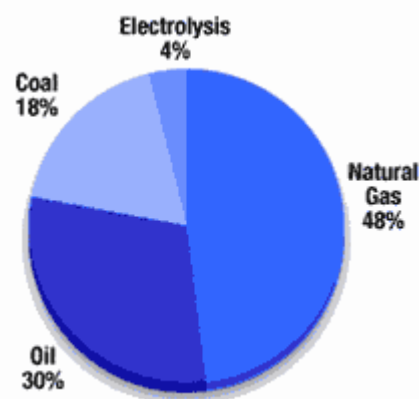
Po vykonané reformaci je nezbytně nutné zbavit se oxidu uhelnatého (CO), poněvadž u katalyzátoru v některých palivových článcích zapříčiňuje intoxikaci. Tyto katalyzátory aplikované převážně ve všech palivových článcích jsou vyráběny na bázi platiny. Soudobá kapalná paliva pohánějící spalovací motory v automobilech jsou taktéž pokládána za eventuální možná nepřímá paliva do palivových článků. Jako značně nadějně přímé kapalné palivo se nám projevuje metanol (CH_3OH).

V této době si metanol, uváděný jako přímé palivo, nachází uplatnění i v palivových článcích. Mnoho prototypů palivových článků, které byly již do teď zkonstruovány, mohou využívat metanol jako přímé palivo bez nutnosti úprav. [1]

3.3.1 Produkce vodíku

Metod produkce vodíku je mnoho. Výběr je možno učinit z obrovského rozsahu zdrojů, které jsou určeny jako počáteční. Během jednoho roku je vyrobeno zhruba padesát pět miliónů tun vodíku. V celosvětovém rozsahu se vodík vyrábí několika metodami, viz Obrázek 7.

Vodík, který je vyroben těmito způsoby, by regionálně mohl pomoci lidstvu a Zemi omezit nadprůměrnou produkci škodlivých látek. Kdyby se jednalo o celosvětové kritérium, efektivita základní energie by s úsporným používáním poklesla. Dále by s tím souvisela i navazující problematika oxidu uhličitého a ostatních neprospěšných látek, které by se s postupem času zvyšovaly. Obnovitelné zdroje jsou dalším eventuálním způsobem, jak vyprodukovat vodík. Je několik typu produkce vodíku pomocí aplikovaných obnovitelných



Obrázek 7 Metody produkce vodíku v celosvětovém rozsahu [51]

zdrojů. Produkce vodíku je za podpory metod vysokoteplotního rozkladu vody, elektrolýzy vody, pyrolýzy nebo zplyňováním biomasy. Také je eventuálně možné produkovat vodík pomocí bakterií speciálního typu.

Vhodným řešením produkování vodíku rovnou z vody je též možné případné rozvíjení některých jaderných reaktorů čtvrtého vývojového stupně. Pro některé termochemické cykly i vysokoteplotní elektrolýzu je ideální, jestliže na výstupu z reaktoru je teplota ochlazující látky značně vyšší.

U používání fosilních pohonných hmot, tedy zejména co se týče oblasti dopravy, se jako náhradní varianta vyskytuje vodík. Tato skutečnost vyvolala velký pohyb ve vývoji vodíkového hospodářství. Preferují se především metody produkce vodíku, které nepotřebují pravidelně dodávat fosilní paliva, a tudíž nevznikají škodlivé látky. Kdyby se ve velkém množství vyráběl vodík z fosilních paliv, tak by se tento způsob produkce vodíku nedal nijak odůvodnit za správný a účelný. Nadále uvedme několik možných metod výroby vodíku. [51]

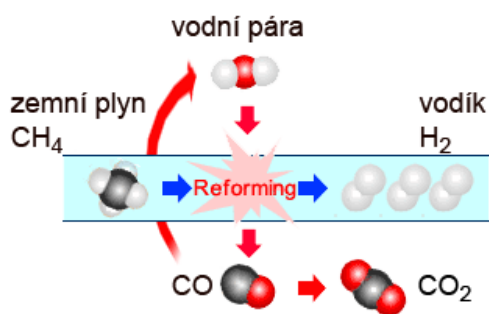
3.3.1.1 Parní reformace zemního plynu

Jako nejběžnější a z finančního hlediska nejméně nákladnější formou produkování vodíku se jeví tato metoda výroby ze zemního plynu, viz Obrázek 8. Z jeho spalování je odváděno teplo pro reformní proces a následující přeměnu oxidu uhelnatého. To se odborně nazývá autotermní reforming.

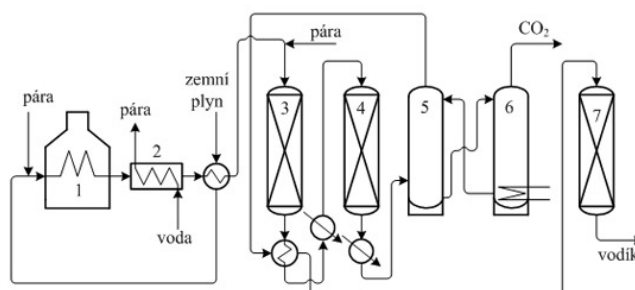


Obrázek 8 Parní reformování zemního plynu

Počáteční fází je dodat větší část metanu do vodní páry, která má teplotu za účasti katalyzátoru od 500 °C až do 1 100 °C a tlak od 0,3 do 2,5 MPa. Když se produkuje vodík, vznikají nám společně s ním i nežádoucí látky, což jsou oxid uhelnatý a o něco menší množství oxidu uhličitého. Produkce vodíku nastává při reakci metanu (zemního plynu) s vodní párou, viz Obrázek 9. Nadále s přidáním dalšího množství vodní páry a s konverzí oxidu uhelnatého, který je z reforméru, kde teploty jsou nižší než v předešlém procesu, se množství produkovaného vodíku zvyšuje. Celý proces je vyobrazen na schématu, viz Obrázek 10.



Obrázek 9 Proces parní přeměny zemního plynu (produkce vodíku) [49]



Obrázek 10 Parní reformace zemního plynu - Schéma (1 - pec, 2 - kotol na výrobu páry, 3 - vysokoteplotní konvertor CO, 4 - nízkoteplotní konvertor CO, 5 - absorbér CO_2 , 6 - desorbér CO_2 , 7 - metanizér) [50]

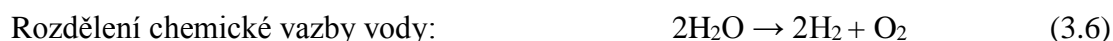
Rovnice procesu výroby vodíku parní reformací zemního plynu (metanu):



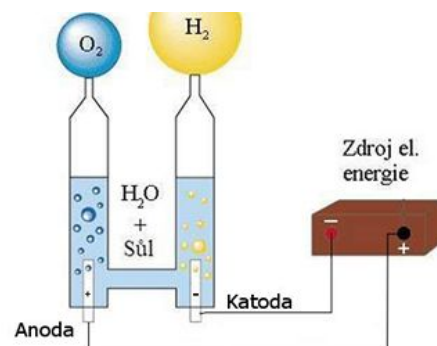
Bohužel produkce velkého množství oxidu uhličitého je nežádoucím jevem, tudíž nevýhodou. Poměr páry k obsahu uhlíku závisí na vyprodukovaném vodíku, a tudíž na jeho účinnosti, což tvoří zhruba 80%. Při získání jednoho kilogramu vodíku se vytvoří až sedm kilogramů oxidu uhličitého. [23]

3.3.1.2 Elektrolýza vody

Jak plyne z názvu, v této metodě výroby vodíku se používá voda, do které je přiváděn stejnosměrný elektrický proud. Jakmile se do vody pustí stejnosměrný proud, chemická vazba vody se rozdělí na vodík a kyslík, což je znázorněno v rovnici (3.6). Někdy je ale zapotřebí do vody přidat jiné podpůrné látky zlepšující její vodivost.



Touto metodou se již vodík tolik nevyrábí. Výroba vodíku pomocí tohoto postupu tvoří na celém světě pouhá čtyři procenta. Vodík vyprodukovaný elektrolýzou vody se aplikuje jen v některých případech. Většinou se jedná o případy potřeby velmi čistého vodíku. U tohoto procesu je na výrobu vodíku zapotřebí jen elektrická energie v podobě stejnosměrného napětí působícího při tzv. pokojových teplotách, což je zhruba v rozmezí od 18° C do 25° C. Vyprodukovaný vodík, který se skladuje, je vytvářen a odebírán v podobě plynu z elektrody, v tomto případě z katody, na které reaguje proton označován jako H⁺. Tato reakce probíhá při vzniku plynu. Celý tento proces je zobrazen na následujícím schématu, viz Obrázek 11.



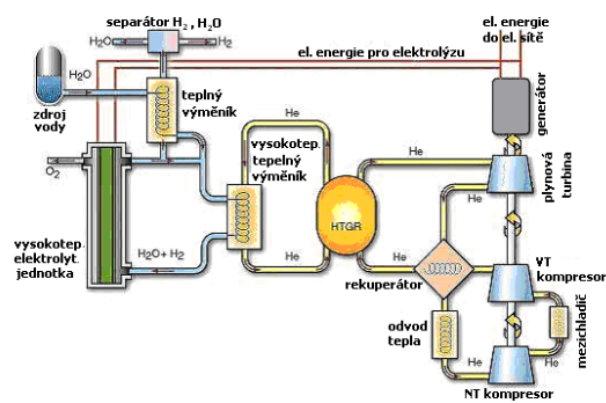
Obrázek 11 Elektrolýza vody – Schéma [23]

Vodík vyroben tímto způsobem obvykle není třeba posléze filtrováním zdokonalovat pro další uplatnění. Vznik velice čistého vodíkového plynu a zároveň kyslíku je za pochodu rozkladu látek působením elektrického proudu. Toto je metoda s efektivitou o rozsahu 80 % až 90 % produkce vodíku. Efektivita týkající se ustáleného proudu je přibližně 30 – 40 %. Na výrobu jednoho kilogramu vodíku připadá šedesát kilowatthodin elektrické energie a devět kilogramů vody, neboli devět litrů. Zhruba jeden kilogram vodíku se v automobilu spálí během jízdy vzdálené sto kilometrů. Při produkci vodíku vzniká také kyslík. Vyrobený kyslík nachází uplatnění v obrovském spektru možností a to je pro tento proces velice pozitivní. [23]

3.3.1.3 Vysokoteplotní elektrolýza

Ve srovnání s obyčejnou elektrolýzou vody má tato metoda zesílenou intenzitu celkové efektivity produkce. Je toho docíleno přivedením dvou rozlišných druhů energie. Jeden druh energie je poskytnut dodáním elektrické energie a druhý druh energie je dodané teplo. Kvůli dopravenému teplu se tato metoda může také označovat i jako parní elektrolýza, což je rozklad látek působením elektrického proudu v páře. V palivových článcích s tuhými oxidy se odehrává děj opačný k procesu konajícího se v zařízení. Tento aparát, ve kterém se uskutečňuje elektrolýza (elektrolyzér), vydrží zároveň vysoké teploty. Vodík a vodní pára vstupují do elektrolyzérova a obohacená směsice skládající se ze 75 % hm vodíku a 25 % hm páry z tohoto elektrolyzérova vychází. Ve srážeci se pak vodík odloučí od páry. Vysokoteplotní elektrolýza vody i s energií, která se vyrábí pro funkci této metody, má celkovou efektivnost, která nabývá hodnoty až pětáctičet procent produkce vodíku. Touto metodou je možné produkovat vodík v obrovském množství. Vysokoteplotní elektrolýza vody a termochemické cykly štěpení vody jsou si velice vyrovnanými metodami pro výroby většího množství vodíku. [23]

Jaderné reaktory s pokročilým vývojem mají vysokou účinnost transformace na elektrickou energii. Výstupní teploty chladicí látky jsou značně vysoké, a tudíž se tento výrobní proces vodíku nazývá vysokoteplotní elektrolýza vody. Na uvedeném Obrázku 12 můžeme vidět zobrazené schéma reaktoru zchlazovaného plynem ve spojitosti s elektrolýzou, která probíhá za vysokých teplot. [40]



Obrázek 12 Plynem chlazený reaktor v souvislosti s elektrolýzou při vysokých teplotách [40]

3.3.1.4 Termochemické cykly štěpení vody

Pomocí řady chemických procesů se termochemickou štěpnou reakcí voda rozpadá na kyslík a vodík. Tyto reakce pak využívají energie v podobě vysoko potenciálního tepla, anebo v případě etap smíšením tepla a elektřiny. V období na přelomu sedmdesátých a osmdesátých let dvacátého století, kdy se hledala náhrada za fosilní paliva, tudíž vytváření alternativních paliv z ekonomického hlediska, začínal výzkum termochemických cyklů štěpení vody. Toto období bylo dobou krize, co se týče produkce ropy. Téměř jednačtyřicet let už tato metoda produkce vodíku existuje. Cykly, kde se při probíhajících procesech obnovují chemické látky, které už byly využity a do běžícího procesu se nanovo aplikují, jsou nazývány uzavřené cykly. [23]

Pro udržení rozvoje prostřednictvím termochemických reakcí jsou splněny dvě podmínky. Zaprvé se teplo z jaderných elektráren vytváří bez přítomnosti skleníkových plynů. Další podmínkou je ta skutečnost, kdy je vodík vyprodukován pouze z vody, což představuje

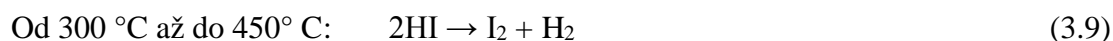
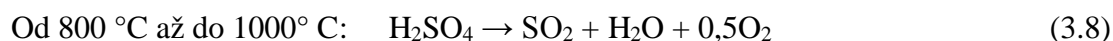
takřka tzv. nevyčerpatelný pramen. Vedlejším produktem této metody je kyslík. Efektivita vytvořené elektrické energie nesnižuje efektivitu produkce vodíku.

Vývoj reaktorů čtvrté generace vypomáhající hlavně při postupném vývoji vodíkové ekonomiky, ke které se postupně přestupuje, se znovu projevuje jako známá alternativa k produkci vodíku pomocí metody termochemických dějů. Jaderná energie v tomto případě napomáhá při výrobě velkého množství vodíku termochemickými reakcemi. Výhodiskem jsou náklady a celková účinnost, ve které by bylo potřeba dopracovat se k padesáti procentům. Z hlediska ekonomického soupeření s ostatními metodami se termochemický siřičito – jódový cyklus ve spojitosti s reaktorem produkující vysoké teploty ukazuje jako nejvhodnější a nejstálější. [40]

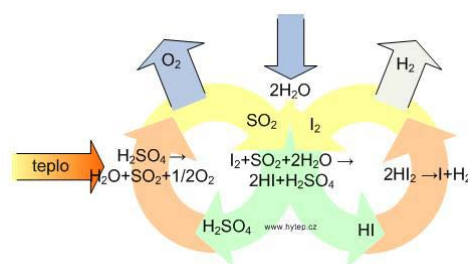
3.3.1.5 Siřičito - jódový cyklus

Ve zkratce se nazývá S-I cyklus. Tato termochemická metoda zásluhou jaderné energie produkuje vodík. Tvorba vodíku má dva hlavní aspekty: skvělá efektivita a nízká cena produkce. V polovině 70. let 20. století byla v Americe ve městě San Diego vytvořena firmou General Atomics termochemická metoda siřičito – jódový cyklus.

Z této metody se získává především vodík a jako vedlejší produkt kyslík a nízkopotenciální teplo. Látkou při počátečním dodávání do procesu se používá jen voda, která je tekutého skupenství a vysokopotenciální teplo, což je prostředí o vysoké teplotě. Pevné nebo plynné látky se v této metodě nepoužívají jako počáteční materiál do procesu produkce vodíku. Dostáváme se k principu funkce této metody, kde se znovu využije již aplikovaný jód a oxid siřičitý, při čemž by další odpadní zbytky již neměly vznikat. Je ale zřejmé, že nějaký deficit v oběhovém ději nepochybně nastává. Termochemické reakce zohledněné v rovnicích při výrobě vodíku u rozličných teplot:



V rovnici (3.7) je zachycen Bunsenův děj, při kterém vznikají kyselina jodovodíková a kyselina sírová při reakci oxidu siřičitého a jódu s počáteční přidanou vodou. Rozklad kyseliny sírové, doprovázený spotřebou tepelné energie, v rovnici (3.8) spotřebovává velké množství tepla. Poslední znázorněná rovnice (3.9) poukazuje na výrobu vodíku, při které se současně rozkládá kyselina jodovodíková, což probíhá při teplotě zhruba kolem 375° C . Celý proces siřičito – jódového cyklu je zobrazen na Obrázku 13.



Obrázek 13 Schéma separace vodíku a kyslíku od vody siřičito – jódovým cyklem [23]

Efektivnost oběhu vzroste, pokud nastane zvýšení tepelné energie. V této metodě produkce vodíku se pohybuje celková efektivnost v rozmezí 40 - 52 %, kde u teploty 950° C je efektivita kolem 50 %. U tohoto procesu se teplo nemusí převádět na elektrickou energii, přičemž samozřejmě vznikají nějaké ztráty, tak jak to bylo u elektrolýzy, a tudíž z toho vyplývá, že tato metoda je efektivnější v produkci vodíku.

