



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

VODÍKOVÉ PALIVOVÉ ČLÁNKY

HYDROGEN FUEL CELLS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Dan Kejval

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.

BRNO 2022

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **Dan Kejval**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.**
Akademický rok: 2021/22

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

Vodíkové palivové články

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Přehled a zhodnocení vlastností a perspektivy vodíkových palivových článků pro mobilní prostředky.

Cíle bakalářské práce:

Popsat princip funkce vodíkových palivových článků.

Shromáždit dostupné informace o soudobých konstrukcích vodíkových palivových článků a zhodnotit jejich účinnost.

Analyzovat současné využití vodíku v ČR a u zahraničních výrobců automobilů.

Seznam doporučené literatury:

STONE, Richard. Introduction to internal combustion engines. 4th ed. Basingstoke: Palgrave Macmillan, c2012. ISBN 978-0-230-57663-6.

MACEK, Jan. Spalovací motory. 2. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2012. ISBN 978-80-01-05015-6.

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

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Nahrazení současných paliv a pohonů představuje v nynější době jeden ze zásadních úkolů nejen pro výrobce dopravních prostředků, ale také v energetice. Celý svět se snaží omezit produkci skleníkových plynů, zatěžujících životní prostředí, a co nejrychleji přejít na zdroje, které nebudou produkovat žádné škodlivé emise. Jedním z nich jsou vodíkové palivové články, na něž se tato bakalářská práce zaměřuje a také vysvětluje, jakým způsobem se vodík vyrábí a skladuje. Ukazuje, na jakém principu fungují, jaké existují soudobé konstrukce, a rovněž hodnotí jejich účinnost. Podle teploty a materiálu elektrolytu je lze rozdělit na různé typy, které umožňují široký rozsah výkonností a jejich použití. Díky tomu se toto zařízení začíná rozšiřovat jak v ČR, kde je snaha nejprve rozšířit hromadnou dopravu o autobusy na vodíkové palivové články, nebo také u zahraničních výrobců vozidel, kde automobilky jako Toyota a Hyundai už v současné době sériově vyrábí osobní i nákladní vozidla či autobusy s tímto zdrojem elektrické energie.

KLÍČOVÁ SLOVA

palivový článek, vodík, anoda, katoda, elektrolyt, reformování

ABSTRACT

The replacement of the current fuels and engines presents one of the most important tasks not only for vehicle manufacturers but also in the energy industry. Whole world is trying to limit the production of greenhouse gasses which pollute the environment and switch to sources that will not produce any harmful emissions as fast as possible. One of these are hydrogen fuel cells, which are the focus of the thesis and explains how hydrogen is produced and stored. It shows the principle on which they work, what designs currently exist and also evaluates their efficiency. According to temperature and material of the electrolyte they can be divided into various types which offer a wide range of performances and their use. Thanks to that, this device began to spread both in the Czech Republic, where the effort is to firstly expand public transportation to include busses using the hydrogen fuel cells and at foreign vehicle manufacturers where carmakers such Toyota and Hyundai already mass-produce passenger cars, trucks or buses with this source of electricity.

KEYWORDS

fuel cell, hydrogen, anode, cathode, electrolyte, reforming

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KEJVAL, Dan. *Vodíkové palivové články*. Brno, 2022. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 57 s. Vedoucí bakalářské práce Václav Pištěk.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením prof. Ing. Václava Píštěka, DrSc. a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 20. května 2022

.....

Dan Kejval

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto prof. Ing. Václavu Píštěkovi, DrSc. za jeho čas, ochotu, cenné rady a připomínky, které mi pomohly k dokončení této bakalářské práce. Dále bych chtěl také poděkovat rodině a svým blízkým za podporu během celého studia.

OBSAH

Úvod	10
1 Vodíkové palivové články	11
1.1 Základní princip činnosti a konstrukce	11
1.2 Elektrody a třífázové rozhraní	12
1.3 Palivo	13
1.3.1 Reformování	15
1.3.2 Zásobníky vodíku	19
1.4 Výhody a nevýhody vodíkových palivových článků	22
1.5 Elektrické napětí, proudová hustota a účinnost	23
2 Druhy vodíkových palivových článků	26
2.1 AFC – alkalické články	26
2.2 PEMFC – články s polymerní membránou	28
2.3 DMFC – články pro přímou reakci metanolu	30
2.4 PAFC – články s kyselinou fosforečnou	31
2.5 MCFC – články s roztavenými uhličitany	33
2.6 SOFC – články s tuhými oxidy	35
2.7 Shrnutí vlastností jednotlivých typů palivových článků	37
3 Využití vodíku v ČR	39
4 Současné využití vodíku u zahraničních výrobců automobilů	41
4.1 Toyota Mirai II	42
4.2 Hyundai Nexu	43
4.3 Hyundai XCIENT Fuel Cell	45
4.4 Toyota Sora	46
4.5 Shrnutí současného využití vodíku u zahraničních výrobců automobilů	47
Závěr	49
Použité informační zdroje	51
Seznam použitých zkratk a symbolů	57

ÚVOD

V současné době je svět obklopen špatnými zprávami ohledně globálního oteplování, klimatických změn a znečištění ovzduší, kdy se vlivem skleníkových plynů a prachových částic stává život pro lidi na planetě obtížnějším. Velký podíl na tomto problému mají teplárny, tepelné elektrárny, průmysl a veškerá doprava, všechny tyto oblasti využívají pro svoji funkci fosilní paliva. Z těchto důvodů se značně zpřísňují emisní limity vydané Evropskou unií, která se snaží „vymýtit“ spalovací motory, jež by do roku 2035 mohly patřit minulosti. Případně také uzavřít všechny uhelné elektrárny a teplárny, a využívat zelenou energii, popřípadě zdroje, které natolik nezatěžují životní prostředí. Dalším neopomenutelným problémem je množství ropných zásob. Nevytěžených ropných nalezišť rapidně ubývá a hladina zásob se blíží svému dnu. Tyto okolnosti tak nutí vědce ve vývojových centrech vyvinout nové technologie pro ekologičtější život, jednou z variant by mohly být vodíkové palivové články (dále jen HFC).

Automobilový průmysl v důsledku zmíněným příčinám prochází největší změnou za posledních sto let a zaměřuje se na přechod ze spalovacích motorů na alternativní pohony. V posledních letech se nejvíce zabývá elektrickou energií dodávanou z baterií, avšak další z možných variant je již zmíněné použití vodíkových palivových článků, na které se právě tato bakalářská práce zaměřuje. HFC fungují tak, že při reakci vodíku a kyslíku vytvářejí energii ve formě elektrické energie. Pozůstatkem neboli vedlejším produktem této chemické reakce je ve většině případů čistá voda, která neznečišťuje ovzduší, a proto tato technologie představuje právě onu čistou energii. Jedná se o elektrochemické zařízení s vysokou účinností, která může být oproti spalovacím motorům až dvojnásobná, s možným širokým spektrem využití. Má v budoucnu nahradit spolu s bateriemi veškeré pohony, jež za sebou zanechávají uhlíkovou stopu. Palivové články (dále jen FC) nespotřebovávají reakcí elektrolyt, mohou pracovat takřka bez časového omezení a jejich životnost je podstatně vyšší. Palivo lze získat i cestou bez fosilních paliv, a tedy zajistit, aby celý tento proces, od výroby k přeměně na vodu, byl bezemisní a nezatěžoval životní prostředí. I to však má svá úskalí, jako například velikost molekuly vodíku či jeho výbušnost při vysoké koncentraci se vzduchem. Ovšem i navzdory rizikům, která tento alternativní pohon nabízí, výhody stále převažují nad problémy, a tudíž jde o jednu z možných cest, jak se stát nezávislým na používání fosilních paliv, odlehčit životnímu prostředí a vyčistit ovzduší na Zemi.

Předkládaná bakalářská práce nejprve vysvětluje princip vodíkového palivového článku, popisuje význam a činnosti všech jeho nezbytných součástí a také se zaměřuje na palivo, bez kterého by nemohl plnit správně svoji funkci. Poté rozebírá jednotlivé typy vodíkových palivových článků, věnuje se zhodnocení jejich účinnosti, a nakonec analyzuje současné využití vodíku v ČR i u zahraničních výrobců automobilů.

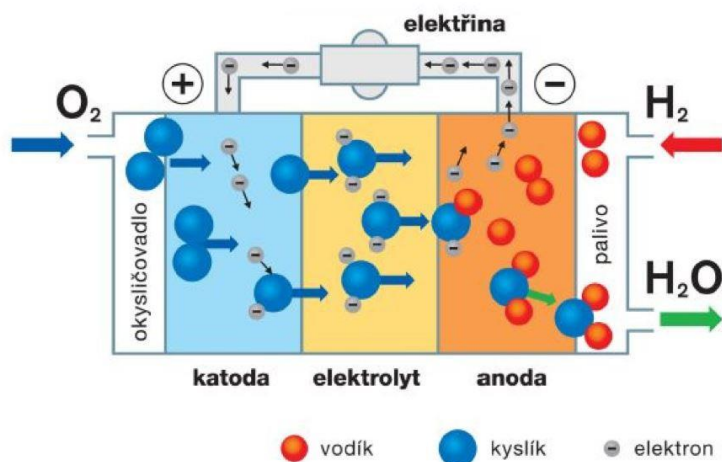
1 VODÍKOVÉ PALIVOVÉ ČLÁNKY

1.1 ZÁKLADNÍ PRINCIP ČINNOSTI A KONSTRUKCE

Palivový článek je elektrochemické zařízení, které slouží k přímé přeměně vnitřní energie paliva na energii elektrickou. Jedná se o inverzní princip k elektrolýze a nazývá se také tzv. studené spalování. Pracuje s vysokou účinností, která může být až dvojnásobná oproti spalovacím motorům. Každý palivový článek se skládá ze tří základních komponentů, kterými jsou katoda (kladná elektroda), anoda (záporná elektroda) a elektrolyt.

Správné funkce palivových článků jsou zajištěny přivedením paliva a okysličovadla na elektrody. Jako palivo se využívá vodík, který může být buď v čisté formě nebo získaný tzv. reformováním. Okysličovadlo je zpravidla plyn, nejčastěji kyslík ze vzduchu, získaný mechanickým čištěním přes prachový filtr. Za podmínek stálého přívodu paliva a okysličovadla lze docílit u FC nepřetržitý provoz.

Dle [1] a [3] je popsán princip palivového článku, který je poměrně jednoduchý a u všech typů podobný. Na zápornou elektrodu článku se přivádí palivo. To zde oxiduje za pomoci katalyzátoru, zbavuje se valenčních elektronů a vznikají tu kladně nabitě ionty (rov. 1). Elektrolyt či membrána odděluje elektrody, zabraňuje kontaktu obou plynů a vymezuje cestu elektronů, které se musí pohybovat vnějším obvodem ke kladné elektrodě, čímž vytvářejí elektrický proud. Podmínkou palivového článku je, že vnější obvod musí být se zátěží (nejčastěji bývá připojen elektromotor), poněvadž by se chemická reakce z důvodu nedostatku elektronů zastavila. Na kladnou elektrodu se přivádí okysličovadlo a díky přichozím elektronům, které byly přeneseny přes vnější obvod, zde probíhá redukce. Jedná se o vytváření záporně nabitých iontů (aniontů) okysličovadla (rov. 2). Tyto anionty poté reagují na katodě buďto s prošlými kationty elektrolytem za vzniku vody, jak ukazuje rov. 3, anebo migrují elektrolytem k anodě, kde se přiváděné palivo s těmito anionty okysličovadla redukuje za vzniku vody a elektronů podle rov. 4. Uvolněné elektrony jsou poté opět vedeny ze záporné elektrody na kladnou a celý proces probíhá znovu. Směr pohyblivých iontů závisí na jejich polaritě, jelikož každý druh palivového článku má tyto ionty jiné. Kladně nabitě ionty přebíhají od anody ke katodě a záporně nabitě ionty mají směr opačný. Dále se i od toho odvíjí, na jaké elektrodě bude vznikat voda, jež je zpravidla vedlejším produktem (při vysokých teplotách vodní pára a teplo), která odchází z palivového článku.



Obr. 1 Princip vodíkového palivového článku s migrujícími anionty okysličovadla na anodu [10]

V případě palivového článku s elektrolytem vytvořeným z kyselého roztoku nebo polymerní membrány a s podmínkou procházení kationtů paliva přes elektrolyt ke katodě je děj na anodě definován chemickou rovnicí [2]:



Redukce okysličovadla probíhající na katodě [4]:



Výsledná reakce na katodě [2]:



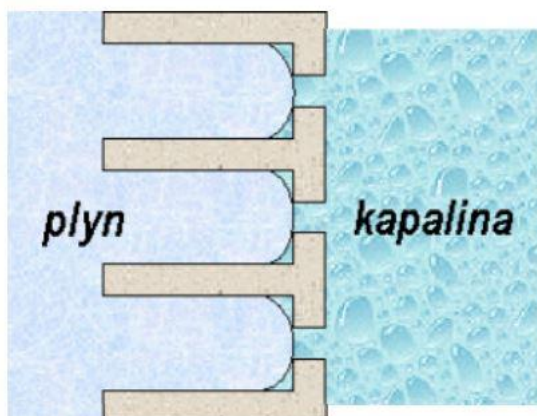
Dalším již zmíněným způsobem je migrace aniontů okysličovadla k anodě, zpravidla u alkalických článků. Na katodě probíhá pouze redukce okysličovadla podle rov. 2 a chemickou rovnicí na anodě lze vyjádřit v následujícím tvaru [4]:



Nedílnou součástí pro funkci palivového článku jsou i bipolární desky s mikrokanálky. Využívají se pro rozvod reakčních plynů (vodík, kyslík), k vedení proudu a odvádění produkované vody. Mimo jiné bipolární desky oddělují a utěsňují jednotlivé články, které se ve svazcích řadí jeden vedle druhého, neboť samotný palivový článek sám o sobě generuje malé napětí. Svazky se řadí buďto sériově, nebo paralelně pro dosažení potřebné hodnoty napětí a proudu. Další nedílnou součástí je tepelný systém, poněvadž je nutné zajistit chlazení a odvod reakčního tepla v palivových člancích, aby nedošlo k poškození součástí a udržení potřebné teploty pro správný chod. [1], [8]

1.2 ELEKTRODY A TŘÍFÁZOVÉ ROZHRAŇÍ

Elektrody jsou v podstatě složeny z vrstvy katalyzátoru a pórovité vnitřní vrstvy, na kterých se musí zaručit střetnutí tří fází, zde vzniká tzv. třífázové rozhraní. Jedná se o pevnou, kapalnou a plynnou fázi. Pórovitá vnitřní vrstva, nejčastěji vyrobená z grafitu pro korozní stálost, nižší cenu a dobrou elektrickou vodivost, je opatřena velmi tenkým nátěrem platiny (několik mikrometrů), jenž pracuje jako katalyzátor chemické reakce. Jeho úkolem je pouze vyvolat reakci mezi reaktanty a elektrolytem, ale nepodílet se na ní, zachovat si svoje chemické složení a neopotřebovat jej. Platina je nejvíce využívaným katalyzačním materiálem z důvodu nejvyšší odolnosti v kyselém prostředí a také pro nejlepší kinetiku při redukci kyslíku do 100 °C. V případě použití čisté platiny by bylo zapotřebí 4 až 8 mg/cm², což by bylo velice nákladné. Proto se vyrábí elektrody v kombinaci s grafitem, kde se množství platiny pohybuje okolo 0,1 až 0,4 mg/cm². Pro katalyzátory lze využít i další drahé kovy (např. palladium, stříbro, nikl atd.), nicméně záleží na pracovních podmínkách, ve kterých budou pracovat a podle toho je správně volit. Při vysokých pracovních teplotách není zapotřebí tak drahých kovů, neboť dostatečnou rychlost reakcí zajišťují právě vysoké teploty. Také alkalické (zásadité) prostředí je pro využití větší škály materiálů přívětivější. [1]