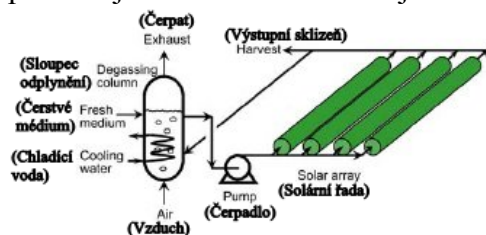
U tohoto typu produkce vodíku se musí aplikovat velice rezistentní materiály proti chemikáliím a to z důvodu, že zde působí dvě vysoce agresivní kyseliny, kterými jsou kyselina jodovodíková a kyselina sírová. Agresivita kyselin a vysoké teploty, které jsou vyžadovány jako počáteční teploty, se jeví jako nevýhody cyklů této metody. V průmyslu nastává potíž při řízení reakcí, aby měly správné podmínky pro korektní funkčnost. [23]

3.3.1.6 Biotechnologická produkce vodíku

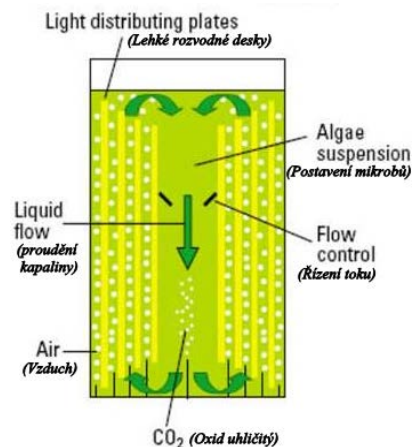
Produkce vodíku použitím mikroorganismů je další možností jak získat vodík, ale tato metoda bohužel ještě není plně vyvinuta.

Termochemické procesy přeměny náležitou surovinu v podobě vysušené biomasy na energii. Jelikož termochemickými procesy nelze reformovat biomasu obsahující velké množství vody na energii, je tu dle hospodárného východiska nízké využití. Z tohoto důvodu se dají použít u mokré biomasy biotechnologické reakce. Tyto biotechnologické procesy, které probíhají jen při určitých podmínkách, kterými jsou malé tlaky a nízké teploty v prostoru jim příhodné, jsou mikroby urychlovány. Tento způsob produkce vodíku rozdělujeme na dva děje. Zprvce se jedná o proces biologické fotofermentace pro výrobu vodíku a druhým procesem je děj, který probíhá bez existence světla, což je vodíková fermentace.

Fotofermentace je proces probíhající při mikrobiálním rozkladu organického materiálu, což se odehrává bez přístupu vzduchu. Ve fotofermentaci se reformují jen organické látky. Při použití světla je zapotřebí acetátu, který se reformuje na oxid uhličitý a vodík za působení bakterií. Tento proces lze spojovat i s vodíkovou fermentací produkující acetát, která je objasněna níže. Bakterie, které nesou název purpurové, se používají při fotofermentaci. Existuje obrovské množství použitelných druhů mikrobů k fotofermentaci a tyto bakterie jsou jedněmi z nich. Ve skutečnosti se využívá jen jeden druh fotobioreaktorů, viz Obrázek 15, který je účelně provozuschopný, i když už spousta návrhů již bylo předvedeno, ale prakticky nerealizováno. Kompletní schéma produkujícího fotobioreaktoru je znázorněno i na Obrázku 14.

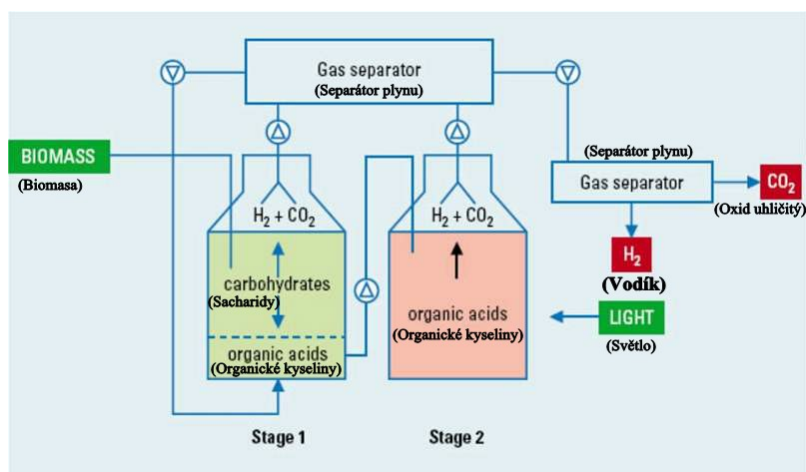


Obrázek 14 Fotobioreaktor - Schéma (produkce) [9]



Obrázek 15 Schéma řezu fotobioreaktoru nazývajících se "flat - plate" [23]

Vodíková fermentace, což je druhý způsob biologické produkce vodíku probíhající při mikrobiálním rozkladném procesu organických látek bez přístupu vzduchu anebo v bezkyslíkatém prostředí, se u obou dvou způsobů přírodní cestou odehrává bez působení světelného paprsku. Výroba energie a hlavně produkce



Obrázek 16 Schéma dvoustupňového bio procesu - Stage 1: vodíková fermentace; Stage 2: fotofermentace [23]

vodíku mají své původce, čímž jsou organické látky. Při oxidaci organických látek se elektrony ukládají díky vodíku, který vzniká ze zjednodušení protonů během neúčasti kyslíku, což používají rozdílné typy nejjednodušších jednobuněčných mikroorganismů. Aby se tato metoda stala efektivní, je nezbytné použít dva procesy, které ze substrátu upotřebí veškerou chemickou energii, viz Obrázek 16. Prvním stádiem je použitá metoda s názvem vodíková fermentace, která zapříčiní výrobu vodíku ze živné půdy, kde jsou organické látky. Druhým stádiem pro produkci vodíku se stala metoda nesoucí název fotofermentace, jež je popsána v odstavci výše. Zde, ve druhém stádiu, se dosahuje i bioplynu, který se vytvořil z acetátu vyskytujícího se v průmyslové odpadní vodě. Části, co zbyly z biomasy, které jsou nerozložitelné, se dají ještě upotřebit v procesu spalování, přičemž spalováním zbytků získáme energii o ještě větším rozsahu.

Bohužel produkce vodíku biotechnologickými metodami, fotofermentací a vodíkovou fermentací, je množství velice nízká. Ale po ekologické stránce se jedná o nadějně metody, přičemž se nemusí zabírat zemědělské půdy jako třeba u výroby fosilních paliv s jejich biosložkami. Co se týče komplikovaného upravování materiálu, který je na počátku oběhu, mají biologické metody velkou výhodu, protože ho dokáží zpracovat. [23]

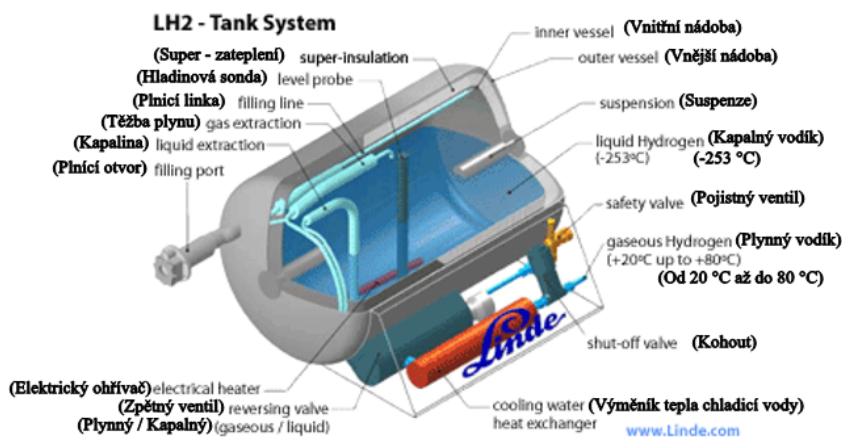
3.3.2 Uskladnění vodíku

V problematice uskladnění vodíku se jedná hlavně o přísné dodržování stanovených bezpečnostních norem při produkci, uskladňování a celkovém zacházení s vodíkem, protože vodík je označován jako nebezpečný plyn. Výbušnou směs tvoří obsah vodíku v rozhraní od 4,1 až do 74 obj. % sloučený s kyslíkem. Dále výbušnou směs tvoří vodík smíchaný s chlorem anebo s fluorem. Teplota zápalnosti je 530° C. Dle jednotlivých zemí jsou předpisy pro zabezpečení vodíku odlišné. Pro veškeré vodíkové technologie se jeví metoda skladování vodíku díky skvělé energetické účinnosti a i kvůli finanční přístupnosti v budoucnu jako klíčová. Uskladnění vodíku je také ztěžováno dvěma různými činiteli a to je způsobeno tím, že vodík má ze všech možných paliv nejnižší teplotu přivádějící chemický prvek do varu a dále také nejmenší hustotu.

Vodík se může uskládat dvěma způsoby - buď jako alternativní, nebo konvenční technologií. Na uskládání vodíku alternativními metodami se používají třeba komplexní hydridy, nanostruktury uhlíku, metalydridy nebo je vodík zaobalen jako prvek v ostatních chemických látkách. Dalším způsobem pro uskladnění vodíku je konvekční technologie, která je členěna na nádoby kapalného skupenství vodíku, kterými jsou kryogenní nádrže a nádoby pro plynné skupenství vodíku, což jsou hlavně nádrže tlakové. [38]

3.3.2.1 Uskladnění vodíku v kapalném skupenství

Teplota pohybující se o hodnotě -253°C je pro zkapalněný vodík teplotou uskladňovací. Energie dosahující kolem 40 %, jež je taktéž obsáhlá v plynném skupenství, je při zkapalňování spotřebovávána, což je jedním z důvodů teploty uskladnění. Dalším



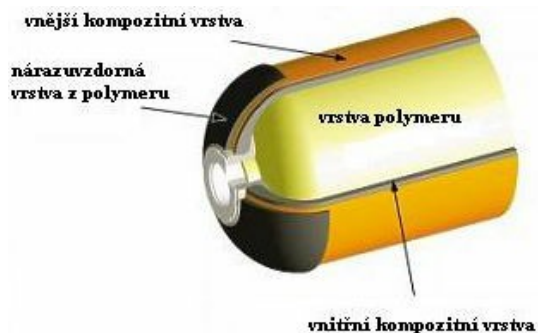
Obrázek 17 Nádrž pro kapalný vodík (kryogenní nádrž) [39]

důvodem týkajícím se uskladňovací teploty je použití náležitých bezpečnostních prvků a vhodných materiálů na skladování vodíku. Nádrže využívající se ke skladování kapalného vodíku s přetlakem o nejvyšší možné hodnotě 0,5 MPa mající výborné tepelné vlastnosti a stěny nádob se vyrábí i několikanásobně vrstvené, viz Obrázek 17. Bohužel zásluhou tepla pronikajícího z prostředí do kryogenních nádob v nich vzrůstá tlak z důvodu postupného odpařování. Jednou za čas je nutné z nádob uvolnit nadbytečný tlak, aby se nádoby přílišným přetlakem nepoškodily. Za pouhý jeden den se ztratí zhruba 3 % z celkového množství vodíku vypařováním a odpouštěním z důvodu uskladňování v obyčejných nádobách. [38]

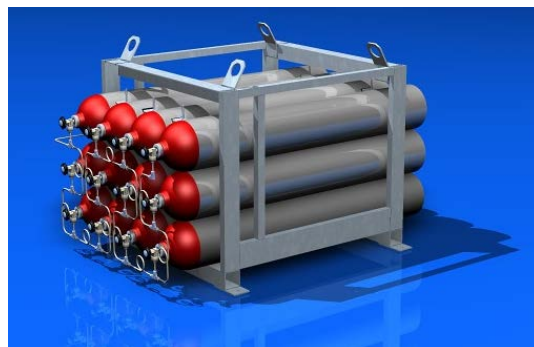
3.3.2.2 Uskladnění vodíku v plynném skupenství

Nejčastěji se k uskladnění vodíku v plynném stavu v České republice používají láhve o objemu 50 litrů. Nejvyužívanějšími materiály jsou legované chrom-molybdenové ocele či ocele s nízkým obsahem uhlíku. Pro tyto tlakové láhve a pro jejich výrobu je aplikována metoda zpětného protlačování, tudíž jsou tlakové láhve bezešvé. V České republice je možnost vytvořit i láhve s objemem 150 litrů zásluhou producenta s nejrozsáhlejší produkcí tlakových lahví. Nádoby neboli tlakové láhve zhotovené v rozmezí objemového množství kolem 10 až 300 litrů jsou kompozitní. Tyto láhve jsou následně vyráběny většinou pro automobilový průmysl, např. autobusy nebo automobily. U těchto lahví je zapotřebí zamezit plynu, aby nemohl ucházet prostřednictvím stěn složených z různých uspořádaných materiálů. To se učiní tím, že tlakové láhve mají na interní ploše povlak tvořený ze speciálních polymerů, eventuálně je možnost použít jako potah kov, jenž je v tlakové láhvi slabě nanesen, viz Obrázek 18. V dnešní době je 100 MPa maximálním možným tlakem, který byl otestován

pouze za okolností využitých ve vědeckovýzkumných institucích. Tlak v rozmezí od 45 MPa až do 70 MPa je využíván u nemodernějších metod tlakových láhví, avšak tlak 20 MPa či 35 MPa je obvyklým a nejčastěji používaným v nádobách pro uskladňování plynného vodíku. Sloučením více tlakových nádob do jedné „obrovské“ nádoby je obvyklou možností, jak touto metodou zvětšit celkový objem prostředí pro akumulaci plynného vodíku, viz Obrázek 19. [38]



Obrázek 18 Schématický řez tlakovou nádobou pro skladování plynného vodíku [23]



Obrázek 19 Spojení několika tlakových nádob do jedné s několikanásobně vyšším objemem [38]

3.3.3 Transport vodíku

Vodík oproti například zemnímu plynu má v jednom metru krychlovém nižší výhřevnost a to zhruba o dvě třetiny. Tudíž z tohoto plyne, že kvůli tomuto jevu je jedním z nejdražších transportů paliv právě přeprava vodíku. V praxi to vypadá asi tak, že vodík



Obrázek 20 Možnosti přepravy vodíku [11]

se dopravuje v třikrát větším množství, než zemní plyn o shodné energetické hodnotě. Transport vodíku se uskutečňuje dvěma způsoby. Jedna z variant dopravy vodíku je v tlakových nádobách, ve kterých může být též skladován, další variantou může být doprava pomocí plynovodů, viz Obrázek 20. [44]

3.3.3.1 Transport pomocí tlakových nádob

Ve formě plynu nebo kapalném skupenství je možné touto metodou přepravovat vodík. Pro spotřebitele, kteří nemají velkou spotřebu, je aplikována tato metoda v podobě transportu vodíku v tlakových nádobách, viz Obrázek 21. Jelikož je cena transportu považována za vyšší, vzroste i celková cena produkce



Obrázek 21 Transport vodíku v tlakových nádobách [12]

vodíku. Toto navýšení ceny bude poté dvakrát až pětkrát větší. Bateriové vozy mající tlak kolem dvaceti až šedesáti MPa se používají pro přepravu vodíku v plynném skupenství.

Pomocí uložiště, viz Obrázek 22, které je zhotoveno ze dvou izolačních vrstev a za působení vakua uvnitř nádoby, se zprostředkovává transport kapalného vodíku. Jelikož je za potřebí, aby vodík občas i pár dní setrval v uložišti v kapalném skupenství, je u izolantu nádoby nutností, aby dosahoval dostatečné jakosti. Z těchto přepravujících uložišť je vodík uvolňován ovládaným odpařováním neboli zvyšováním tlaku. Většinou jsou tyto zásobárny zhotovovány o objemu kolem 60 m³. Holandsko, Francie a Německo jsou evropské státy, ve kterých je užívána tato metoda transportu kapalného vodíku, jež je především uplatňována v průměrně rozsáhlých podnicích. Z hlediska přepraveného množství vodíku v jednotlivých evropských zemích tímto způsobem je přepraveno pět tun vodíku denně v Holandsku, dále deset tun ve Francii a následuje Německo s dopravou tří tun vodíku za den. [44]



Obrázek 22 Uložiště vodíku - s odpařováním nebo tlakové [27]

3.3.3.2 Transport pomocí plynovodů

Pokud je v nějaké oblasti shromážděno více zákazníků a odběratelů vodíku, lze použít metodu transportu vodíku pomocí plynovodů, kterou je možno producenty vodíku propojit s odběrateli a zákazníky potrubím dopravující plyný vodík, viz Obrázek 23. Provozní schopných potrubí transportující vodík je více než jeden tisíc kilometrů rozprostřených po celém světě. V Německu je jeden z nejdůležitějších řetězců přepravy plyného vodíku, kterých se vyskytuje několik po celém světě. Území Německa pokrývá více než 200 kilometrů celkové délky potrubí usazeného ve výšce přibližně jednoho metru nad povrchem země, při jehož provozu vznikají ztráty zhruba 1 %. Průtok tohoto potrubního řetězce je kolem 50 milionů m³/1h o průřezu potrubí 20 centimetrů a 2 500 kPa, což je tlak v potrubí, při kterém se vodík transportuje. Obdobné parametry jako potrubí v Německu má i provozuschopný řetězec plynovodů v Texasu ve Spojených státech amerických o délce kolem 96 kilometrů, viz Obrázek 24. Třeba Velká Británie, Francie nebo i ostatní státy světa disponují potrubními řetězci na transport vodíku v menším měřítku, než mají Německo nebo Texas (USA).

U plynovodů se musí dbát na dokonalou těsnost a to z důvodu, že plynný vodík má vysokou schopnost rozptylu. Kvůli nežádoucím účinkům, což je rozrušení materiálu vlivem vodíku a křehnutí materiálu působením vodíku, nastávají velké potíže při přepravě vodíku tímto způsobem. [44]



Obrázek 23 Potrubí transportující vodík (Plynovod) [27]



Obrázek 24 Potrubí přepravující vodík v Texasu ve Spojených Státech Amerických [44]

3.3.4 Základ bezpečnosti při manipulaci s vodíkem

Veškerá paliva mají společné vlastnosti, kterými jsou hořlavost, výbušnost a velké množství energie. Díky těmto vlastnostem jsou tato paliva v dopravních prostředcích méně bezpečná, avšak jsou potřebná pro funkci motorů, pomocí kterých můžou pracovat. Tak tomu je právě i u vodíku. Tento druh paliva potřebný pro provoz palivových článků má velice malé vnitřní tření (viskozitu). Jak je zmíněno již výše, při úniku vodíku se okamžitě rozptýluje do ovzduší kvůli jeho malé hustotě a dále s kyslíkem reaguje v hořlavou a výbušnou směs. Bohužel toto palivo, pokud dojde k jeho ztrátě, není vidět ani cítit. Je možnost, že se vodík sám vznítí i při spěšném rozpínání. Výhodou vodíku oproti jiným palivům je, že při úniku díky jeho malé hustotě (má 14x menší hustotu nežli vzduch) stoupá plyn nahoru do ovzduší, tudíž vzplanutí nenastane v nádrži automobilu, jako tomu je u fosilních paliv, ale mimo ní. Pokud se vodíkové nádrže, ve kterých se dokonce uchovává méně paliva než u běžných paliv, instalují na patřičná místa, je možné snížit míru nebezpečí na přijatelnou mez. Co se týče škodlivosti lidského zdraví, je toto palivo nezávadné. [23]

4 Typy automobilů využívající palivové články

Tyto automobily, které získávají elektrickou energii z palivových článků pro pohánějí elektromotor, mají velmi srovnatelné jízdní vlastnosti a parametry s konvenčními vozidly se spalovacím motorem.

4.1 Kia Borrego FCEV

<i>Počáteční rok výroby:</i>	2010
<i>Výkon:</i>	113 kW
<i>Maximální dojezd:</i>	680 km
<i>Maximální rychlost:</i>	160 km/h
<i>Akcelerace:</i>	z 0 na 96 km/h za 12,8 s



Obrázek 25 Kia Borrego FCEV [24]

Tento automobil Kia Borrego s označením FCEV, viz Obrázek 25, místo výfukových plynů produkuje jen čistou vodu (H_2O), jelikož elektromotor pohánějí automobil získává elektrickou energii z palivových článků. Díky tomuto způsobu pohonu je tato metoda šetrná k životnímu prostředí. Předchozí model Kia s palivovými články měl výkon 78 kW. Tento novější model Kia Borrego FCEV se chlubí výkonem 113 kW, jenž vytváří elektromotor poháněn palivovými články. Zrychlení tohoto vozu se pohybuje z 0 na 96 kilometrů za hodinu kolem 12,8 vteřin s maximální dosažitelnou rychlostí až 160 kilometrů za hodinu a efektivností vozidla kolem 62%. V tomto automobilu se využívá kondenzátor o napětí ve výši 450 V pro shromáždění a uskladnění získané elektrické energie pomocí elektrochemického procesu oksyločvadla s vodíkem z palivových článků. Výhodou tohoto automobilu je, že pokud jsou nepříznivé mrznoucí podmínky a teploty klesnou do záporných hodnot, tak na chod vozidla to přesto nemá sebemenší vliv. Tento vůz má maximální dojezd až 680 kilometrů zásluhou dvou až tří vysokotlakých nádrží vodíku. Automobily se zážehovými a vznětovými motory v kategorii SUV, co se týče zrychlení a maximální rychlosti mají velice podobné hodnoty ve srovnání s tímto modelem od automobilky Kia využívající palivové články. [25], [24]

4.2 Honda FCX Clarity

Počáteční rok výroby:	2008
Výkon:	100 kW
Maximální dojezd:	460 km
Maximální rychlost:	160 km/s
Akcelerace:	z 0 na 100 km/h za 9 s



Obrázek 26 Honda FCX Clarity [16]

Tento automobil Honda FCX Clarity, viz Obrázek 26, poháněn palivovými články vznikl v roce 2008. Je tedy vybaven palivovými články pro vytváření elektrické energie, přičemž se zpomalováním získává a shromažďuje energie především do akumulátoru Li-ion 288 V. Tento akumulátor se vyskytuje v zadní části vozidla. Bohužel objem zavazadlového prostoru se musel zmenšit kvůli vodíkové nádrži, která je umístěna za zadními sedadly, nad zadní nápravou vozidla. Ale i tak zůstala využitelnost zavazadlového prostoru na vysoké úrovni, jeho objem činí 371 litrů. Tlakový zásobník paliva má totiž velikost 171 litrů. V něm je stlačen vodík o tlaku 35 MPa. Při tomto tlaku je možné naplnit nádrž jen čtyřmi kilogramy paliva, jímž je vodík. Díky této vlastnosti zvládne tento vůz ujet na jedno natankování maximálně 460 kilometrů. Palivový článek, ze kterého se získává elektrická energie pomocí plynného vodíku a okysličovadla, je velice skladný. Proto je umístěn uprostřed automobilu mezi sedačkou spolujezdce a sedačkou řidiče. Tento elektromotor poháněn palivovým článkem dokáže vyvinout nejvyšší možný výkon kolem 100 kW. Je umístěn v přední části automobilu. Točivý moment na předních kolech disponuje hodnotou 256 N*m. Účinnost tohoto vozidla dosahuje 60 %. Automobily poháněné dieselvými motory mají pro porovnání účinnost necelých 30%. Spotřeba se pohybuje po ujeté vzdálenosti 100 kilometrů kolem 2,8 litrů. Z nuly na sto kilometrů za hodinu dokáže tento vůz zrychlit za 9 vteřin. Dokáže vyvinout maximální rychlost až 160 kilometrů za hodinu. [16], [17], [41]

Honda FCX Clarity má také už i nástupce - novější model Honda FCV Clarity, viz Obrázek 27. Některé prototypy byly již zhotovené v roce 2016. V porovnání s předchůdcem má nová Honda FCV Clarity dvě propojené nádrže na vodík. Jednu se standardní velikostí a druhou menší. Vodík v nádrži je pod dvojnásobným tlakem, než byl u předchozího modelu. Proto také celkem pojme něco málo přes 5 kg paliva. Natankování plné nádrže je něco kolem tří minut. Výkon je navýšen o 30 kW. Maximální vzdálenost, jakou dokáže ujet na jedno natankování, je kolem 700 km. [6], [15]



Obrázek 27 Honda FCV Clarity [15]

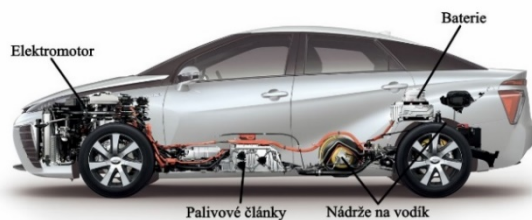
4.3 Toyota Mirai

Počáteční rok výroby:	2014
Výkon:	113 kW
Maximální dojezd:	500 až 700 km
Maximální rychlost:	179 km/s
Akcelerace:	z 0 na 100 km/h za 9,6 s



Obrázek 28 Toyota Mirai [28]

Toyota Mirai, viz Obrázek 28, se začala v Japonsku prodávat 15. prosince roku 2014, tudíž je k dispozici pro veřejnost. Tento automobil je poháněn střídavým synchronním elektromotorem. Dokáže vyvinout výkon o 113 kW. Točivý moment na předních kolech je 335 N*m. Elektromotor je poháněn elektrickou energií vyprodukovanou blokem palivových článků. Ty jsou ve vozidle umístěny pod povrchem podlahy. Při provozu uvádí výrobce hodnotu efektivnosti 83 %, kdežto dosažené hodnoty jsou u spalovacích motorů dvakrát nižší. Aby palivové články mohly produkovat elektrickou energii, je zapotřebí vodíku jakožto paliva a okysličovadla v podobě kyslíku, který je hnán do palivových článků kompresorem z okolního vzduchu. Může být trochu hlučnější a připomínat nám motoristický zvuk. V zadní části vozidla, za sedadly, jsou uloženy nikl – metal – hydridové baterie 244 V. Ty napomáhají dodávat elektrickou energii do elektromotoru při startu palivových článků nebo při vysokém zatížení elektromotoru. Také se v nich shromažďuje elektrická energie vlivem zpomalování vozidla, tedy brzděním, nebo jízdou z kopce. Má dvě propojené palivové nádrže o celkovém objemu 122,4 litrů, které jsou umístěné pod zadními sedadly. Do těchto nádrží se vejde 5 kilogramů vodíku, který je stlačený tlakem 70 MPa nebo maximálně 87,5 MPa. Doba natankování plné nádrže vodíkem trvá kolem pěti minut. Podle stylu jízdy dokáže automobil na tyto dvě plné nádrže ujet 500 až 700 kilometrů. Pokud jízda nebude dosahovat agresivního stylu, tak by se spotřeba paliva na sto kilometrů měla pohybovat kolem 0,76 kilogramů. Zavazadlový prostor v tomto vozidle činí 361 litrů. Tento elektromobil zrychluje z nuly na sto kilometrů v hodině za 9,6 vteřiny. Dokáže jet maximální rychlostí až 179 kilometrů za hodinu. Přitom jeho hmotnost je 1849 kilogramů, což není úplně málo. Při probíhajících elektrochemických reakcích v palivových článcích vzniká jako vedlejší produkt voda. Teplota vzniklé vody se pohybuje kolem 80 °C. Místo zplodin, které vycházejí z výfuků u spalovacích motorů, u elektrovozidla z výfuku vytéká pouze čistá voda beze stop minerálů nebo jiných látek. Dle množství spotřebovaného vodíku v palivových článcích se pak vytváří odpovídající množství vody. Je to zhruba 7 litrů na sto ujetých kilometrů. Rozmístění jednotlivých komponentů ve vozidle je zobrazeno na Obrázku 29. [28], [37], [43]



Obrázek 29 Toyota Mirai - Rozložení jednotlivých komponentů ve vozidle [43]

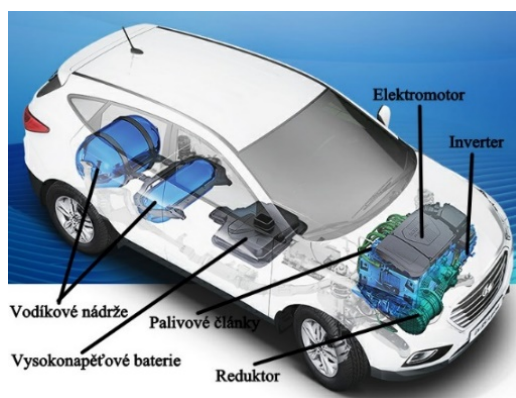
4.4 Hyundai ix35 FCEV

Počáteční rok výroby:	2012
Výkon:	100 kW
Maximální dojezd:	580 km
Maximální rychlost:	160 km/s
Akcelerace:	z 0 na 100 km/h za 12,5 s



Obrázek 30 Hyundai ix35 FCEV [22]

Hyundai ix35 Fuel Cell, viz Obrázek 30, se začal sériově vyrábět již v roce 2012. Je poháněn trakčním elektromotorem. Elektromotor dostává vytvořenou elektrickou energii z palivových článků, jejichž výkon dosahuje 100 kW, pomocí vodíku jakožto paliva a kyslíku. Jako vedlejší produkt při výrobě elektrické energie vzniká vodní pára, jež je z vozu výfukovým potrubím vypouštěna do ovzduší. Má nulové hodnoty oxidu uhličitého. Tento elektromobil váží celkově 2 290 kilogramů. Co se týče zavazadlového prostoru, tak ten disponuje objemem 551 litrů. Automobil je vybaven dvěma propojenými nádržemi na vodík. Jedna je menší a je uložena pod zadními sedadly a druhá větší nádrž je umístěna za zadními sedadly. Dohromady pojmu palivo o objemu 144 litrů. Tím pádem se tam vejde 5,6 kilogramu vodíku stlačeného tlakem 70 MPa. Na toto množství paliva dokáže vozidlo ujet vzdálenost 588 kilometrů. Průměrná spotřeba po sto ujetých kilometrech činí 0,95 kilogramů vodíku. Ve městě dosahuje spotřeba 0,89 kilogramů na sto kilometrů a mimo město, např. po dálnici, jsou hodnoty vyšší - asi kolem 0,99 kilogramů vodíku na sto ujetých kilometrů. Ve středu automobilu pod povrchem podlahy je uložen kompaktní a lehký lithium - polymerový akumulátor složený z více Li-ion baterií o výkonu 24 kW. Do něj se ukládá energie nespotebovaná elektromotorem z palivových článků a dále se do něj může ukládat také energie nashromážděná při brzdění. Akumulátor společně s palivovým články vytvoří dostatečnou elektrickou energii pro vyšší zrychlení. Dále se u elektromotoru vyskytuje inverter, který nám přeměňuje stejnosměrný proud vyprodukovaný palivovými články na proud střídavý, kterým lze pohánět elektromotor. Dalším prvkem, který pomáhá měnit otáčky motoru a točivý moment je reduktor používající se místo klasické převodovky. Hyundai ix35 FCEV díky svému výkonu 100 kW dokáže jet rychlostí maximálně 160 kilometrů za hodinu. Z nuly na sto kilometrů v hodině akceleruje za 12,5 vteřiny. Na Obrázku 31 je zobrazeno rozmístění jednotlivých komponentů v automobilu. [21], [22]

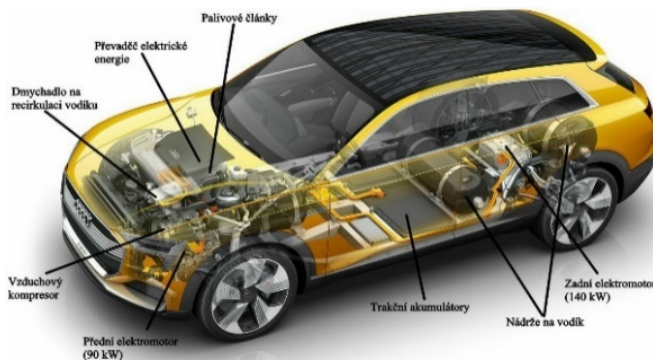


Obrázek 31 Hyundai ix35 FCEV - Rozložení jednotlivých komponentů ve vozidle [22]

4.5 Audi h – tron quattro

Maximální rychlost	200 km/h
Zrychlení	méně nežli 7 s
Výkon	110 kW
Dojezd	až 600 km
Točivý moment	550 N*m
Celkový objem nádrže	-
Množství paliva	6 kg
Tlak v nádrži	70 MPa
Počet nádrží	2
Spotřeba	-
Palivo	vodík
Typ palivových článků	PEMFC
Typ baterie	Li-ion
Hmotnost	-
Obrázek vozidla	Obrázek 33
Obrázek - popis komponentů	Obrázek 32

Tabulka 1 Parametry automobilu Audi h-tron quattro [7], [8]; vlastní zpracování



Obrázek 32 Audi h-tron quattro - Rozložení jednotlivých komponentů ve vozidle [7]

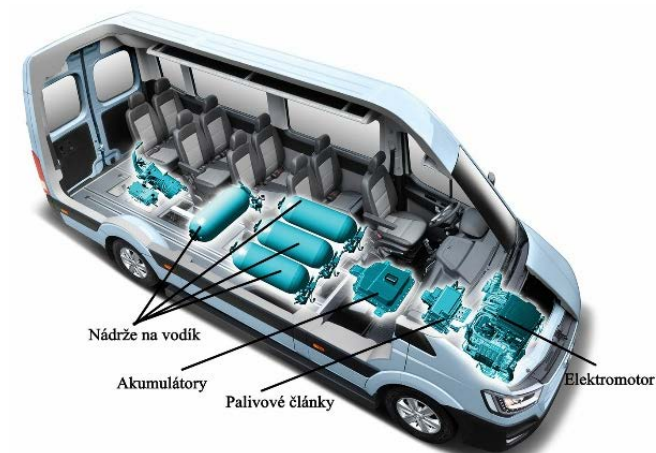


Obrázek 33 Audi h-tron quattro [8]