Obr. 2 Schématický řez elektrody s třífázovým rozhraním [6]

Rozhraní kapalina – plyn se stabilizuje u palivových článků kapilárním efektem, a to pomocí právě již zmíněných pórovitých elektrod, které umožňují kapalině vzlínat malými póry, zatímco tlak plynu jí nedovolí vnikat do větších pórů. Tyto póry vznikají během výroby například tak, že se elektrody lisují s určitou velikostí zrn nebo se snadno rozpustnými materiály, po jejichž odplavení vznikají ve struktuře dutinky. Slučování dvou fází probíhá díky pozitivním vlastnostem elektrolytu, jenž má tendenci vytvářet smáčivý film na vnitřní straně elektrody. Palivo nebo okysličovadlo difunduje skrz tento film a dosahuje povrchu elektrody, kde dochází k reakci kapaliny a plynu. [4], [6]

1.3 PALIVO

Palivem je vodík, který je základním předpokladem pro správný chod vodíkového palivového článku. Ačkoliv je nejjednodušším a nejlehčím plynným chemickým prvkem, jenž byl dosud objeven, tvoří převážnou část hmoty ve vesmíru. Může skvěle sloužit pro skladování energie a uchovat ji po dobu měsíců, což je oproti akumulátorům obrovská výhoda, jelikož baterie ji dokážou udržet pouze v rámci dnů. Kvůli velmi nízké objemové hustotě vodíku je problém s jeho skladováním a je zapotřebí vodík stlačit či zkapalnit. Lze jej použít v čisté formě (přímý zdroj), ale v této podobě se na naší planetě téměř nevyskytuje. Nejčastěji je zastoupen ve sloučeninách, ze kterých je vodík potřeba separovat tzv. reformováním (nepřímý zdroj).

Valná většina lidí má vodík zafixovaný jako nebezpečné palivo pro pohon automobilů, které dokáže pouze napáchat velké škody. Ve skutečnosti tomu tak není a dokazují to tři následně uvedené důvody. Za prvé tlakové zásobníky jsou velice odolné a oproti benzínovým nádržím dokážou snést i ty nejtvrdsí havárie. Za druhé při úniku se vodík rychle rozšiřuje do okolí a nezpůsobuje žádné nebezpečí nahromadění. Za třetí, dojde-li k jeho zapálení, pak ve většině případů dochází pouze ke shoření paliva, a ne k výbuchu. I kdyby tato situace nastala, je explozivní energie dvaadvacetkrát nižší než u benzínových par a k vytvoření hořlavé směsi se vzduchem je zapotřebí třikrát více vodíku než benzínových par. Hoření nezpůsobí ani žádné větší viditelné škody na autě, jelikož ve srovnání s benzínem je šířena radiací do okolí pouze jedna desetina tepla a teplota plamene je o 7 % nižší. Tudíž lze tvrdit, že vodík je bezpečnější než současně využívaná paliva, jako například benzin a zemní plyn. [8]

Bezpečnost: **vodík** (vlevo) vs **benzín** (vpravo)

Obr. 3 Porovnání bezpečnosti vodíkové a benzínové nádrže při cíleném zapálení [20]

Článek [15] uvádí rozdělení vodíku podle způsobu výroby, který lze dělit barvami na různé druhy:

Zelený vodík se získává pomocí elektrolýzy vody s využitím obnovitelné elektřiny (např. solární panely, větrné elektrárny apod.). Zelený se nazývá proto, že nezanechává za sebou žádné škodliviny a emise ve formě oxidu uhličitého.

Šedý vodík se extrahuje reformací z fosilních paliv, jako jsou zemní plyn či metan. Vylučuje se za vysokých teplot za přítomnosti vodní páry tzv. parní reformací. Tímto procesem vzniká škodlivý oxid uhličitý, který se následně vypouští do ovzduší. V současné době se jedná o nejčastější typ vodíku, ale je snaha ho nahradit jinými typy, jako kupříkladu již zmíněným zeleným či modrým vodíkem.

Modrý vodík je možné získat obdobně jako šedý vodík, avšak s tím rozdílem, že vzniklý oxid uhličitý je zachytáván a ukládán pomocí technologií CCU (Carbon Capture and Use) a CCS (Carbon Capture and Storage). Takto vzniklý vodík vychází díky odfiltrování emisí v celkové bilanci lépe, i přestože je jeho zdrojem zemní plyn nebo metan.

Černý nebo **hnědý vodík** se vyrábí z uhlí. Tudíž barva tohoto vodíku je odvozena od jeho původu. U tohoto typu je především využíván způsob zplyňování uhlí, jenž je velmi znečišťujícím procesem, který vytváří spoustu oxidu uhličitého a oxidu uhelnatého. Vzniklé látky jsou vypouštěny následně do atmosféry.

Tyrkysový vodík lze extrahovat tepelným štěpením metanu pomocí pyrolýzy. Proces odstraňuje uhlík v pevné formě namísto plynného oxidu uhličitého.

Fialový vodík je získáván pomocí jaderné energie a tepla pomocí kombinované chemicko-tepelné elektrolýze vody.

Růžový vodík se vyrábí elektrolýzou vody s využitím elektřiny z jaderné elektrárny.

Červený vodík se získává vysokoteplotním katalytickým štěpením vody pomocí tepelné jaderné energie.

Bílý vodík je přirozeně se vyskytující vodík, který se na naší planetě téměř nenachází.

1.3.1 REFORMOVÁNÍ

Pod pojmem reformace si lze představit přeměnu sloučeniny obsahující vodík (např. molekula metanu) ve vodík neboli separaci vodíku ze sloučeniny pomocí konvenčních, obnovitelných či jaderných zdrojů. Nejčastějšími látkami pro reformaci jsou fosilní paliva, voda a biomasa. [3]

Tyto suroviny lze reformovat následujícími procesy:

fosilní paliva:

- parní reformace,
- parciální oxidace,
- zplynování;

biomasa:

- pyrolýza,
- zplynování,
- biologická přeměna;

voda:

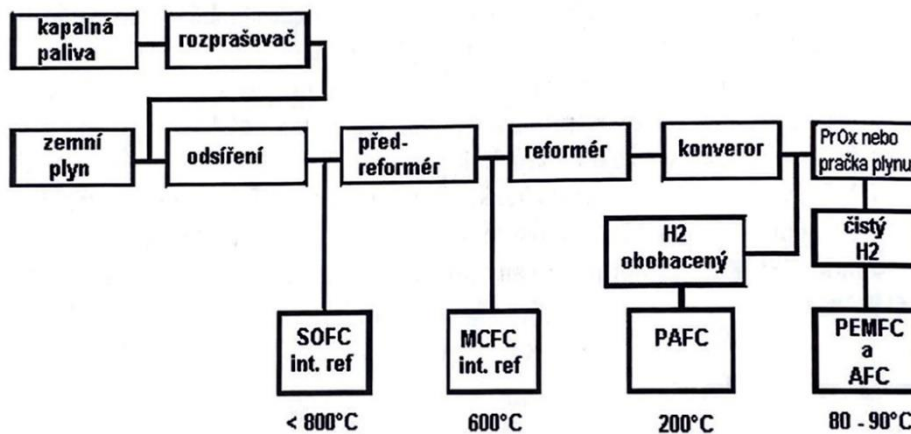
- elektrolyza,
- termochemické štěpení,
- biologické štěpení.