4.6 Hyundai H350 Fuel Cell

Maximální rychlost	150 km/h
Zrychlení	-
Výkon	100 kW
Dojezd	420 km
Točivý moment	3000 N*m
Celkový objem nádrže	175 l
Množství paliva	6,5 kg
Tlak v nádrži	70 MPa
Počet nádrží	4
Spotřeba	-
Palivo	vodík
Typ palivových článků	PEMFC
Typ baterie	Li-Pol
Hmotnost	-
Obrázek vozidla	Obrázek 35
Obrázek-popis komponentů	Obrázek 34

Tabulka 2 Parametry automobilu Hyundai H350 Fuel Cell [18], [19]; vlastní zpracování



Obrázek 34 Hyundai H350 Fuel Cell - Rozložení jednotlivých komponentů ve vozidle [19]

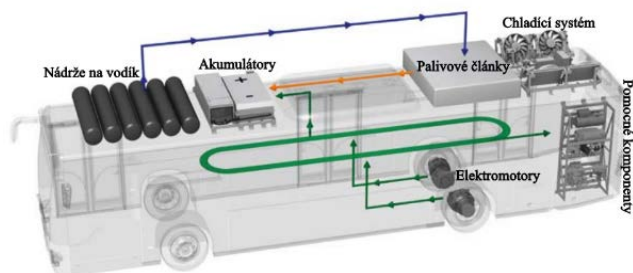


Obrázek 35 Hyundai H350 Fuel Cell [19]

4.7 Mercedes - Benz Citaro Fuel Cell - Hybrid

Maximální rychlost	-
Zrychlení	-
Výkon	250 kW
Dojezd	250 km
Točivý moment	-
Celkový objem nádrže	1 435 litrů
Množství paliva	35 kg
Tlak v nádrži	70 MPa
Počet nádrží	7
Spotřeba	10 - 14 kg
Palivo	Vodík
Typ palivových článků	PEMFC
Typ baterie	Li-ion
Hmotnost	13 200 kg
Obrázek vozidla	Obrázek 37
Obrázek - popis komponentů	Obrázek 36

Tabulka 3 Parametry autobusu Mercedes - Benz Citaro Fuel Cell – Hybrid [42]; vlastní zpracování



Obrázek 36 Mercedes - Benz Citaro Fuel Cell - Hybrid - Rozložení jednotlivých komponentů v autobuse [42]



Obrázek 37 Mercedes - Benz Citaro Fuel Cell – Hybrid [42]

5 Druhy palivových článků

Tyto jednotlivé druhy palivových článků se rozdělují podle toho, jaký mají elektrolyt, a také podle toho, jaká je teplota při chodu palivového článku.

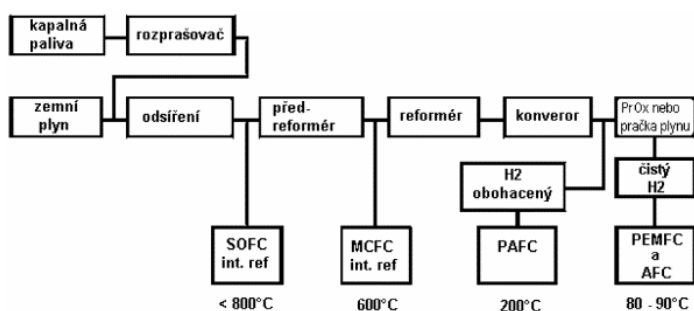
Podle teploty při chodu:

- Nízkoteplotní: 60 až 130 °C,
- Středněteplotní: 160 až 220 °C,
- Vysokoteplotní: 600 až 1050 °C.

Podle druhu elektrolytu:

- Nízkoteplotní a středněteplotní:
 - polymerní elektrolytická membrána (PEM FC – **P**olymer **E**lektrolyte **M**embrane **F**uel Cells / **P**roton **E**xchange **M**embrane **F**uel Cells), katexová iontoměničová membrána,
 - alkalický elektrolyt (AFC – **A**lkaline **F**uel Cells),
 - elektrolyt na základě kyseliny fosforečné (PAFC – **P**hosphoric **A**cid **F**uel Cells),
 - přímé zpracování metanolu (DMFC – **D**irect **M**ethanol **F**uel Cells)
- Vysokoteplotní:
 - elektrolyt na základě tekutých alkalických uhličitánů (MCFC – **M**olten **C**arbonate **F**uel Cells),
 - elektrolyt z pevných oxidů (SOFC – **S**olid **O**xide **F**uel Cells).

Dle těchto kritérií se palivové články také rozdělují ještě podle metody zpracování paliva, metody funkce a užívání, sestavení článku a též dle elektrochemických procesů. [2]



Postup úpravy paliva pro jednotlivé typy palivových článků je znázorněn na Obrázku 38.

Obrázek 38 Úprava paliva pro jednotlivé typy palivových článků [38]



5.1 Palivové články s polymerní iontoměničovou membránou

Označení (zkratka):	PEMFC
Teplota při chodu:	80 až 120 °C
Efektivnost elektrické energie:	45 až 60 %
Výkon:	může dosáhnout 250 kW
Palivo:	vodík a metanol (u metanolu se jedná o vnější reformaci paliva)
Oxidant:	kyslík obsáhlý ze vzduchu
Elektrochemická reakce na anodě:	$H_2 = 2H^+ + 2e^-$ (5.5)
Elektrochemická reakce na katodě:	$1/2O_2 + 2H^+ + 2e^- = H_2O$ (5.6)

Tento typ palivového článku má malou hmotnost a rozměrově je také úsporný, a to jen díky proudové hustotě, která je v tomto případě značně vysoká. Zmenšení koroze schopnosti, s čímž souvisí i prodloužení doby používání, docílíme použitím pevné elektrolytické membrány, která také ještě v chemické reakci usnadňuje utěsnění ucpávkou. Tento druh palivových článků především vyhovuje v automobilovém průmyslu a to proto, že dokáží vytvářet elektrickou energii i za nízkých teplot. Díky provozu s nízkými teplotami mají pohotovostní efekt, při kterém lze přeměnit stávající výkon na výkon potřebný, a také umožňují pohotovostní start palivových článků. Naopak pro reformaci paliva, jenž spotřebovává tepelnou energii, se jí nízkoteplotním chodem palivových článků vytváří nedostatek.

Již v roce 1959 byl uplatněn tento způsob elektrolytu v podobě polymerní katexové membrány panem W. T. Grubbsem. Potřebnou činností u této metody bylo zhotovit plyn, který bude utvářet iontově vodivou bariéru v iontové membráně. Kvůli velice koncentrovaným kyselinám vzniklo mezi membránou, jež je přilehlá, a vnějším katalyzátorem propojení. Dle dalších výzkumů koncentrované kyseliny k chodu palivových článků už nejsou potřeba. V současnosti se aplikuje hydratovaná membrána jako elektrolyt v palivových člancích.

Tento typ palivového článku se skládá ze dvou elektrod. Elektrody jsou opatřeny vrstvou platiny mající uhlíkový podklad s pórovitou strukturou. Na jednu stranu elektrod je nanášena hmota, jejíž vlastností je, aby se voda na elektrody nepřichytávala (např.: teflon). Mezi tyto dvě elektrody se umístí membrána, která je z hlediska protonů vodivá. Jako membrána se například využívá perfluorovaný polymer kyseliny sulfonové.

V podobě katalyzátoru se využívá platina z důvodu nízké teploty pro chod palivového článku. Na elektrodách je zapotřebí dosáhnout elektrochemického procesu a to tím, že elektrody budou obsahovat platinu. Kyslíkové meziproducty a i samotný vodík platina uspokojivě přitahuje a mají možnost na ní ulpět, což je znázorněno v rovnici (5.7). Pokud je platina anodou,

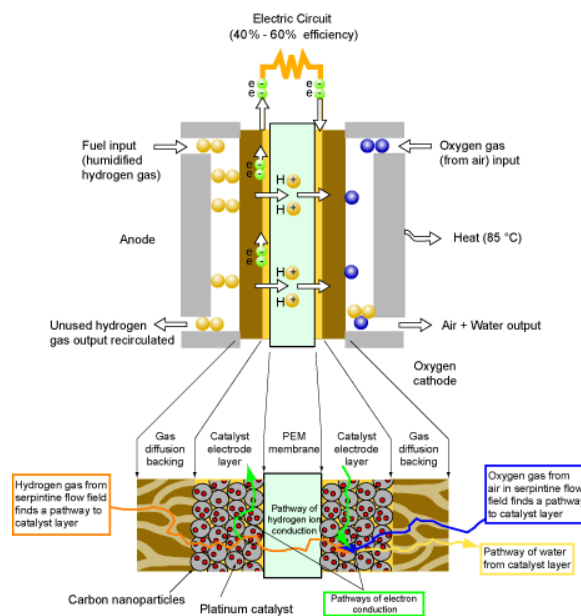
tak na sebe dokáže navázat atomy vodíku, ze kterých poté vzniknou meziprodukty v podobě H^+ a také e^- , popsané v rovnici (5.8).



Plocha s katalytickým účinkem by měla na elektrodách obsahovat co nejvíce místa. Uhlík, ze kterého jsou elektrody tvořeny, musí mít pórovitou strukturu. Na jejich površích je nanesena platina formou malých částí o velikosti cca 2 nanometry. Mnoho malých částí platiny je rozmístěno po celé elektrodě, tudíž i když elektrody obsahují množstevně málo platiny, tak svým obsahem malých částí po celé elektrodě tvoří velkou aktivní plochu. Aktivní plocha je plocha přicházející do styku s plynem, který je reaktivní a hned při kontaktu vytváří potřebné reakce.

Množství platiny na elektrodách udává, jak kvalitní bude plocha s katalytickými účinky. Tloušťka platiny na elektrodách je menší nežli 10 mikronů, což v přepočtu znamená něco kolem 0,15 miligramů platiny na centimetr čtvereční. Kolem 200 mikronů se pohybuje šířka katalytické membrány. Většinou o síle 100 až 300 mikronů je difúzní vrstva, kterou jsou pokryty elektrody. Uhlová tkanina nebo uhlový papír, jenž mají pórovitý povrch, tvoří difúzní vrstvu na elektrodách. Ke katalytickému povrchu elektrod se dostává difúze reagujících látek, což zprostředkovávají difúzní vrstvy na elektrodách, které se vyznačují pórovitým povrchem.

Do tohoto druhu palivového článku ke dvěma elektrodám a katalytické membráně také patří deska, která má dvě funkce. Jednou z nich je odvádění plynu a druhou je rozvádění plynu, čehož je dosaženo tím, že na zevní plochu krycího (difúzního) nánosu je deska přitlačena. Materiál, ze kterého jsou tyto desky vyrobeny, je pevný a lehký. Mezi jeho další vlastnosti patří také vodivost elektrické energie a neměl by skrz něj unikat plyn. Tyto podmínky splňují materiály, jako jsou grafit, kov nebo nějaký druh materiálu složený z více prvků. Pomocí rozváděcích kanálů, které jsou zhotoveny v difúzní vrstvě, se cíleně rozmístuje plyn. Odvod vody od činných povrchů jednotlivých elektrod a také dodávání reagujících látek k nim, je účinné pouze tehdy, pokud tyto kanálky v difúzní vrstvě mají správnou strukturu. Struktura PEMFC je vyobrazena na Obrázku 39.



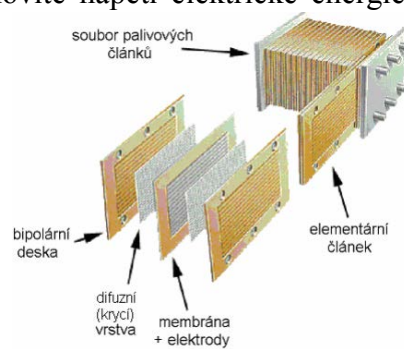
Obrázek 39 Palivový článek s polymerní iontoměničovou membránou – Struktura [32]

Dříve než palivo začne vnikat do palivového článku, musí se tam umístit takový přístroj, který bude filtrovat z reformovaného paliva oxid uhelnatý. Důvodem je, že při teplotách, které

se pohybují pod 150 °C, platina značně přitahuje oxid uhelnatý. Zhruba 1 % oxidu uhelnatého je zahrnuto v každém uhlovodíkovém palivu, jenž už prošlo reformingem. Jen pouhých pár ppm oxidu uhelnatého se v palivech připouští. Díky zařízení, které je umístěno na vstupu do palivového článku se 1 % oxidu uhelnatého zredukuje jen na několik málo ppm.

Z důvodu iontové vodivosti je zapotřebí, aby v elektrolytu byl vždy dostatečný obsah vody. V tomto druhu palivových článků je voda velice důležitá. Voda je v palivových článcích produkována v kapalném stavu. Plné nasycení membrány v palivovém článku vede k lepší a vyšší vodivosti iontů v elektrolytu, což má též za následek vyšší efektivnost a nižší elektrický odpor. Požadavek na kapalný stav vody v elektrolytu je z toho důvodu, aby se zvýšily tlaky a tento typ palivových článků mohl pracovat při teplotách vyšších než 100°C. Bohužel nám životnost palivového článku kapalná voda snižuje.

Více jednotlivých článků se pospojuje do jednoho souboru, viz Obrázek 40, a tím se navýší celkový výkon palivových článků a vzroste jmenovité napětí elektrické energie. Anodový sběrač by byl v zapojení u samostatných palivových článků vedle katodového sběrače. Zařadíme-li více palivových článků do jednoho velkého celku, můžeme použít bipolární desku jako náhradu za sběrače tím, že ji vložíme mezi jednotlivé palivové články. Bipolární deska má dvě strany. Pro rozvod vodíku se používají kanály na jedné straně bipolární desky a pro rozvod kyslíku na druhé straně. V komplexu palivových článků by bipolární deska měla hlavně zmenšit rozměry a snížit hmotnost. [2], [29]



Obrázek 40 Soubor jednotlivých palivových článků – Rozložení [33]

Výhody:

- Funkce palivového článku probíhá při nízkých teplotách. (Snižuje náročnost na použité materiály, zlepšuje bezpečnostní vlastnosti palivového článku, umožňuje okamžité uvedení do chodu.)
- V palivu i okysličovadlu může být i větší množství CO₂. (Tento typ palivového článku může používat vzduch bez odstranění CO₂ jako okysličovadlo.)
- Elektrolyt je z materiálu, na který nepůsobí koroze. (U chodu palivového článku se zvýší bezpečnost.)
- Nemusí se nijak manipulovat s kapalinami, protože je elektrolyt suchý a pevného skupenství. (Elektrolyt je téměř nepohyblivý, tudíž mizí starost s jeho doplňováním.)
- Činnost palivových článků probíhá za menších tlaků. (Navýšení bezpečnosti.)
- Disponují velkou proudovou hustotou, velkou energetickou hustotou a vysokým článkovým napětím.
- Jsou konstrukčně rezistentní a tudíž pevné.
- Jsou sestaveny ze stabilních materiálů.
- Poměrně tvarově nejsou příliš složité.

Nevýhody:

- Dokáží pracovat jen při malém obsahu sloučenin síry. (V řádech několika ppm.)
- V palivu nesmí být větší množství oxidu uhelnatého. ($\text{CO} \leq 50$ ppm.)
- Manipulace s aplikovanými membránami je velice komplikovaná a těž jsou vcelku nákladné.
- V tomto případě jsou katalyzátory platinové, a tudíž jsou celkem nákladné.
- Reaktivní plyn je zapotřebí vlhčit. (Zvýšení rozměrů kompletního zařízení a spotřebování velkého množství energie, zvlhčení vodou se sníží i pracovní teplota.) [30]

5.2 Palivové články s alkalickým elektrolytem

Označení (zkratka):

AFC

Teplota při chodu:

70 až 220 °C

Efektivnost elektrické energie:

45 až 60 %

Výkon:

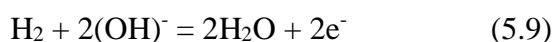
může dosáhnout 20 kW

Palivo:

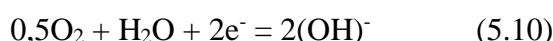
vodík

Oxidant: kyslík (oxidu uhličitého musí být < nežli 50 ppm, jinak zapříčiní otravu KOH)

Elektrochemická reakce na anodě:

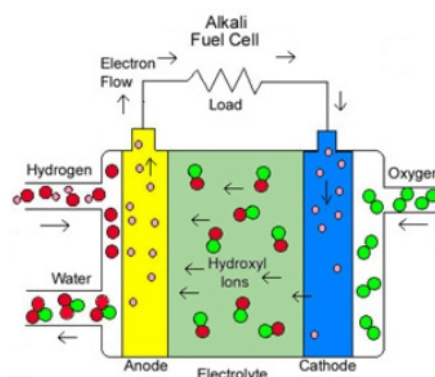


Elektrochemická reakce na katodě:



Ve srovnání s ostatními typy, tento typ palivových článků, viz Obrázek 41, vyniká svým výkonem. Evoluce AFC působí od roku 1960, což z něj činí novodobý palivový článek. Pro získání vysokého výkonu má vliv použití mnoha různých katalyzátorů a také elektrody s účinkem činné kyslíkové kinetiky. Jako katalyzátory pro AFC se dají použít třeba stříbro, oxidy kovů nebo i nikl a všeobecně drahé kovy.