Pro extrahování vodíku z fosilních paliv se obecně využívá tepla a katalýzy. Obdobně je tomu tak i v případě biomasy, pouze s tím rozdílem, že lze využít i biologickou přeměnu ve formě fermentace. Odlišným způsobem je získávání vodíku z vody. Zde je využito principu štěpení H_2O na ionty vodíku a kyslíku buďto elektřinou, nebo nově zkoumanými metodami, jež využívají termochemické či biologické štěpení. V případě výroby H_2 z vody je obvykle, oproti získávání vodíku z fosilních paliv, tou nejčistší možnou formou, po které nevznikají žádné nebo téměř žádné emise.

Před reformovacím procesem vodíku, jakožto paliva do palivového článku, je zapotřebí dbát na dva důležité faktory [1]. Za prvé ještě před samotným procesem reformování je zapotřebí čištění nepřímého paliva. Látky jako síra a zbytková tekutá paliva mohou poškodit katalyzátory, a způsobit tak nefunkčnost celého zařízení. Za druhé častým jevem při reformaci pomocí tepla a katalýzy bývá vznik oxidu uhelnatého, který vzniká výrobou vodíku ze zemního plynu, uhlovodíků, uhlí apod. Jeho vliv je pro palivový článek velmi nežádoucí, neboť může způsobit otrávení platinových katalyzátorů a následnou nefunkčnost elektrod. Proto je zapotřebí zajistit posouvající reakci, která oxid uhelnatý, za přívodu vodní páry, přemění na oxid uhličitý, a neovlivní tak činnost katalyzátorů. Avšak jak už je známo, i oxid

uhličitý, jakožto zástupce skleníkových plynů, škodí. V posledních letech je větší snaha ukládat tyto oxidy a zamezit tak případnému znečištění ovzduší, jak je zmíněno u modrého vodíku.

Podle toho, kde daná reakce získávání vodíku probíhá, se reformování dělí také na vnitřní a vnější. Je-li tomu tak uvnitř palivového článku, jedná se o vnitřní reformace. V tomto případě dokáže FC vysokými teplotami separovat molekuly vodíku sám. Vnější reformace pracuje s přídatným zařízením, kterým je nutno zajistit oddělení molekul vodíku, a až teprve pak jej dopravit do palivového článku na zápornou elektrodu.



Obr. 4 Závislost koncepce reformace pomocí katalýzy a tepla na typu palivového článku [4]

Odsíření paliva (čištění) za vzniku vody, které je následně přiváděno do reforméru [6]:



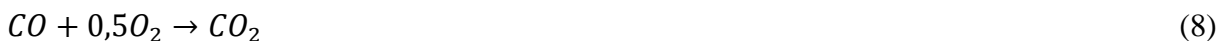
Chemická rovnice popisující reakci v reforméru, popřípadě i v předreforméru [4]:



Posouvací reakce přeměňující oxid uhelnatý (CO) na oxid uhličitý (CO₂), jenž probíhá v konvertoru [4]:

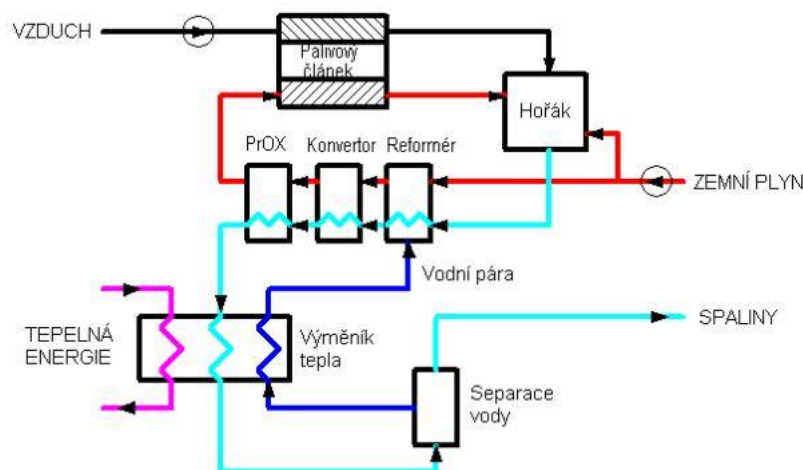


Reakce v PrOx reaktoru pro zbývající přeměnu oxidu uhelnatého [1]:



V současné době je nejpoužívanějším a nejlevnějším typem reformování **získávání vodíku ze zemního plynu a metanu pomocí páry (tzv. parní reformace)**, která je popsána rov. 6. Pokud jsou atomy vodíku k atomům uhlíku zastoupeny v poměru 4:1 [4], tak je zajištěna vysoká účinnost reformace (70–90 %) a to je hlavním důvodem, proč je zemní plyn nejpoužívanějším nepřímým zdrojem [8]. Proces je endotermní, a tudíž je při něm zapotřebí stálý přívod tepla. Probíhá za přítomnosti katalyzátorů, které reagují s vysokoteplotní párou (700 až 1 000 °C) pod tlakem 3 až 25 barů a s metanem za vzniku vodíku, oxidu uhelnatého

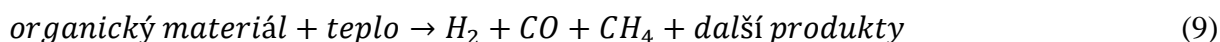
a relativně malého množství oxidu uhličitýho [16]. Oxid uhelnatý je zapotřebí poté posouvající reakcí přeměnit na oxid uhličitý, tento děj definuje rov. 7. Problém této operace spočívá v emisích, poněvadž vzniklý oxid uhličitý je v současné době vypouštěn do ovzduší. Řešením do budoucna je již zmíněný systém CCU a CCS, který by CO_2 zachytával a ukládal.



Obr. 5 Schéma systému přípravy a reformování zemního plynu [6]

Pyrolýza je endotermický děj, při kterém je vodík získáván z vysušeného a odplyněného organického materiálu (biomasy), jenž se zahřívá na teplotu okolo $500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Oproti zplyňování je tento proces bez přívodu kyslíku a eliminuje tvorbu oxidů uhlíku. To má příznivý vliv, neboť není zapotřebí přeměňovat posouvací reakcí oxid uhelnatý na oxid uhličitý. Vzniká tak pevný uhlík, který je možné uložit, a nevypouštět tak škodlivé látky do ovzduší. Další vzniklé vedlejší produkty, jako např. metan nebo biooleje, je možné dále přeměňovat na vodík, a zvýšit tak účinnost celého procesu. [3]

Reakce při pyrolýze [3]:



Podle [16] je **parciální oxidace** exotermický děj, který uvolňuje teplo. K reformaci se využívají nejčastěji uhlovodíky (např. metan), jež reagují s nedostatečným množstvím kyslíku, aby nedošlo k jejich úplnému spálení. Nejprve je vstupní materiál zplyňován za přítomnosti kyslíku. Tímto způsobem vzniká vodík a oxid uhelnatý, který je dále chemickou reakcí za přítomnosti vodní páry přeměňován na oxid uhličitý s dalším vodíkem. Z rov. 10 si lze povšimnout, že oproti parnímu reformování je vlivem absence vysokoteplotní páry nižší produkce vodíku s účinností procesu mezi 60–70 % [3].

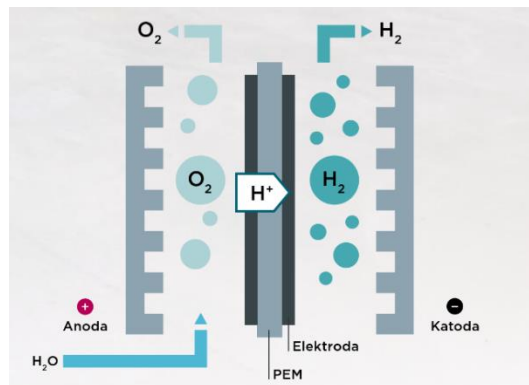
Chemická rovnice popisující parciální oxidaci [3]:



V případě výroby vodíku **zplyňováním uhlí či biomasy** se jedná o proces na podobném principu. Nejdříve probíhá přeměna uhlí nebo biomasy působením vysokoteplotní páry a kyslíku (může být použit i vzduch) na plyn tvořený směsí uhlovodíků, vodíku, oxidů uhlíku, dehtových látek a vodní páry. Poté se určitá část uhlíku využije ke zplyňování a vytváření

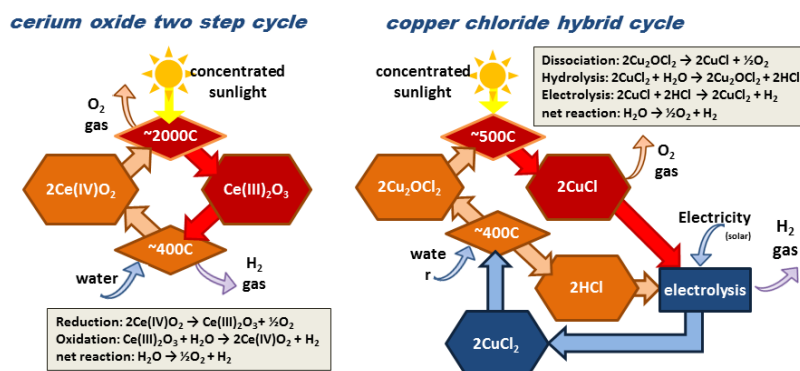
dalšího vodíku, druhá část pak ke spalování, pro vytvoření reakčního tepla. Nakonec probíhá separace znečišťujících látek. Účinnost celého procesu se pohybuje okolo 30–50 %, a tudíž se s tímto způsobem výroby vodíku do budoucna téměř nepočítá i s ohledem na produkci znečišťujících látek. [3]

Dalším známým způsobem získávání vodíku pomocí reformace je **elektrolýza vody**. V porovnání s parním reformováním ze zemního plynu je tento typ bezemisní. Neprodukuje žádné vedlejší produkty nebo emise, kromě vodíku a kyslíku, s účinností okolo 80 %. Průchod stejnosměrného proudu kapalinou způsobí rozštěpení molekuly vody. Pomocí reakce v elektrolytu, z roztoku kyseliny sírové (H_2SO_4), vznikají kationty vodíku, které putují k anodě, přijímají elektrony a slučují se v molekuly vodíku. Při reakci se spotřebovávají voda a elektrická energie. Tento způsob má do budoucna velký potenciál, neboť s využitím obnovitelných zdrojů (např. fotovoltaické články) lze levně vyrobit elektrický proud pro elektrolýzu vody. V posledních letech se diskutuje i nad možným odebíráním elektřiny z generátoru jaderné elektrárny. [8]



Obr. 6 Princip elektrolýzy vody [18]

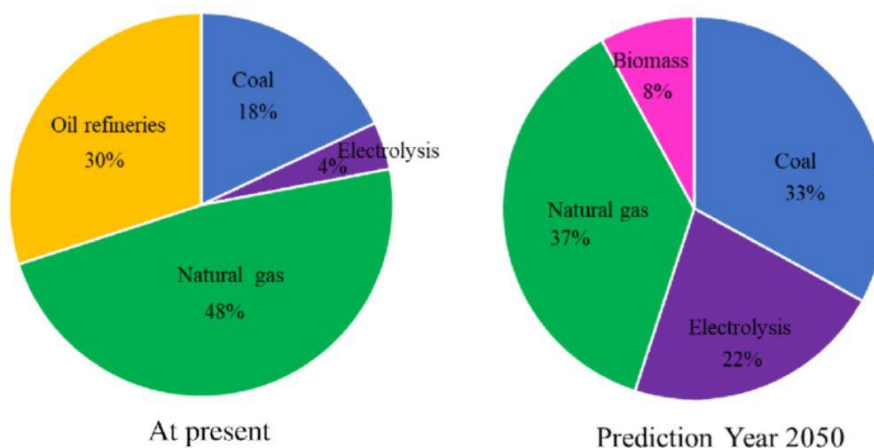
Termochemické štěpení vody využívá vysokoteplotní teplo (500 až 2 000 °C) k řízení chemických reakcí a následné produkci vodíku. Chemikálie používané v procesu jsou recyklovány, díky čemuž vzniká uzavřená smyčka, která spotřebovává pouze vodu a produkuje vodík a kyslík. Teplo je získáváno nejčastěji pomocí solárních zrcadel (heliostat), solárních panelů či z odpadního tepla jaderných reaktorů. Obrovskou výhodou představuje nulová produkce emisí. [17]



Obr. 7 Dva příklady termochemických cyklů dělení vody, vlevo přímý dvoukrokový tepelný cyklus oxidu ceru a vpravo hybridní cyklus chloridu měďnatého [17]

Posledním typem získávání vodíku jsou **biologické procesy**, které jsou v současné době v rané fázi. Avšak vědci této problematice věnují pozornost a snaží se o komerční rozšíření. Prvním možným typem je fermentace (kvašení) mikroorganismů, jako jsou bakterie, jež rozkládají organickou hmotu (nejčastěji biomasu) za vzniku vodíku bez přítomnosti světla. Oproti tomu fotosyntetické mikroby (mikrořasy nebo sinice) spotřebovávají vodu v přítomnosti slunečního světla a jako vedlejší produkt produkují vodík. Jedná se o štěpení vody na ionty vodíku a kyslíku. Vzniklý kyslík je u tohoto procesu nežádoucí, jelikož zamezuje reakcím, které jsou potřebné pro správnou funkci. [19]

Shrnutí kapitoly reformace je takové, že v dnešní době je nejvíce rozšířeným způsobem získávání vodíku ze zemního plynu parní reformací. Při tomto druhu reformace se vytváří šedý vodík, který znečišťuje životní prostředí. Do budoucna je snaha tento způsob eliminovat a zaměřit se především na elektrolyzu vody či ukládání vzniklého CO_2 z parní reformace. Dále je snaha o nalezení nových způsobů, které by měly nižší emise, jako již zmíněné termochemické nebo biologické štěpení vody, a zajímat se o získávání vodíku i z biomasy, které je na naší planetě velké množství. Měla by nahradit ještě spolu s dalšími čistými zdroji produkci vodíku při zpracování ropy. Díky snižujícím se zásobám ropy a vzniklým emisím je snaha se od tohoto způsobu odpoutat, jak lze vidět i na Obr. 8.



Obr. 8 Procentuální porovnání zdrojů výroby vodíku v současnosti s předpokládaným v roce 2050 [21]

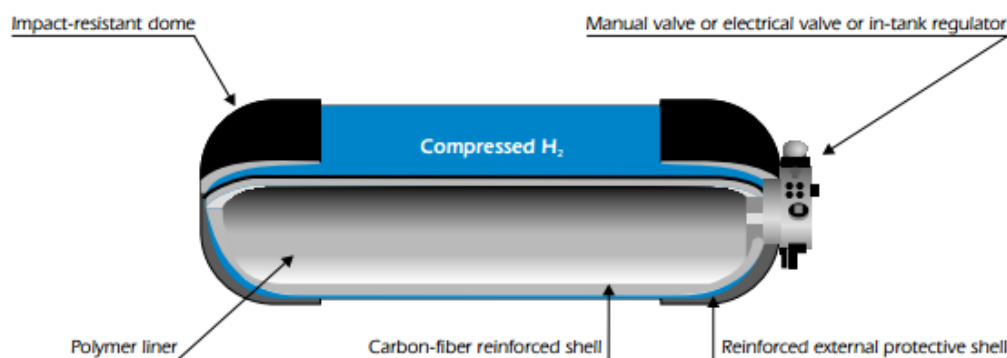
1.3.2 ZÁSOBNÍKY VODÍKU

Vodík, jakožto nejlehčí prvek, představuje velký problém pro jeho skladování. Jeho uskladnění vyžaduje speciální konstrukce zásobníků, které si dokážou poradit s negativními vlivy, jako jsou například:

- malé molekuly H_2 , které dokážou pronikat stěnami a je obtížné je utěsnit,
- nízká hustota plynného vodíku (čtrnáctkrát lehčí než vzduch),
- rizika při přepravě v důsledku nebezpečné směsi se vzduchem,
- nízká teplota varu ($-253\text{ }^\circ\text{C}$).