Použití kyseliny fosforečné jakožto elektrolytu je značně horší, nežli použití elektrolytu alkalického co se týče kinetického snížení oxidačního čísla kyslíku. Tento druh palivového článku AFC má schopnost zvýšit proudovou hustotu za stejné efektivity, nebo naopak provést značný nárůst efektivity za stejné proudové hustoty na rozdíl od palivového článku s polymerní iontoměničovou membránou, čehož je docíleno skutečným smyslem použití platiny



Obrázek 41 Palivový článek s alkalickým elektrolytem – Funkce [46]

na elektrodu nazývanou se katoda. Aplikací čistého vodíku do tohoto typu palivového článku dosáhneme zhruba 60 % efektivnosti.

Abychom se vyvarovali vroucí vodě, musíme vzniklému teplu zajistit účinný odvod, a to tím, že elektrolyt v palivovém článku se bude pohybovat. Tento způsob odvádění tepla je využíván jen u některých kompozičních metod.

Aby elektrolyt v AFC měl co nejefektivnější vodivost, preferuje se ze všech možných alkalických hydroxidů právě hydroxid draselný. Při pracovních teplotách, které dosahují přibližně 260 °C, je hydroxid draselný z 85% elektrolytem. Při teplotách dosahujících hodnot nižších než 120 °C, je elektrolytem též hydroxid draselný, ale jen z 35 až 50 %. Obvykle se využívá azbestu pro výrobu matrice, na kterou se váže elektrolyt. Jako palivo tohoto druhu palivového článku se uplatňuje čistý vodík a okysličovadlem je čistý kyslík. Jako okysličovadlo lze použít také vzduch, který obsahuje oxid uhličitý. Oxid uhličitý je nutno ze vzduchu odstranit před použitím vzduchu jako okysličovadla. Pokud by se tak neučinilo, reakcí hydroxidu draselného s oxidem uhličitým by se elektrolyt stal méně hodnotným. [2], [29]

Výhody:

- Okamžitý rozběh. (50 % výkon dokáže AFC vykonat při stejné teplotě, jako je teplota okolní.)
- Téměř žádná korozní schopnost materiálů palivového článku.
- Malé rozměry, tudíž i malý objem a nízká hmotnost.
- Nižší pracovní teplota.
- Dosahují značné efektivnosti.
- Funkce palivového článku je poměrně snadná.

Nevýhody:

- V tomto druhu palivového článku nesmí okysličovadlo ani palivo obsahovat větší množství oxidu uhličitého. (Zhruba $\text{CO}_2 \leq 350$ ppm.)
- Palivo ani okysličovadlo nesmí obsahovat větší množství oxidu uhelnatého. (Jako oxidant se musí používat kyslík, který je zbaven CO, a jako palivo je možné použít reformované palivo, které je zapotřebí zbavit CO, aby vznikl čistý vodík bez oxidu uhelnatého.)
- Skupenství elektrolytu je kapalného stavu. (Pohybování tímto typem palivového článku je velice obtížné a také přibývá starost s doplňováním elektrolytu.)
- Životaschopnost tohoto palivového článku je poměrně nízká. [30]

5.3 Palivové články s kyselinou fosforečnou

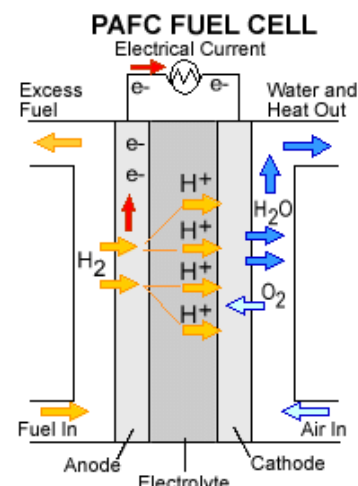
Označení (zkratka):	PAFC
Teplota při chodu:	170 až 200 °C
Efektivnost elektrické energie:	38 až 45 %
Výkon:	může dosáhnout 50 až 100 kW
Palivo:	vodík a zemní plyn (u zemního plynu se jedná o vnější reformaci paliva)
Oxidant:	kyslík ze vzduchu
Elektrochemická reakce na anodě:	$H_2 = 2H^+ + 2e^-$ (5.11)
Elektrochemická reakce na katodě:	$1/2O_2 + 2H^+ + 2e^- = H_2O$ (5.12)

Typy palivových článků s označením PAFC se uplatňují především v obchodním zájmu. Elektrody s typicky pórovitým povrchem byly v 60. letech vyráběny z polytetrafluoretylenu (PTFE), což je teflon. Jejich povrch byl pokryt nánosem černě, ve které se vyskytovaly nepatrné kousičky platiny. Četnost platiny na činném porézním vnějšku elektrody se pohybuje kolem devíti miligramů platiny na centimetr čtvereční.

Čern, která se nanášela s kousičky platiny na elektrody, byla vystřídána v průběhu následujících dvaceti let za grafit s obsahem částic platiny. Množství platiny obsáhlé v černi se ve srovnání s grafitem, jenž platinu též obsahuje, snížila. Nyní jsou jednotlivé elektrody pokryty vrstvou grafitu obsahujícího zhruba půl miligramu platiny na centimetr čtvereční na katodě a na anodě se množství platiny pohybuje kolem jedné desetiny miligramu na centimetr čtvereční.

V tomto typu palivového článku se kyselina fosforečná (100 % roztok) v současné době využívá jako elektrolyt. Teplota, při které palivové články pracují, se pohybuje kolem 200 °C. Náležitě je tlak o velikosti 0,8 MPa přesáhnout v demonstrační jednotce o výkonu 11 MW. Aby bylo možné získat potřebné elektrické napětí, je nutné zapojením do série ze singulárních článků vytvořit jeden velký komplex s palivovými články. Bipolární desky se vkládají mezi palivové články v komplexu. Bipolární desky s kanálky přivádějící okysličovadlo a palivo do palivových článků se vyráběly z grafitu. Jsou považovány za postarší modely bipolárních desek.

Při přehřívání palivových článků je zapotřebí zaručit účinné odvádění tepla. V komplexu palivových článků se ukrývají chladicí kanálky. Chladicí kanálky jsou v komplexu palivových článků rozmístěny tak, že vždy pátý palivový článek obsahuje i chladicí kanálky. Chladicí látka proudící v chladicích kanálcích z důvodu ochlazení souboru palivových článků je většinou voda zastupující kapalně skupenství, anebo vzduch jako představitel skupenství plynného. Nevýhodou kapalně složky při ochlazování je, že celkové uspořádání chladicí soustavy je velice komplikované. Na druhou stranu má velký vliv na odvod tepla. Za nejpoužívanější metodu chlazení, kvůli svému snadnému uspořádání soustavy a bezpečnosti funkce palivového článku, se považuje ochlazování plynnou složkou. Také z finanční stránky se tato metoda zdá být celkem výhodná. Funkce palivového článku s elektrolytem v podobě kyseliny fosforečné je znázorněno na Obrázku 42. [2], [29]



Obrázek 42 Palivový článek s kyselinou fosforečnou – Funkce [45]

Výhody:

- Teploty, při kterých PAFC pracují, dosahují středně vysokých hodnot. (Možnost získávat jak elektrickou energii, tak i energii tepelnou.)
- Elektrolyt je trvale konstantní, co se týče struktury. (U teplot dosahujících až 200 °C má jen nepatrně nestálou strukturu.)
- Palivo může obsahovat oxid uhličitý (možno až 30 %), není potřeba vzduch nebo palivo upravovat a odstraňovat z nich CO₂.

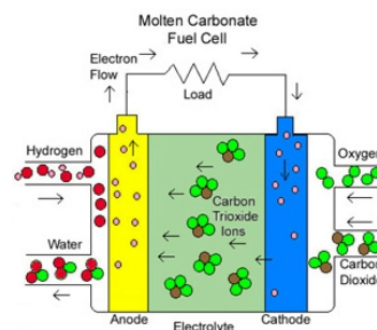
Nevýhody:

- Elektrolyt, jenž je tekutý, se musí doplňovat a možnosti s pohybáním palivového článku jsou též omezené.
- Materiály, z nichž jsou palivové články zhotoveny, by mohly kvůli kapalnému elektrolytu korodovat.
- Palivo by nemělo obsahovat větší množství síry, tyto palivové články jsou na síru choulostivé. (Nejvyšší povolená hodnota síra v palivu 50 ppm, $S \leq 50$ ppm.)
- Palivo nesmí obsahovat téměř žádný oxid uhelnatý. (Povolenou hodnotou v palivu jsou 2 %.)
- PAFC budou spolehlivě fungovat jen tehdy, zahřejí-li se na pracovní teplotu.
- Do elektrolytu vniká vzniklá voda z palivového článku. (Elektrolyt se vodou ředí.)
- Mají velkou hmotnost a jsou rozměrné.
- PAFC nedokáží samostatně upravovat uhlovodíková paliva. [30]

5.4 Palivové články s taveninou alkalických uhličitánů

Označení (zkratka):	MCFC
Teplota při chodu:	600 až 700 °C
Efektivnost elektrické energie:	45 až 60 %
Výkon:	může dosáhnout až několik MW
Palivo:	vodík, oxid uhelnatý a zemní plyn (zemní plyn se upravuje vnitřní reformací)
Oxidant:	kyslík ze vzduchu
Elektrochemické reakce na anodě:	$H_2 + CO_3^{2-} = H_2O + CO_2 + 2e^-$ (5.13)
	$CO + CO_3^{2-} = 2CO_2 + 2e^-$ (5.14)
Elektrochemická reakce na katodě:	$1/2O_2 + CO_2 + 2e^- = CO_3^{2-}$ (5.15)

V tomto druhu palivových článků, viz Obrázek 43, je elektrolytem uhličitánová tavenina. Aby uhličitánový elektrolyt dosáhl uspokojivé vodivosti, tak pracovní teplota palivového článku musí vzrůst na hodnotu kolem 650 °C. Při této teplotě je palivový článek v pracovním režimu. MCFC pro svůj provoz nepotřebují mít katalyzátor z drahých kovů. Důvodem je, že chemická reakce při pracovní teplotě ušlechtilé kovy nevyžaduje. Využívají se ve vojenském průmyslu. Palivem pro tento typ palivových článků je užíván zemní plyn a také plyn uhelný.



Obrázek 43 Palivový článek s taveninou alkalických uhličitánů – Funkce [46]

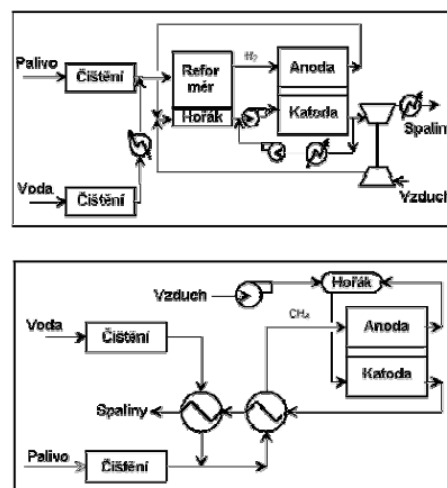
V matici hlinitanu lithného ($LiAlO_2$) se elektrolyt upevňuje. Tento elektrolyt je složen ze dvou prvků. Jedním z nich je uhličitán draselný (K_2CO_3), který je v elektrolytu obsažen 38 mol %. Druhým prvkem je uhličitán lithný (Li_2CO_3), jenž je 62 mol % obsáhlý v elektrolytu. Sloučením těchto dvou prvků nám vznikne elektrolyt do MCFC nazývaný se tavenina.

Podle toho, jak je nános elektrolytu (taveniny) silný, vznikají ztráty zapříčiněné ohmickým odporem. Aby vzrostla efektivnost, je nutné usilovat o ztenčení elektrolytické vrstvy. Nejen tímto, ale i spousty dalšími aspekty z hlediska struktury elektrolytu je ovlivněna účinnost. Pokud bychom chtěli zmenšit ztráty spojené s ohmickým odporem a navýšit iontovou vodivost, tak musíme zvýšit množství lithia. Bohužel po zvýšení množství lithia vznikne i několik nevýhod v podobě zvýšení agresivity koroze, plyn se bude nedostatečně rozpouštět a také bude snížena forma difuze. Jednotlivé elektrody jsou vytvářeny z rozdílných materiálů. Většinou je materiálem, ze kterého se vyrábí anoda, slitina niklu s chromem anebo slitina niklu s hliníkem. Oxid nikelnatý, do kterého je přidáno lithium, je materiál tvořící katodu. Katoda je

tvořena oxidy (NiO), které vznikly z materiálu anody (slitiny niklu). Největší potíže jsou v tom, že elektroda tvořena oxidem nikelnatým (katoda) má tendenci se rozkládat a pórovitá anoda tvořena slitinou niklu má sklon ke spékání.

Pozitivní na tomto typu palivových článků je fakt, že se usnadní uspořádání palivové soustavy, protože využívané palivo se reformuje vnitřní metodou. Právě teplo odváděné od jednotlivých palivových článků je použito pro úpravu uhlovodíkového paliva způsobem vnitřní endotermické reformní reakce. Tímto procesem se efektivnost, co se týče elektrické energie palivového článku, navýší. [2], [29]

Schéma vnější a vnitřní reformace paliva pro systém palivových článků s taveninou alkalických uhlíčanů je zobrazen na Obrázku 44. [33]



Obrázek 44 Schéma vnější reformace (nahore) a vnitřní reformace (dole) paliva [33]

Výhody:

- Zrychlený průběh elektrochemické reakce v MCFC.
- Kvůli svým vysokým provozním teplotám vytvoří velké množství tepelné energie.
- Dovedou samostatně upravovat lehká uhlovodíková paliva metodou vnitřního reformingu.
- Pro katalyzátory palivových článků s taveninou alkalických uhlíčanů není nutné použití drahých kovů.
- Elektrochemická reakce nabývá vysoké efektivity.

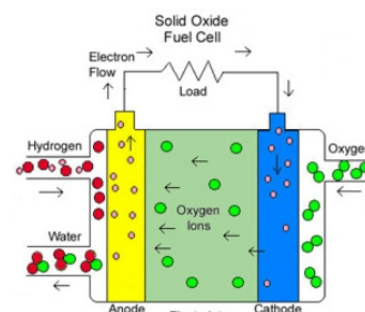
Nevýhody:

- Není možné zachovat konstantní velikost činné plochy elektrod. (Nestabilita rozměrů může vést k poškození elektrod.)
- Vysoké nároky na volbu vhodného materiálu, ze kterého bude MCFC sestaven. (Materiál vzdorující vysokým teplotám a mechanickému namáhání, rovněž by neměl být koroze schopný.)
- Jsou náchylné ke korozi. (Koroze způsobuje snížení životnosti a výkonu.)
- Mají pomalý start. (Potřebují hodně času pro dosažení teplot, při kterých mohou pracovat.)
- Palivo nesmí obsahovat téměř žádné množství síry. (Obzvláště na zvýšený obsah síry trpí anoda - maximální povolené množství síry je 5 ppm, důsledkem je snížení výkonu.)
- Omezené pohybování s palivovým článkem kvůli tomu, že elektrolyt je skupenství kapalného. [30]

5.5 Palivové články s pevným elektrolytem

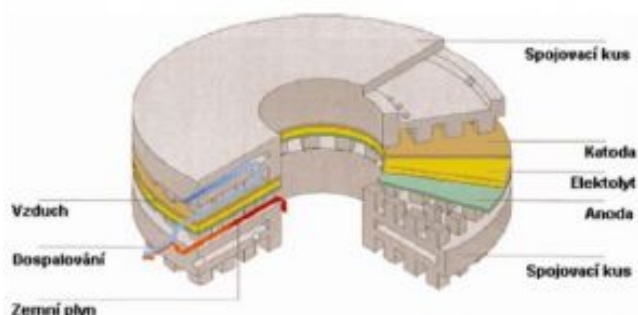
Označení (zkratka):	SOFC
Teplota při chodu:	650 až 1000 °C
Efektivnost elektrické energie:	50 až 65 %
Výkon:	může dosáhnout až několik MW
Palivo:	vodík, oxid uhelnatý a zemní plyn (zemní plyn se upravuje vnitřní reformací)
Oxidant:	kyslík ze vzduchu
Elektrochemické reakce na anodě:	$H_2 + CO_3^{2-} = H_2O + 2e^-$ (5.16)
	$CO + O^{2-} = CO_2 + 2e^-$ (5.17)
	$CH_4 + 4O^{2-} = 2H_2O + CO_2 + 8e^-$ (5.18)
Elektrochemická reakce na katodě:	$1/2O_2 + 2e^- = O^{2-}$ (5.19)

Typická pracovní teplota pro tento druh palivového článku většinou překračuje mez o hodnotě 800 °C. Jak už je patrné z názvu, elektrolyt tohoto typu palivového článku je skupenství pevného. Díky tomu ubývají starosti s doplňováním elektrolytu a na materiálu, který palivový článek obsahuje, nevzniká koroze. SOFC, viz Obrázek 45, produkuje elektrickou energii, ale disponuje i možností vytvářet energii tepelnou a to tím, že pracuje při vysokých teplotách.