Prvním z možných typů je **tlakový zásobník**. Ve světě dosud nejověřenější a nejdostupnější způsob uložení vodíku, jež lze nalézt i ve většině vyrobených vodíkových automobilů.

Stlačuje se pod vysokým tlakem do nádob, které jsou nejčastěji vyrobeny z kovů (ocel, hliník) či kompozitu, popřípadě kombinací obou materiálů [1]. Ocelové zásobníky se vyrábějí robustní a odolné proti vysokým tlakům, avšak jejich nevýhoda spočívá ve vysoké hmotnosti. Oproti tomu kompozity jsou sice lehké, ale umožní průchod vodíku skrz stěny a nedokážou ho dokonale utěsnit. Nejlepší možné řešení představuje kombinace obou těchto způsobů přidáním polymerní výstelky dovnitř nádrže. Vnitřní část je zpravidla kovová a obalena uhlíkovými vlákny (může to být i naopak). Pro plynný vodík je kvůli nízké hustotě nutné navrhovat nádoby umožňující snášet přetlaky až 700 barů, poněvadž u běžných nádrží na benzín a naftu, které dokážou snášet pouze 30 barů, by se uvnitř nádoby nacházelo pouze jedno hmotnostní procento tohoto plynu [22]. Pro představu, při tlaku 100 barů a 20 °C, je hustota plynného vodíku přibližně 7,8 kg/m³. Jedná se o velmi bezpečný a spolehlivý způsob z hlediska konstrukce, který lze provozovat i za normálních podmínek. Jeho nevýhody jsou pouze hmotnost a neúčinnost. V porovnání s potřebnou energií pro stlačení vodíku na 350 barů, je v palivu pouze 30 % této energie [3]. Pro skladování velkého množství plynného vodíku je možné využít i potrubí či podzemní prostory (například solné dutiny či vyčerpaná ropná pole), které díky nízkým stavebním nákladům, nízké míře úniku, rychlému odběru a minimálním rizikům představují zářnou budoucnost uskladňování vodíku [22].



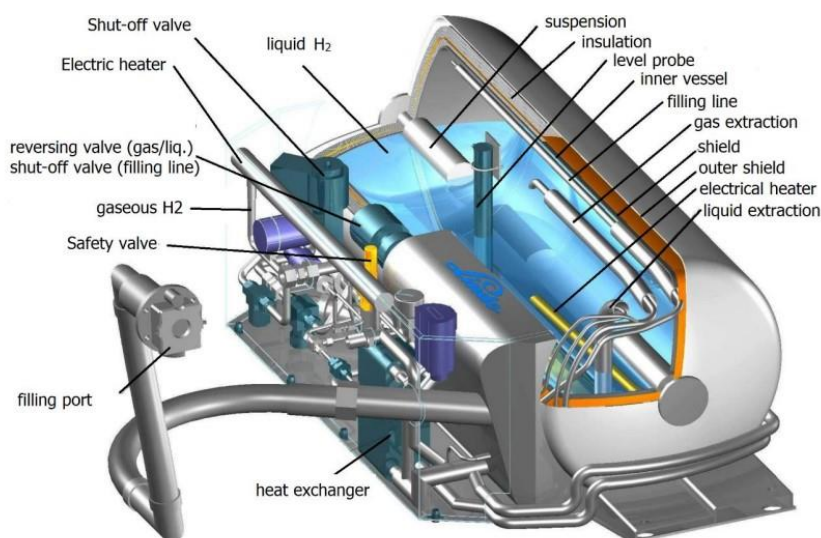
Obr. 9 Tlakový zásobník [24], Impact-resistant dome – nárazuvzdorná kopule, Polymer liner – polymerová vložka, Manual valve or electrical valve or in-tank regulator – ruční či elektrický ventil nebo regulátor v nádrži, Carbon-fiber reinforced shell – skořepina vyztužená uhlíkovými vlákny, Reinforced external protective shell – zesílená vnější ochranná skořepina

Zkapalněný vodík se ukládá do dvoustěnných nádob s vakuovým meziprostorem při teplotě varu H₂. Prostor mezi stěnami nádoby také obsahuje další materiály, jako jsou například polyesterové desky potažené oxidem hliníovým, dále se zde střídají vrstvy hliníkové fólie a skleněného vlákna nebo částice hliníku, oxidu křemičitého či perlitu [22]. Je tedy nutné navrhovat zásobníky s dostatečnou tepelnou izolací, která zamezí přístupu tepla a zahřívání vodíku, jelikož by to způsobilo jeho odpařování a zvyšování tlaku uvnitř nádoby. Tomuto jevu se ovšem nelze v realitě vyhnout, a tak je zapotřebí zásobníky vybavit přetlakovým mechanismem, jenž udržuje přetlak v přípustných mezích (max. 5 barů) [3]. Zkapalnění se realizuje pro přínos ve formě zvýšení hustoty, kdy je při teplotě -253 °C a tlaku 1 MPa hustota vodíku 70,8 kg/m³, a tudíž přibližně třikrát vyšší než u plynného vodíku stlačeného na 34,5 MPa při pokojové teplotě [1], [22].

Avšak tento způsob skladování má velkou řadu nevýhod, mezi něž patří [3], [22]:

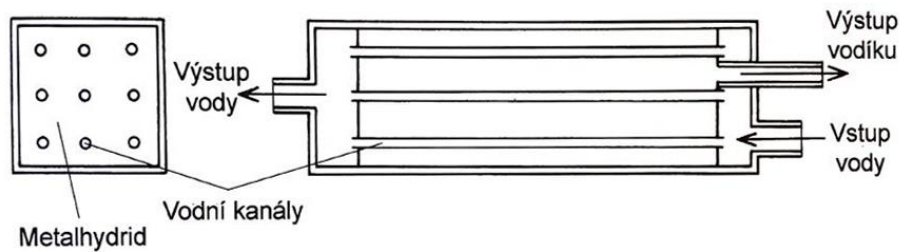
- velká neefektivita, až 40 % z celkové obsažené energie v palivu se spotřebovává na samotné zkapalnění,

- náklady na přepravu jsou vyšší než náklady na výrobu,
- odpařený vodík je nutné odsávat (ztráty až 3 % denně),
- dbát na čistotu vodíku kvůli možnosti ztuhnutí nečistot (většina plynů má vyšší teplotu varu) nebo vytvoření výbušné směsi s kyslíkem,
- nebezpečí výbuchu při havárii,
- při zkvalňování nutné předchlazení, protože plynný vodík se během škrticích procesů neochlazuje pro teploty nad -73 °C .