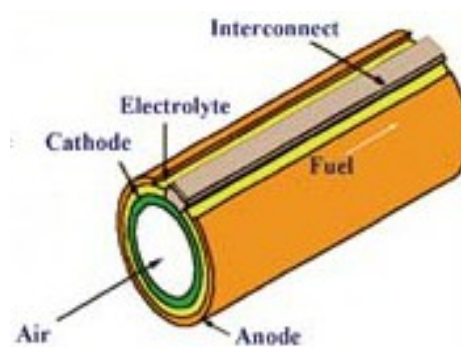


Obrázek 45 Palivový článek s pevným elektrolytem – Funkce [46]

Tento typ palivových článků je zkonstruován z dílů, jejichž struktura materiálů je nepohyblivá. Díky této pevné struktuře jednotlivých součástí je lhostejné, v jakém geometrickém tvaru se budou zhotovovat, neboť tvary palivových článků nejsou limitovány žádnými zásadami. Jsou vytvářeny dva rozdílné geometrické tvary. Jeden z nich má deskovité tvary, viz Obrázek 46, a druhý je sestaven ve formě tubulární, viz Obrázek 47.



Obrázek 46 Palivový článek SOFC - Deskovitá struktura [47]



Obrázek 47 Palivový článek SOFC - Tubulární struktura [10]

SOFC s deskovitým tvarem vznikl jako první ze dvou, tvarově odlišných palivových článků. Spousta firem ze Spojených států amerických, jako např. Technology Management Inc., ZTEK Inc. nebo AlliedSignal SOFCo se na vývoji palivových článků s deskovitým tvarem zaměřily. Poté se z Japonska, Evropy a Austrálie přidaly i další podniky (minimálně sedm). Počátkem padesátých let ve společnosti nazývané Siemens Westinghouse začal vznikat palivový článek tubulární. Tato firma dokázala navýšit jmenovitý výkon až na 110 kW správným sestavením kompozice palivového článku.

Upravit palivo pomocí vnitřní reformovací metodou je uskutečnitelné kvůli vysokým pracovním teplotám, které se pohybují od 800 °C až do 1050 °C. Díky vysokým teplotám při provozu dosahují SOFC vysoké efektivity i navzdory termodynamickým ztrátám. V porovnání s ostatními druhy dokáže tento typ palivových článků vlivem vysokých provozních teplot u elektrochemické reakce zrychlit a zintenzivnit její průběh.

SOFC dosahuje důsledkem výstupních toků vzniklých při elektrochemické reakci v palivovém článku natolik vysokých teplot, že je schopen vytvořit expanzi v plynové turbíně aplikováním získané tepelné energie. Tímto procesem je možné celkovou efektivnost pozvednout ještě výše. Ovšem objevují se i velké problémy s tím, který materiál by byl vhodný na konstrukci palivového článku s pevným elektrolytem, protože je potřeba použít materiálů, jež odolávají vysokým teplotám. Příčina volby vhodného materiálu je způsobena vysokými nároky.

Celkově by měly materiály, ze kterých jsou SOFC zkonstruovány, zadržovat tepelnou energii a hlavně musí odolávat vysokým teplotám, při kterých pracují. Dále by měly mít dostatečné vodivé vlastnosti. Poté by ty, co jsou použity v prostorech reduktivních a také v okysličujících prostorech, měly být chemicky neměnné. Také pro propojení jednotlivých součástí palivového článku se musí využívat chemicky stálý materiál. Provozní teplotu dosahující 650 °C nyníjší materiály, jež vznikly na základě kladených nároků, již zvládají.

Oxid zirkoničitý, ze kterého je tvořena rovnovážná mřížka společně se slitinou niklu a oxidu yttritého, obvykle vytváří elektrodu, jež je označována za anodu. Oxid zirkoničitý, který dosahuje rovnováhy po přidání 8 mol % oxidu yttritého, je vhodným elektrolytem do tohoto druhu palivových článků. A to z toho důvodu, že má vynikající vodivost aniontů. Materiál, ze kterého jsou součástky vytvořeny, by měl mít vlastnost vodit jen elektrickou energii.

Kvůli teplotnímu pnutí musí mít veškeré materiály, ze kterých je SOFC sestaven, totožný nebo alespoň podobný součinitel tepelné roztažnosti. Mezi součásti použité v těchto palivových článcích patří především katoda, anoda a elektrolyt. U těchto součástí by se neměl lišit součinitel tepelné roztažnosti ve větším měřítku. Díky tomu bude tento typ palivových článků fungovat takřka bez problémů. [2], [29]

Výhody:

- Jelikož pracují při vysokých teplotách, produkují i mnoho zbytkové tepelné energie.
- Používaná paliva mohou být jak vlhká, tak i suchá a na kvalitě funkce palivových článků to nic nemění.
- Elektrochemická reakce probíhá velice rychle.
- Uhlovodíková paliva se mohou samostatně upravovat metodou vnitřního reformingu. (Ionty vodíku pronikají elektrolytem hůře než ionty kyslíku.)
- V tomto případě není zapotřebí drahých kovů aplikovaných jako katalyzátor.
- Tyto palivové články oproti palivovým článkům s taveninou alkalických uhličitánů mají větší proudovou hustotu, při které dokáží pracovat.
- Vytváří značnou efektivitu.
- Elektrolyt, jenž palivové články SOFC vlastní, je pevného skupenství. (Bezstarostně se může s palivovými články pohybovat.)
- Volba více možných geometrických tvarů, ve kterých se mohou palivové články sestrojovat.

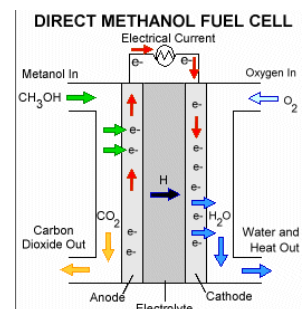
Nevýhody:

- Tyto palivové články jsou náchylné na palivo obsahující síru. (Maximální hodnota síry v palivu by neměla přesáhnout hranici 500 ppm, jelikož redukuje výkon.)
- Využívané materiály musí mít stejný nebo lehce odlišný součinitel tepelné roztažnosti.
- Je zapotřebí zvolit náležitý materiál s dobrou tepelnou i elektrickou vodivostí.
- Palivové články s pevným elektrolytem se stále ještě vyvíjejí. [30]

5.6 Palivový článek pro přímou reakci metanolu

<i>Označení (zkratka):</i>	DMFC
<i>Teplota při chodu:</i>	20 až 130 °C
<i>Efektivnost elektrické energie:</i>	kolem 40 %
<i>Výkon:</i>	může dosáhnout 10 kW
<i>Palivo:</i>	především metanol
<i>Oxidant:</i>	kyslík
<i>Elektrochemická reakce na anodě:</i>	$\text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O} = \text{CO}_2 + 6\text{H}^+ + 6\text{e}^-$ (5.20)
<i>Elektrochemická reakce na katodě:</i>	$3/2\text{O}_2 + 6\text{H}^+ + 6\text{e}^- = 3\text{H}_2\text{O}$ (5.21)
<i>Výsledná elektrochemická reakce:</i>	$\text{CH}_3\text{OH} + 3/2\text{O}_2 = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ (5.22)

Jak už je z názvu tohoto typu palivového článku patrné, vodík je zde jakožto palivo nahrazen metanolem. Metanol před aplikováním není nutné nijak upravovat (reformovat). Je možné použít jakékoliv dnešní klasické palivo, ale nejvíce používaným palivem je právě metanol. Palivem pro DMFC, viz Obrázek 48, je metanol proto, že se celkem dobře přemísťuje a jednoduše se skladuje. Také jeho vlastnost ohledně čerpání se pohybuje na vhodné úrovni. Dále se využívá jako palivo pro tento druh palivových článků také kvůli tomu, že například čistý vodík má při stejném objemu nižší energetické množství. Musí proběhnout některé mezireakce, aby se uskutečnila oxysličovací reakce u metanolu. Proto u vodíku probíhá oxysličovací reakce rychleji než u metanolu. Dochází k vytváření skupin CO, COH a COOH, což je důsledkem probíhajících mezireakcí. Tyto vznikající skupiny se nadále hromadí na katalyzátoru, čímž je platina nebo čern s částičky platiny. Nahromadění a zadržení předešlých vzniklých skupin na katalyzátoru je mnohem rychlejší než doba, kdy se dokáže navázat vodík. To znamená, že dále zabraňují vodíku se na katalyzátor vázat. Ruthenium je látka, která je obsažena v celkovém nánosu elektrody s názvem anoda, což by mělo odstranit výše zmíněný problém s absorpcí na katalyzátoru. Oxid uhličitý vzniká díky rutheniu, pomocí kterého proběhne opětovná oxidace skupin CO. Z katalytického nánosu právě oxid uhličitý prchá. Jelikož jsou zde dva katalyzátory, musí se sloučit v nějakém poměru. Jako poměr platiny a ruthenia byl zvolen za nejpříznivější 1 : 1 (Pt : Rh). U palivových článků PMFC se jako katalytický nános anody využívá samotná platina v podobě částic v černi, což je jedním z nejdůležitějších rozdílů od palivových článků pro přímou reakci s metanolem, které mají na anodě katalytickou vrstvu tvořenou černí s částičkami platiny a ruthenia. DMFC a PMFC mají aplikovaný katalyzátor tvořený ze stejného materiálu, čímž je platina. Katalyzátor funguje tak, že na katodě redukuje kyslík. [2], [29]



Obrázek 48 Palivový článek pro přímou reakci metanolu – Funkce [36]

Výhody:

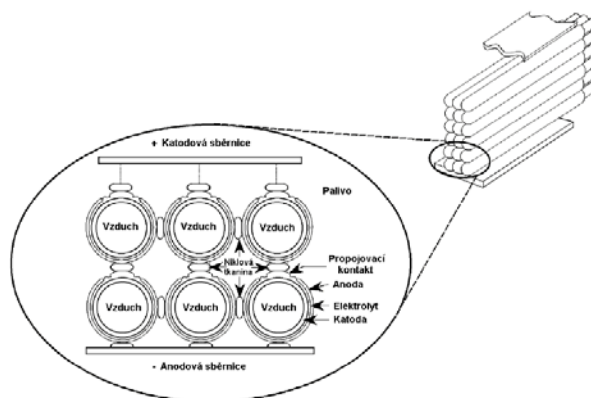
- Palivo, čímž je metanol, není potřeba před aplikováním reformovat.
- Palivo se dobře uskládá, převáží a čerpá do nádrže.
- Palivo je kapalné, tudíž není zapotřebí takového tlaku při provozu.
- Jde o nízkoteplotní druh palivových článků pracujících při relativně nízkých teplotách.
- Palivo má vyšší energetické množství.

Nevýhody:

- Palivo je toxické.
- Oxysličovací reakce u metanolu probíhá pomaleji než u vodíku. (Důvodem jsou mezireakce u metanolu.)
- Palivové články typu PMFC jsou poněkud nákladnější z důvodu využívání ušlechtilého kovu jakožto platinového katalyzátoru.
- Do katalytické vrstvy, která pokrývá anodu, se kromě platiny musí přidávat také ještě další drahý kov, jímž je ruthenium. (Z důvodu vyšších nákladů.) [30]

6 Sloučení jednotlivých palivových článků do svazku

Zařízení pohánějící automobil potřebují pro svůj provoz napětí o velikosti i několika set voltů, které musí palivové články vyprodukovat. Svazek neboli nějaký komplex více jednotlivých palivových článků je vytvořen zapojením do série. Počet zapojených palivových článků odpovídá požadovanému napětí nebo výkonu. Také se podle napětí, které pohánějící ústrojí potřebuje, zapojují buď sériově, nebo paralelně. Na Obrázku 49 je znázorněn svazek z palivových článků s pevným elektrolytem (SOFC) s tubulární strukturou.



Obrázek 49 Jednotlivé palivové články SOFC tubulární sloučeny do svazku [33]

Svazek se postupně vytváří bipolárním skládáním jednotlivých palivových článků. Samostatné palivové články jsou prokládány bipolárními deskami, jež je vzájemně propojují. Právě díky bipolárním deskám se plyn dopravuje v jednotlivých palivových článcích k elektrodám pomocí vytvořených kanálků, jež jsou umístěny na elektrodě v zadní části. Také jsou umístěny mezi palivovými články za účelem utěsnit jednotlivé články mezi sebou proti unikání plynu. Rovněž zajišťují proudění elektronů z anody ke katodě přes činný povrch mezi jednotlivými palivovými články, především mezi těmi, co jsou vedle sebe.

Jeden komplex palivových článků má stanovenou hustotu výkonu v kW/kg anebo v kW/l dle velikosti bipolárních desek a také jejich hmotnosti. Hustota výkonu vyjadřuje, jaký výkon vyvine soubor palivových článků na určitou hmotnost. V současné době se obvykle bipolární desky zhotovují ze směsi, která se skládá z polymerového tmelu a grafitu. Jejich účelem je vytvořit desky o nízké hmotnosti a malé tloušťce kvůli vyšší výkonové hustotě.

Existuje například svazek palivových článků, jenž je složen ze 440 jednotlivých palivových článků mající tloušťku tenkou přibližně dva milimetry, jehož názvem je Ballard Mark 900. U maximální zátěže bude tento svazek kvůli takovému množství palivových článků schopen vytvářet napětí o 250 V. Bohužel veškerý vyprodukovaný proud nelze využít do elektromotoru a přeměnit na výkon, ale musí se rozdělit na dvě části. Potřebnými komponenty k provozu jsou i kompresor anebo také chladicí čerpadlo, což jsou vedlejší zařízení. Tato zařízení budou poháněna jednou částí vyrobeného proudu. Druhá část proudu už bude pohánět samotný elektromotor. Třeba takový výkon 75 kW je vytvořen svazkem palivových článků, který má délku 80 centimetrů, široký je 40 centimetrů a na výšku měří 25 centimetrů. Hodnoty hustoty výkonu v dnešní době nabývají zhruba jednoho kilowattu připadajícího na jednotku hmotnosti (1 kW/kg). Membrána s platinovým obložením elektrod, stanovující elektrochemické reakce v palivovém článku, je sestavena právě z takového materiálu, na nějž je odkázána výše hodnota výkonové hustoty. Dále také záleží na podmínkách při provozu působících na efektivnost celého zařízení, jimiž třeba jsou tlak a také teplota. [4]

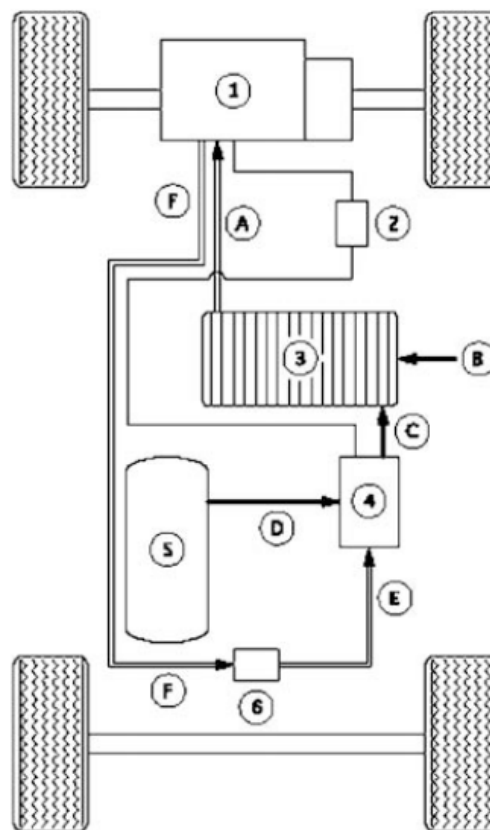
7 Porovnání palivových článků s akumulátory

Elektro-vozidla mají možnost získávat elektrickou energii dvěma způsoby. Buď energii nashromážděnou v akumulátoru, anebo palivovými články, které elektrickou energii produkují. Pokud se jedná o akumulátory, v dnešní době stále ještě není plně vyvinuto jejich dobíjení, protože doba dobíjení, oproti tankování do nádrží u spalovacích motorů, je mnohem delší. Dále dobíjecí stanice nejsou tolik rozšířené a tak známé jako třeba čerpací stánice na ropná paliva. Je nutné sledovat stav energie v akumulátoru, aby nedošlo k úplnému vybití, protože vozidlo nemá tak vysoký dojezd jako automobily se spalovacími motory. Je zapotřebí, aby se elektromobily přiblížily účinností k automobilům se spalovacím motorem. Toho docílíme tím, že k elektromotoru přidáme buď motor vznětový, anebo motor zážehový. Baterie jsou dobíjeny generátorem, pokud automobil není v provozu. Pokud je elektromotor v provozu, automobil neprodukuje žádné škodlivé plyny vůči životnímu prostředí. Automobily mající elektromotor a zároveň spalovací motor jsou nazývány hybridy. Rozdíl mezi palivovým článkem a hybridem je v tom, že palivový článek produkuje elektrickou energii, kterou mohou být baterie dobíjeny. V zařízení produkujícím požadovanou elektrickou energii jsou jednotlivé palivové články stupňovitě zapojené. Soustava palivových článků dokáže jak pro akumulátor, tak i pro elektromotor produkovat elektrickou energii, pokud generátor vytvoří dostatečné množství elektrické energie. Palivové články mohou působit i v hybridním pohonném ústrojí označujícím se zkratkou FC – REEV. Vyšší pravděpodobností je, že svazek palivových článků bude primárním prvkem, který bude přímo vytvářet elektrickou energii pro elektromotor. Baterie jsou v tomto případě již zbytečnou součástí automobilu. Tato vozidla poháněná elektromotory, jež získávají elektrickou energii z palivových článků, jsou nazývána zkratkou FC – EV. [3]

8 Soustava vozidla na palivové články s polymerní iontoměničovou membránou

Tento typ vozidla s elektromotorem je poháněný elektrickou energií vyprodukovanou palivovými články s iontoměničovou membránou. Tento typ palivových článků se využívá zatím u většiny vozidel. Je složen z mnoha součástí. Palivem pro toto vozidlo je sice vodík, ale je získáván vnější reformací z metanolu. Tudíž v popisu schématu, viz Obrázek 50, je, že *metanol* - *D* je dodáván z *palivové nádrže* - *5* do *pomocného soustrojí* - *4*, ve kterém se z metanolu vnější reformací vytvoří *vodík* - *C*. Ten dále putuje do svazku jednotlivých *palivových článků* - *3*, kde za přívodu *okysličovadla* - *B* ve formě vzduchu z okolí vznikají elektrochemické reakce vyrábějící elektrickou energii. Vytvořený *elektrický proud* - *A* je přiváděn do *elektromotoru* - *1*, jenž je jím poháněn. Poté elektromotor ve stavu generátoru vyrábí *elektrický proud* - *F*, jímž nabíjí *akumulátor* - *6*. Ten posílá nashromážděnou elektrickou energii v podobě *elektrického proudu* - *E* do *soustrojí pomáhajícího vytvářet vodík* - *4*. *Řídicí jednotka* - *2* je připojena

na elektromotor a na pomocné soustrojí vyrábějící vodík. Řídí ústrojí pomáhající produkovat vodík, aby bylo přiváděno dostatečné množství vodíku do palivových článků, jenž by vytvářely a vzápětí dodávaly požadované množství elektrické energie pro elektromotor. [5]



Obrázek 50 Schéma vozidla na palivové články PEMFC [5]

9 Výhody a nevýhody palivových článků

V této kapitole jsou podrobně sepsány výhody a nevýhody palivových článků ve srovnání s jinými pohonnými jednotkami.

Výhody:

- Závady palivových článků nejsou tak časté. (Mají dlouhé intervaly vzniku poškození.)
- Při vytváření elektrické energie vzniká jako vedlejší produkt voda, tudíž do ovzduší nepronikají žádné škodlivé látky. (Téměř neprodukují žádné emise.)
- Jestliže jsou palivové články v provozu, nevytváří téměř žádný hluk. (Za provozu se v nich nepohybují žádné součásti.)
- Mohou se používat různé druhy plyných paliv pro získání vodíku, pokud proběhne řádná úprava paliva.
- Mají vyšší účinnost než konvenční automobily. (Chemická energie se lépe transformuje na energii elektrickou.)
- Dokáží pracovat i při velkém zatížení.
- Není potřeba se o palivové články tolik starat.

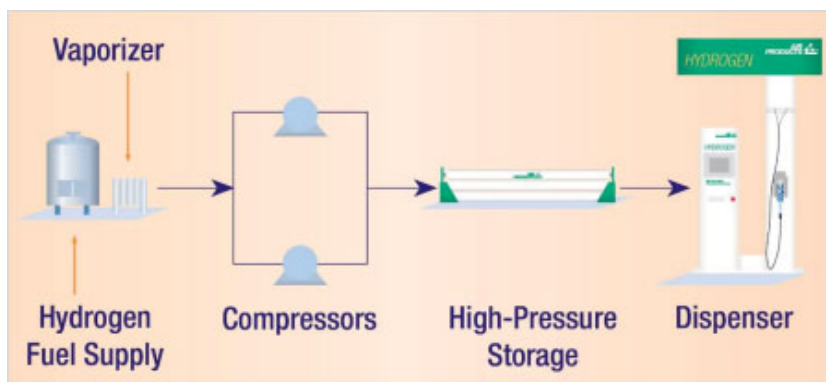
Nevýhody:

- Čím delší dobu palivové články pracují, tím se jim snižuje efektivita provozu.
- Náklady na pořízení palivového článku jsou velice vysoké.
- Při užívání paliva nebo oxidantu jsou palivové články náchylné na některé složky, které jsou součástí paliva nebo okysličovadla. (S, CO, CO₂, atd.)
- Mají celkem krátkou dobu životnosti.
- Mohou mít o pár minut lehce zpomalený začátek pracovního procesu.
- Celkem nákladná produkce paliva.
- Musí být více jednotlivých palivových článků spojených do jednoho svazku, aby vytvořily požadované množství elektrické energie. (Případně požadovaný výkon.) [31], [33]

10 Čerpací stanice na vodík

Čerpací stanice na vodík nejsou po světě ještě tolik rozšířené jako čerpací stanice na palivo využívající se pro spalovací motory. Převážně se vodík vyrábí přímo v místě čerpací stanice, pokud je přivedena voda. Také je možnost vodík dopravovat. Tyto čerpací stanice na vodík jsou celkem nákladnou záležitostí. Cena čerpací stanice se pohybuje zhruba kolem 500 000 až 5 000 000 dolarů za výstavbu. O ceně rozhoduje spousta faktorů. Třeba podle toho, jaká se volí opatření vzhledem k bezpečnosti, dále dle toho, kolik má stanice tlakových čerpadel anebo také jestli stanice budou využívat jen osobní automobily, nebo také automobily užitkové. [35]

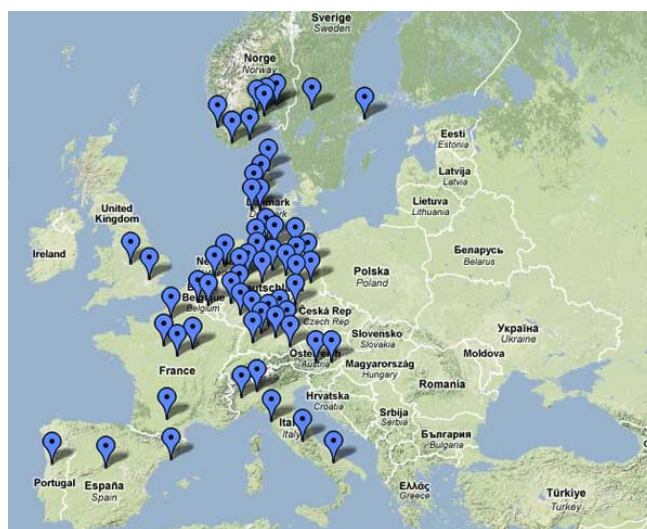
Samostatné čerpací stanice, viz Obrázek 51, dodávané firmou Air Products dokáží plnit vozidla plynným vodíkem pod tlakem 25 MPa anebo pod tlakem 35 MPa. Ve stanici je vodík přibližně pod tlakem 48,2 MPa uskládán v plynné



nádobě. Jelikož většina vozidel vyráběna v současnosti má v nádržích plynný vodík stlačený pod tlakem 70 MPa, je potřeba pro naplnění dnešních vozidel vyvinout až dvojnásobný tlak. Tomu napomáhá přidavný kompresor, který je schopen vytvořit potřebný plnicí tlak. [11]

10.1 Evropa

Síť čerpacích stanic na vodík v Evropě je už celkem rozsáhlá. Celkem jich je nebo bude po celé Evropě vystavěno 143, viz Tabulka 4. Nejvíce čerpacích stanic je postaveno v Německu. Východní země Evropské unie jsou oproti západním zemím lehce pozadu s výstavbami čerpacích stanic na vodík, jak můžeme vidět na Obrázku 52. Řidiči budou moci podle norem vyhledávat stlačený plynný vodík buď pod tlakem 34,47 MPa, anebo 68,94 MPa a také vodík v tekutém stavu. To podle toho, jak bude vozidlo přizpůsobeno k tankování. [14]



Obrázek 52 Mapa Evropy - Síť vystavěných čerpacích stanic na vodík [14]

Název státu	Počet čerpacích stanic na H ₂	Název státu	Počet čerpacích stanic na H ₂
Belgie	1	Turecko	3
Kodaň	1	Španělsko	4
Česká republika	1	Nizozemsko	4
Grónsko	1	Francie	5
Lucembursko	1	Švédsko	5
Portugalsko	1	Norsko	10
Švýcarsko	2	Dánsko	14
Rakousko	2	Velká Británie	20
Finsko	2	Itálie	21
Řecko	2	Německo	41
Island	2	CELKEM	143

Tabulka 4 Otevřené a plánované čerpací stanice na vodík od roku 2012 [14]; vlastní zpracování

10.2 Česká republika

První a také jediná čerpací stanice na vodík stojí v Neratovicích, viz Obrázek 53. Byla zhotovena firmou Linde Gas a.s. pro napájení autobusu na palivové články s označením TriHyBus. Tato firma též zásobuje stanici vodíkem. Do budoucna by mohla sloužit i jako čerpací stanice pro osobní automobily. Do nádrží vozů se plní tlakem 35 MPa vodík v plynném skupenství. Nad zemí jsou umístěny nádrže uchovávající vodík. Kapacita nádrží činí



Obrázek 53 Čerpací stanice na vodík v ČR [34]

50 m³. Dále je součástí čerpací stanice kompresor, který je ukryt pod zemí ve vybetonované místnosti armované železem. Jsou tři části čerpací stanice, kterými lze plnit elektrovozidla vodíkem. Je to tankování s vysokým tlakem, se středním tlakem a s nízkým tlakem. Přibližná cena za výstavbu této čerpací stanice činí 83 000 000 Kč. Tento model stanic se již vyskytuje v Portu, Barceloně nebo i v Amsterdamu. Pokud by se vodík začal využívat více, mohly by se do budoucna častěji uplatňovat i jiné metody jeho produkce. Důvodem je jeho obnovování. Prozatím podnik Linde Gas a.s. užívá zemního plynu, ze kterého vytváří vodík. Předpokladem je, že za jeden rok se spotřebuje přibližně 6 tun vodíku. Doba tankování paliva nádrže, kam se vejde dvacet kilogramů vodíku, trvá zhruba pět minut. Cena za jeden kilogram vodíku se pohybuje kolem 130 Kč (v přepočtu je to téměř 5 eur). [34]

11 Závěr

Cílem této práce bylo vytvořit rešerši o problematice palivových článků, poukázat na jejich postupný historický vývoj a také zachytit, jak palivový článek funguje. Dalším cílem bylo popsat nesnadnou produkci paliva, jeho uskladnění a přepravu. V neposlední řadě také charakterizovat jednotlivé typy automobilů využívající palivové články a jejich parametry.

Vývoj palivových článků započal v roce 1838. Následující rok vznikl fungující palivový článek, který se dále začal rozvíjet až v roce 1932 vznikem mechanismu fungujícím na principu kyslíku a vodíku. Avšak zdokonalování těchto palivových článků bude stále probíhat i do budoucna. Elektrická energie se z palivových článků získává pomocí elektrochemické reakce probíhající mezi dvěma elektrodami propojenými elektrolytem. Dále aby energie mohla vzniknout, je zapotřebí přivést vodík a kyslík. Jelikož elektrolyt u některých typů palivových článků je celkem agresivní, proto se palivové články konstruují z materiálů odolávajících korozi a tepelným účinkům. Jako katalyzátor se užívají drahé kovy a společně s těmito konstrukčními materiály jsou z ekonomického hlediska velice nákladné na výrobu palivových článků. Výroba vodíku není tak zcela složitá. Vodík lze získávat z obnovitelných zdrojů, tudíž až se někdy v budoucnu vyčerpají zásoby ropy, je možné počítat s vodíkem jako s potenciálním palivem pro budoucí generace automobilů a nejen pro ně. Je spousta metod, jak lze získávat palivo do palivových článků. Jeho výroba, transport a uskladnění je zatím dosti nákladná, proto se automobilový průmysl užívající palivové články vyvíjí celkem pomalu. Automobily využívající palivové články mají srovnatelné parametry, co se týče dojezdu, výkonu, maximální rychlosti atd. s konvenčními automobily. Ekonomický provoz těchto vozidel vypadá asi takto. V prodeji jsou tyto automobily celkem drahé kvůli výrobě palivových článků a jejich využívaného paliva. Spousta dnešních automobilek s projektem elektrovozidla na palivové články již začalo anebo se jej chystají spustit. Z ekologického hlediska jsou automobily na palivové články velice výhodné, protože nevytváří téměř žádné emise. Navíc mají v poměru s vozidly využívajícími spalovací motor o více než polovinu vyšší účinnost. Naproti tomu tyto automobily, v nichž jsou zabudovány palivové články, mají kratší dobu provozu. Vodíkových čerpacích stanic je po celé Evropě vystavěných zhruba 143. Do budoucna by se měly vystavovat postupně i další. V České republice je zatím vybudována pouze jedna čerpací stanice, kterou využívá jeden autobus městské hromadné dopravy. Pokud se automobilky vyrábějící vozidla s palivovými články rozvinou do takové míry, aby se automobily začaly prodávat po celém světě, je dost pravděpodobné, že v České republice budou postaveny i další čerpací stanice poskytující vodík jako pohonnou hmotu.

Seznam použité literatury

- [1] HROMÁDKO, Jan, HROMÁDKO Jiří, MILER Petr a HÖNIG Vladimír. *Speciální spalovací motory*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2011. ISBN 9788021321687.
- [2] HROMÁDKO, Jan. *Speciální spalovací motory a alternativní pohony: komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol*. Praha: Grada, 2012. ISBN 9788024744551
- [3] International journal of hydrogen energy Volume 40: *Design of a range extension strategy for power decentralized fuel cell/battery electric vehicles*. Jenn-Jiang Hwang et al., 2015. ISSN 0360-3199.
- [4] KAMEŠ, Josef. *Spalovací motorová vozidla: část: Spalovací motory*. Praha: Česká zemědělská univerzita, 2002. ISBN 8021308958.
- [5] VLK, František. *Alternativní pohony motorových vozidel*. Brno: František Vlk, 2004. ISBN 8023916025.

Internetové zdroje

- [6] 2017 Honda Clarity Fuel Cell. *Road Show* [online]. Goodwin, 2016 [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: <https://www.cnet.com/roadshow/auto/2017-honda-clarity-fuel-cell/preview/>
- [7] Audi h-tron quattro concept: Q6 na vodík. *Auto* [online]. Fokt, 2016 [cit. 2017-02-10]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/audi-h-tron-quattro-concept-q6-vodik-video-92046>
- [8] Audi h-tron quattro. *Audi* [online]. [cit. 2017-02-10]. Dostupné z: http://www.audi.com/en/innovation/futuredrive/h-tron_quattro.html
- [9] Bladlus og grantræer. *Vidensbanken* [online]. Torkel, 2008 [cit. 2016-12-08]. Dostupné z: <http://vidensbanken.blogspot.cz/search/label/Milj%C3%B8>
- [10] CERAMIC ENERGY: Advances in SOFC Materials and Manufacturing. *Ceramic Industry* [online]. 2004 [cit. 2017-02-11]. Dostupné z: <http://www.ceramicindustry.com/articles/86115-ceramic-energy-advances-in-sofc-materials-and-manufacturing>
- [11] Čerpací stanice na vodík. *Air Products* [online]. c1996-2017 [cit. 2017-02-15]. Dostupné z: <http://www.airproducts.cz/industries/Energy/Power/Power-Generation/hydrogen-fueling-stations.aspx>
- [12] „Dibenzyltoluen, resp. technologie Hydrogenious, dokáže absorbovat vodík v množství 2 MW na kubík. To už dává smysl,“. *All for Power* [online]. Cieslar, 2016 [cit. 2016-12-20].