Obr. 10 Zásobník pro zkvalňovaný vodík [23], heat exchanger – výměník tepla, filling port – plnicí port, safety valve – bezpečnostní ventil, gaseous H₂ – plynný H₂, reversing valve – zpětný ventil, shut-off valve – uzavírací ventil, electric heater – elektrický ohříváč, liquid H₂ – kapalný H₂, suspension – zavěšení, insulation – izolace, level probe – hladinová sonda, inner vessel – vnitřní nádoba, filling line – plnicí trubka, gas extraction – odvod výparů, shield – obal, outer shield – vnější obal, liquid extraction – odvod kapaliny

Zásobníky metalhydridů se vyrábí z kovů a slitin, jež dokážou vytvářet hydridy. Jde o absorpci vodíku do materiálů neboli pronikání vodíku, který má malý atomový poloměr, do tzv. intersticiálních poloh kovů [25]. Nejčastěji se jedná o hořčík nebo slitiny ze dvou až tří následujících prvků: titanu, vanadu, chromu, železa, kobaltu, hořčíku, niklu, zirkonu, lanthanu a palladia [1]. Tyto kovy umožňují absorbovat velké množství vodíku za vysokého tlaku a při nízkých teplotách, popř. blízkých pokojové teplotě. Při tankování zásobníku je vodík ve formě plynu ukládán do kovové mřížky hydridů a doprovázen exotermickou reakcí, u které je nutné zajistit odvod tepla. Vydat ho nazpět je možné při snížení tlaku a ohřátí zásobníku, což může být realizováno přívodem tepla (termolýza), nebo reakcí s vodou (hydrolýza) [22]. Vzhledem ke skladovacímu tlaku okolo 1 MPa a nízkému tlaku při uvolňování lze zásobníky metalhydridu považovat za poměrně bezpečné. Jedinou nevýhodou je závislost na čistotě použitého plynu, neboť zásobníky absorbují i nečistoty, které se ukládají do kovové mřížky nevratně a způsobí snížení kapacity i životnosti zařízení [8].



Obr. 11 Zásobník metalhydridu [1]

Pro skladování lze také využít látky, jež v sobě obsahují molekuly vodíku, jako například metanol, popřípadě jiný alkohol či čpavek, ze kterých se vodík následně reformuje. Nejlepší možný způsob ukládání je v kapalně formě, kdy sloučeniny nabývají největší hustoty a nezaberou tolik prostoru. Tyto látky lze skladovat v tlakových nádržích, podobně jako u benzínu a nafty. V současné době se také vyvíjí možnost ukládání vodíku na uhlíkatých nanovláčkách, které se je snaží absorbovat. Další možnosti přináší metoda skleněných mikrokuliček. Ty se nejprve zahřejí, poté se ponoří do stlačeného vodíku a vlivem permeability stěn pohlcují vodík. Proces je ukončen ochlazením, jež vede k uzavření vodíku v kuličkách do doby, než jsou opět ohřáty a vodík z nich uvolněn. [8]

1.4 VÝHODY A NEVÝHODY VODÍKOVÝCH PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ

Každý typ vodíkového palivového článku má své kladné i záporné vlastnosti, ovšem k obecným výhodám patří zejména:

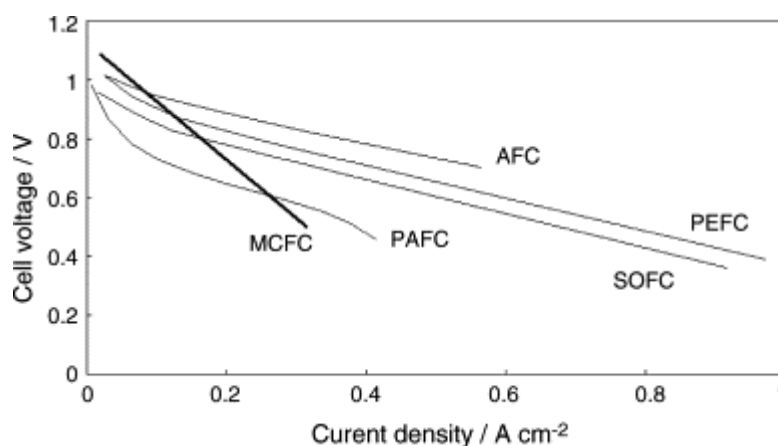
- vysoká životnost (až desetitisíce hodin),
- nízké opotřebení,
- vysoká účinnost,
- tichý chod v důsledku nepřítomnosti pohyblivých částí,
- velmi rychlá reakce na změnu zatížení,
- schopnost snášet přetížení,
- velmi nízké emise (u některých typů nulové),
- oproti jiným zdrojům výhodnější poměr energie k hmotnosti zařízení,
- lepší recyklace než u baterií.

Nevýhody vodíkových palivových článků:

- vysoká cena katalyzátorů (zpravidla platina, palladium, stříbro a další drahé kovy),
- nutnost odstranění znečišťujících látek z nepřímého paliva (síra, uhlíkové oxidy a zbytková tekutá paliva),
- korozivní účinky kapalných elektrolytů,
- citlivost na čistotu okysličovačla,
- udržování optimální teploty a tlaku aktivních látek,
- doba uvedení do provozu.

1.5 ELEKTRICKÉ NAPĚTÍ, PROUDOVÁ HUSTOTA A ÚČINNOST

Každý palivový článek může vytvořit při teplotě 25 °C a tlaku 1 013,25 hPa teoretické napětí 1,187 V. Nicméně provozní napětí článku se zátěží se pohybuje okolo hodnot 0,5 až 0,6 V, kdy dosahují svých maximálních výkonů. Při práci naprázdno je hodnota zpravidla okolo 1,1 V. Jednotlivé typy palivových článků pracují při různých podmínkách a mají různé závislosti napětí na proudové hustotě, jež ovlivňují generované napětí, a je nutné brát při konstrukci zřetel na tyto okolnosti, aby bylo dosaženo požadovaného napětí, při kterém je nejvyšší výkon palivového článku. Obr. 12 ukazuje voltampérové charakteristiky, kde lze vidět, že při porovnání palivových článků typu MCFC a PEFC, které budou probírány níže, MCFC dokáže pracovat pouze při nižších proudových hustotách, zatímco PEFC i při těch vyšších. Od toho se odvíjí i jejich velikost konstrukce, neboť články, pracující při nižších proudových hustotách, jsou ve srovnání s články, pracujícími při vyšších proudových hustotách, větší. Je snaha konstruovat plochy elektrod u MCFC co největší, aby se dosáhlo požadovaného napětí, kvůli čemuž tak zabírají více prostoru než PEFC. [3], [5]



Obr. 12 Závislost napětí na proudové hustotě pro jednotlivé typy palivových článků [35]

Vliv na napětí mají také tlak a teplota. Vyšší tlak v palivovém článku napomáhá vytvářet větší napětí, jelikož tlačí vodík a kyslík k místu kontaktu s elektrolytem, a zrychlují se tak reakce. Vyšší napětí lze vytvářet i zvyšováním teploty. Tímto způsobem se urychlují přenosy a reakce uvnitř palivového článku a klesá jeho odpor. Maximálních výkonů je docíleno v okamžiku, kdy vnitřní odpor článku je roven odporu vnějšího obvodu. [5]

Elektrochemickou účinnost palivového článku lze spočítat podílem skutečné hodnoty napětí a teoretické hodnoty napětí, která se u jednotlivých typů vodíkových palivových článků obecně pohybuje okolo poměrně vysokých hodnot, mezi 40–60 %.

Výpočet elektrochemické účinnosti palivového článku [5]:

$$\eta_{\text{článku}} = \frac{V_{\text{skut}}}{\varepsilon_{\text{článku}}} = \frac{V_{\text{skut}}}{1,187}, \quad (11)$$

kde V_{skut} je skutečná generovaná hodnota napětí palivového článku a $\varepsilon_{\text{článku}}$ je teoretická generovaná hodnota napětí.