Dostupné z: <http://www.allforpower.cz/clanek/dibenzyltoluen-resp-technologie-hydrogenious-dokaze-absorbovat-vodik-v-mnozstvi-2-mw-na-kubik-to-uz-dava-smysl/>

[13] Dodávka vodíku. *Air Products* [online]. c1996-2017 [cit. 2016-12-20]. Dostupné z: <http://www.airproducts.cz/industries/Energy/Power/Power-Generation/hydrogen-supply.aspx>

[14] European Union Hydrogen Highway. *Hydrogen Cars Now* [online]. Kantola, 2017 [cit. 2017-02-11]. Dostupné z: <http://www.hydrogencarsnow.com/index.php/european-union-hydrogen-highway/>

[15] Honda Clarity: FCV v sériové podobě. *Auto* [online]. Dragoun, 2015 [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/honda-clarity-fcv-seriove-podobe-90006>

[16] Honda FCX Clarity - Budoucnost patří vodíku. *Auto* [online]. Vaverka, 2008 [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/honda-fcx-clarity-budoucnost-patri-vodiku-1846>

[17] Honda FCX Clarity - Na vlastní kůži. *Automobil Revue* [online]. Hyan, 2011 [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: http://www.automobilrevue.cz/rubriky/automobily/svezli-jsme-se/honda-fcx-clarity-na-vlastni-kuzi_40038.html

[18] Hyundai H350 fuel cell. *Netinform* [online]. 2016 [cit. 2017-02-10]. Dostupné z: <https://www.netinform.net/h2/H2Mobility/Detail.aspx?ID=549#>

[19] Hyundai H350 Fuell Cell Concept má dojezd přes 400 km. *Auto* [online]. Pavlůsek, 2016 [cit. 2017-02-10]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/hyundai-h350-fuell-cell-concept-m-dojezd-ples-400-km-98653>

[20] Hyundai Ioniq – Utváření budoucnosti. *Automobil Revue* [online]. 2016 [cit. 2017-02-20]. Dostupné z: http://www.automobilrevue.cz/rubriky/automobily/predstavujeme/hyundai-ioniq-utvareni-budoucnosti_45412.html

[21] Hyundai je prvou značkou která zahájí sériovou výrobu automobilu bez emisí poháňaného palivovým článkem. *Hyundai* [online]. 2012 [cit. 2017-02-09]. Dostupné z: <http://media.hyundai.sk/item/=eNortjIytFIqNU9Jq0uJck-xNTYyL04Izc40tzVTsgZcMIRaCKY>,

[22] ix35 FUEL CELL. *Hyundai* [online]. 2017 [cit. 2017-02-09]. Dostupné z: <http://worldwide.hyundai.com/WW/Showroom/Eco/ix35-Fuel-Cell/PIP/index.html>

[23] Jak se vyrábí palivo budoucnosti. Vodík pro auta i elektroniku. *Technet* [online]. Janík, 2008 [cit. 2017-02-19]. Dostupné z: http://technet.idnes.cz/jak-se-vyrabi-palivo-budoucnosti-vodik-pro-auta-i-elektroniku-p6d-/tec_tecnika.aspx?c=A080127_234744_tec_tecnika_vse

- [24] Kia Borrego FCEV. *Hydrogen Cars Now* [online]. Kantola, 2017 [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: <http://www.hydrogencarsnow.com/index.php/kia-borrego-fcev/>
- [25] Kia Borrego FCEV: Nová generace vodíkového pohonu z Koreje. *Auto* [online]. Vaverka, 2008 [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/kia-borrego-fcev-nova-generace-vodikoveho-pohonu-z-koreje-6204>
- [26] Obnovitelné zdroje. *Třípól* [online]. Porš, 2003 [cit. 2017-02-19]. Dostupné z: <http://www.3pol.cz/cz/rubriky/obnovitelne-zdroje/1084-co-je-to-palivovy-clanek>
- [27] Naše produktové portfolio. *Messer* [online]. 2015 [cit. 2016-12-20]. Dostupné z: http://www.messer.sk/Produkty__a_riesenia/Produktove_portfolio/
- [28] New Toyota Mirai 2016 review. *Auto Express* [online]. 2016 [cit. 2017-02-08]. Dostupné z: <http://www.autoexpress.co.uk/toyota/mirai/89487/new-toyota-mirai-2016-review>
- [29] Palivové články – Typy, rozdělení a parametry. *Enviros* [online]. 2004 [cit. 2017-01-30]. Dostupné z: <https://www.enviros.cz/2004/10/22/palivove-clanky-typy-rozdeleni-a-parametry/>
- [30] Palivové články a jejich vlastnosti. *Studie pohonu mobilního prostředku s palivovým článkem* [online]. Vysoká škola báňská — Technická univerzita Ostrava, 2005 [cit. 2017-01-28]. Dostupné z: <https://courseware.zcu.cz/CoursewarePortlets2/DownloadDokumentu?id=69437>
- [31] Palivové články. *Ústav fyziky a materiálového inženýrství* [online]. Univerzita Tomáše Bati [cit. 2017-02-19]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/env_fyzika/EF_15.pdf
- [32] PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell). *Mechanical Engineering* [online]. 2015 [cit. 2017-02-11]. Dostupné z: <https://mechanical-engg.com/blogs/entry/873-pemfc-proton-exchange-membrane-fuel-cell/>
- [33] PORŠ, Zdeněk. *Palivové články* [online]. Ústav Jaderného Výzkumu Řež, 2002 [cit. 2017-02-21]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/palivove-clanky.pdf>
- [34] První vodíková čerpací stanice otevřená v Neratovicích. *Auto* [online]. ČTK, 2009 [cit. 2017-02-12]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/prvni-vodikova-cerpaci-stanice-otevrena-v-neratovicich-3423>
- [35] Pump It Up: We Refuel a Hydrogen Fuel-Cell Vehicle. *Car and Driver* [online]. Siler, 2008 [cit. 2017-02-15]. Dostupné z: <http://www.caranddriver.com/features/pump-it-up-we-refuel-a-hydrogen-fuel-cell-vehicle-hydrogen-filling-stations-are-still-rare-page-3>

- [36] Risper - Construction - Electrical - Future - Fuel Cells. *Enterprise Robotics* [online]. c2003-2009 [cit. 2017-02-11]. Dostupné z: <http://www.enterprisrobotics.com/>
- [37] Řídili jsme vodíkovou Toyotu Mirai. Místo výfuku má odtok vody. *Auto.idnes* [online]. Vokáč, 2016 [cit. 2017-02-08]. Dostupné z: http://auto.idnes.cz/toyota-mirai-jizdni-dojmy-vodik-dn8-/auto_testy.aspx?c=A160422_125042_automoto_vok
- [38] Skladování vodíku. *H2SHOP* [online]. c2012-2017 [cit. 2017-02-19]. Dostupné z: <http://www.h2shop.cz/index.php?p=article&id=17>
- [39] Soviet Options (1989) for a Manned Mars Landing Mission. *Exo Cruiser* [online]. 2015 [cit. 2017-02-25]. Dostupné z: <https://dodlithr.blogspot.cz/2015/11/soviet-options-1989-for-manned-mars.html>
- [40] Strategická výzkumná agenda rozvoje vodíkového hospodářství v ČR. *Docplayer* [online]. Husinec - Řež: HYTEP –Hydrogen Technology Platform, 2010 [cit. 2016-12-03]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/1073648-Strategicka-vyzkumna-agenda-rozvoje-vodikoveho-hospodarstvi-v-cr.html>
- [41] Test vodíkového auta Honda FCX Clarity. *Hybrid* [online]. Soukup, 2011 [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/testy/auto-na-vodik-honda-fcx-clarity>
- [42] The Citaro FuelCELL Hybrid. *Mercedes-Benz* [online]. EvoBus GmbH, Mercedes-Benz Bus and Coach unit, 2009 [cit. 2017-02-10]. Dostupné z: http://www.mercedes-benz.escontentmedia_libraryhqhq_mpc_reference_sitebus_ngservices_accessoriesbrochures_FUEL_CELLfuel_cell_technical_data_2009_en_pdf.object-Single-MEDIA.tmpMBO09003_Citaro_FuellCELL-Hybrid_EN.pdf
- [43] Toyota Mirai: Vodíkové auto v prodeji. *Auto* [online]. Čermák, 2015 [cit. 2017-02-08]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/toyota-mirai-vodikove-auto-v-prodeji-85509>
- [44] Trendy ve vývoji vodíkového hospodářství ve světě a možnosti uplatnění v České republice. *Ministerstvo průmyslu a obchodu* [online]. Šváb, 2006 [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: <http://www.mpo-efekt.cz/dokument/01.pdf>
- [45] Types of Fuel Cells. *Office of energy efficiency and renewable energy* [online]. [cit. 2017-02-25]. Dostupné z: <https://energy.gov/eere/fuelcells/types-fuel-cells>
- [46] Types of Fuel Cells. *University of Strathclyde Glasgow* [online]. [cit. 2017-02-25]. Dostupné z: http://www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web_sites/02-03/hydrogen_economy/Types%20of%20Fuel%20Cells.htm
- [47] Úvod do mikrokogenerace, kogenerace. *Czech Nature Energy* [online]. Plzeň, 2017 [cit. 2017-02-11]. Dostupné z: <http://www.cne.cz/mikrokogenerace/uvod-do-mikrokogenerace/>

[48] Vodík 3.0 Tech. - 50/200. *E - plyn* [online]. Siad, 2017 [cit. 2017-02-19]. Dostupné z: <http://www.e-plyn.cz/?p=productsMore&iProduct=64&sName=Vodik-3.0-Tech.%E2%80%9350-200>

[49] Vodík: vlastnosti, výroba a využití. *VŠCHT* [online]. Praha, 2016 [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: <https://web.vscht.cz/~nadhernl/projektIV/vodik.html>

[50] Výroba vodíku parním reformováním. *Petroleum* [online]. Praha: Maxa, c2007-2017 [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: <http://www.petroleum.cz/zpracovani/zpracovani-ropy-43.aspx>

[51] Výroba vodíku. *Česká vodíková technologická platforma* [online]. Somolová, Dlouhý, 2007 [cit. 2017-02-19]. Dostupné z: <http://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/vyroba-vodiku/664-vyroba-vodiku>

Seznam zkratek

Zkratka	Název	Zkratka	Název
° C	Stupeň celsia	Li ₂ CO ₃	Uhličitan lithný
a. s.	Akciová spoločnosť	LiAlO ₂	Hlinitan lithný
AFC	Alkaline Fuel Cell	Li-ion	Lithium-iontový akumulátor
CO	Skupina ketonická	m ³	Metr krychlový
CO	Oxid uhelnatý	m ³ /1h	Metr krychlový za hodinu
CO ₂	Oxid uhličitý	MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell
COH	Skupina aldehydická	MPa	Megapascal
COOH	Skupina karboxylová	MW	Megawatt
DMFC	Direct Methanol Fuel Cell	N*m	Newton-meter
FC - EV	Fuel Cell - Electric Vehicle	NASA	National Aeronautics and Space Administration
FC - REEV	Fuel Cell - range extended electric vehicles	NiO	Oxid nikelnatý
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle	obj. %	Objemové procento
FCV	Fuel Cell Vehicle	PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell
FCX	Fuel Cell Experiment	PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell
H ₂ O	Voda	ppm	Parts per million
CH ₃ OH	Metanol	Pt	Platina
K ₂ CO ₃	Uhličitan draselný	PTFE	Polytetrafluoretylen
Kč	Koruna česká	Rh	Ruthenium
km	Kilometr	s	Sekunda
km/h	Kilometr za hodinu	S	Síra
KOH	Hydroxid draselný	S-I	Siřičito - jódový
kPa	Kilopascal	SOFC	Solid Oxide Fuel Cell
kW	Kilowatt	SUV	Sport utility vehicle
kW/kg	Kilowatt na určitou hmotnosť	USA	United States of America
kW/l	Kilowatt na určitý objem	V	Volt

Seznam obrázků

Obrázek 1 Sir William Robert Grove [33]	2
Obrázek 2 Palivový článek sira W. R. Grovea [33]	2
Obrázek 3 Přeměna energie – schéma [33]	3
Obrázek 4 Pracující palivový článek v řezu [26]	3
Obrázek 5 Proces palivového článku [33]	4
Obrázek 6 Pórovitá elektroda – schéma v řezu [33]	4
Obrázek 7 Metody produkce vodíku v celosvětovém rozsahu [51]	5
Obrázek 8 Parní reformování zemního plynu [23]	6
Obrázek 9 Proces parní přeměny zemního plynu (produkce vodíku) [49]	6
Obrázek 10 Parní reformace zemního plynu - Schéma (1 - pec, 2 - kotel na výrobu páry, 3 - vysokoteplotní konvertor CO, 4 - nízkoteplotní konvertor CO, 5 – absorbér CO ₂ , 6 – desorbér CO ₂ , 7 – metanizér) [50]	6
Obrázek 11 Elektrolýza vody – Schéma [23]	7
Obrázek 12 Plynem chlazený reaktor v souvislosti s elektrolýzou při vysokých teplotách [40]	8
Obrázek 13 Schéma separace vodíku a kyslíku od vody siřičito – jódovým cyklem [23]	9
Obrázek 14 Fotobioreaktor - Schéma (produkce) [9]	10
Obrázek 15 Schéma řezu fotobioreaktoru nazývaného se "flat - plate" [23]	10
Obrázek 16 Schéma dvoustupňového bio procesu - Stage 1: vodíková fermentace; Stage 2: fotofermentace [23]	11
Obrázek 17 Nádrž pro kapalný vodík (kryogenní nádrž) [39]	12
Obrázek 18 Schématický řez tlakovou nádobou pro skladování plynného vodíku [23]	13
Obrázek 19 Spojení několika tlakových nádob do jedné s několikanásobně vyšším objemem [38]	13
Obrázek 20 Možnosti přepravy vodíku [11]	13
Obrázek 21 Transport vodíku v tlakových nádobách [12]	13

Obrázek 22 Uložiště vodíku - s odpařováním nebo tlakové [27]	14
Obrázek 23 Potrubí transportující vodík (Plynovod) [27]	15
Obrázek 24 Potrubí přepravující vodík v Texasu ve Spojených Státech Amerických [44]	15
Obrázek 25 Kia Borrego FCEV [24]	16
Obrázek 26 Honda FCX Clarity [16]	17
Obrázek 27 Honda FCV Clarity [15]	17
Obrázek 28 Toyota Mirai [28]	18
Obrázek 29 Toyota Mirai - Rozložení jednotlivých komponentů ve vozidle [43]	18
Obrázek 30 Hyundai ix35 FCEV [22]	19
Obrázek 31 Hyundai ix35 FCEV - Rozložení jednotlivých komponentů ve vozidle [22]	19
Obrázek 32 Audi h-tron quattro - Rozložení jednotlivých komponentů ve vozidle [7]	20
Obrázek 33 Audi h-tron quattro [8]	20
Obrázek 34 Hyundai H350 Fuel Cell - Rozložení jednotlivých komponentů ve vozidle [19]	20
Obrázek 35 Hyundai H350 Fuel Cell [19]	20
Obrázek 36 Mercedes - Benz Citaro Fuel Cell - Hybrid - Rozložení jednotlivých komponentů v autobuse [42]	21
Obrázek 37 Mercedes - Benz Citaro Fuel Cell – Hybrid [42]	21
Obrázek 38 Úprava paliva pro jednotlivé typy palivových článků [38]	22
Obrázek 39 Palivový článek s polymerní iontoměničovou membránou – Struktura [32]	24
Obrázek 40 Soubor jednotlivých palivových článků – Rozložení [33]	25
Obrázek 41 Palivový článek s alkalickým elektrolytem – Funkce [46]	26
Obrázek 42 Palivový článek s kyselinou fosforečnou – Funkce [45]	29
Obrázek 43 Palivový článek s taveninou alkalických uhličitánů – Funkce [46]	30
Obrázek 44 Schéma vnější reformace (nahore) a vnitřní reformace (dole) paliva [33]	31
Obrázek 45 Palivový článek s pevným elektrolytem – Funkce [46]	32

Obrázek 46 Palivový článek SOFC - Deskovitá struktura [47].....	32
Obrázek 47 Palivový článek SOFC - Tubulární struktura [10].....	32
Obrázek 48 Palivový článek pro přímou reakci metanolu – Funkce [36].....	35
Obrázek 49 Jednotlivé palivové články SOFC tubulární sloučeny do svazku [33]	36
Obrázek 50 Schéma vozidla na palivové články PEMFC [5]	38
Obrázek 51 Schéma čerpací stanice na vodík [11].....	40
Obrázek 52 Mapa Evropy - Síť vystavěných čerpacích stanic na vodík [14]	40
Obrázek 53 Čerpací stanice na vodík v ČR [34]	41

Seznam tabulek

Tabulka 1 Parametry automobilu	20
Tabulka 2 Parametry automobilu	20
Tabulka 3 Parametry autobusu	21
Tabulka 4 Otevřené a plánované čerpací stanice na vodík od roku 2012 [14]; vlastní zpracování	41