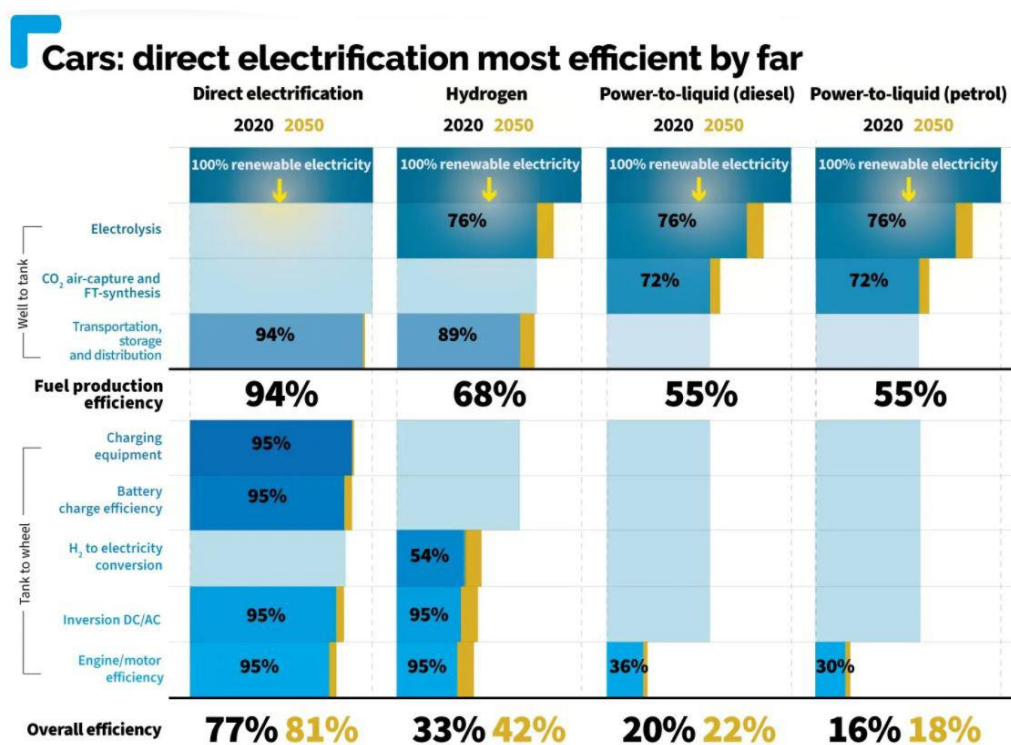
Pro dosažení co nejvyšší účinnosti samotného zařízení je zapotřebí co nejtenčí vrstva elektrolytu (snaha o nejmenší vzdálenost mezi elektrodami), maximalizovat kontaktní plochu mezi elektrodou a elektrolytem, a zajistit vysokou iontovou vodivost elektrolytu [7].

Pro aplikaci vodíkových palivových článků je však nutné brát v úvahu i účinnost výroby, distribuci a skladování paliva, vše je shrnuto v Tab. 1, jelikož tyto manipulace s vodíkem znatelně snižují účinnosti procesu od zdroje až po nádrž. U nejvíce využívaných způsobů získávání vodíku, jako je parní reformace, popřípadě nyní hojně rozebíraná elektrolyza, se tato hodnota pohybuje okolo 60 % účinnosti pro vodík ve stavu plynném či uloženém v hydridech. Avšak v případě využití kapalného stavu vodíku dokonce klesne až na pouhých 25 %.

Tab. 1 Účinnost výrobního řetězce vodíku či metanolu ze zemního plynu od zdroje suroviny po nádrž [1]

Surovina	Zemní plyn			
Výsledný produkt	H ₂ (hydrid)	H ₂ (plyn)	H ₂ (kapalina)	Metanol (na zdroji)
Těžba	94,5 až 97 %	94,5 až 97 %	94,5 až 97 %	94,5 až 97 %
Doprava (surovina, dlouhá trasa)	86,7 až 93 %	86,7 až 93 %	86,7 až 93 %	
Rafinace/syntéza	70,0 až 72,5* %	70,0 až 72,5* % 85** %	85,0** %	68 až 70 %
Skladování (hydrid stlačený na 70 MPa zkapaňování)	90,0 až 95,0 %	83,0 až 85,0 %	31 až 36,5 %	
Doprava, rozdělování čerpací stanice		94,0 až 97,0** %	95,0 až 98,0** %	97,0 %
Celková účinnost od zdroje k nádrži	51,6 až 62,1* %	47,6 až 55,6* % 54,3 až 63,2** %	20,5 až 27,4** %	62,3 až 65,9 %
* při decentralizované produkci H ₂		** při centrální produkci H ₂		

Díky již známým hodnotám účinností všech manipulací s vodíkem a palivového článku si lze určit účinnost celého procesu od zdroje po práci na kolech automobilu. Toto vyobrazení umožňuje Obr. 13, který mimoto porovnává i účinnost s bateriemi, naftou a benzínem, při použití obnovitelných zdrojů pro výrobu jednotlivých paliv či elektřiny. Co se týká horní části obrázku, kde je účinnost brána pro výrobní řetězec od zdroje suroviny po nádrž, klesá účinnost vodíku při výrobě elektrolýzou už o 32 % (průměrná hodnota, závisí na stavu vodíku, ve kterém se nachází). Ztráty jsou způsobeny velmi energeticky náročnou výrobou, skladováním a distribucí, která již byla shrnuta v tab. 1. Pro skladování zkapalněného vodíku je zapotřebí zajistit teploty hluboko pod bodem mrazu či pro stlačený vodík vysoké přetlaky. Tytéž problémy se vyskytují i při distribuci. U obou těchto manipulací s vodíkem dochází k jeho úniku. To ovšem nekončí, pokud automobil s palivovým článkem ujede vzdálenost z jednoho místa do druhého, jeho účinnost klesá na celkových 33 %, kvůli ztrátám způsobeným samotným provozem palivových článků, přeměnou stejnosměrného elektrického proudu na střídavý a účinností samotného elektromotoru, jenž zajišťuje pohyb. Jak si lze povšimnout, oproti naftě a benzínu jsou hodnoty dvojnásobně vyšší, avšak ve srovnání s bateriemi je účinnost o polovinu horší. Třebaže není jasné, co lze v budoucnu očekávat, je jisté, že u automobilů je z hlediska účinnosti jednoznačným vítězem pohon elektromotoru baterií.



Obr. 13 Porovnání účinností jednotlivých typů pohonných látek při využití obnovitelných zdrojů pro jejich výrobu [14]

2 DRUHY VODÍKOVÝCH PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ

Vodíkových palivových článků je vyvinuta celá řada. Avšak princip, kterými jednotlivé palivové články fungují, je u všech typů stejný. Liší se materiálem elektrod, použitým elektrolytem, pracovními teplotami a chemickými reakcemi na elektrodách.

Podle pracovních teplot rozdělujeme palivové články na:

- nízkoteplotní (60–150 °C),
- vysokoteplotní (150–1 050 °C).

U **vysokoteplotních** palivových článků obecně platí, že při využití vyšších provozních teplot patří k velkým přínosům menší ztráta napětí, zvýšení rychlosti reakce, vyšší teplotní rozdíl mezi palivovým článkem a okolními podmínkami (efektivnější odvod tepla), možnost použití alternativních materiálů pro katalyzátory a vyšší tolerance platinových elektrod na oxid uhelnatý (při nízkých teplotách způsobuje jejich otravu), což umožňuje využití reformovaného paliva pro snížení nákladů na provoz [27]. Tolerance elektrod se vůči oxidu uhelnatému rapidně zlepšuje při pracovních teplotách nad 140 °C. Další předností je odpadní teplo, které lze při vysokých teplotách snadno uplatnit v jiných procesech (např. kogenerace tepla a elektřiny či reformace přímo v palivovém článku), a zvýšit tak účinnost zařízení [26]. K jejich negativům patří dlouhý čas pro uvedení do provozu, ten může trvat několik minut až hodin, a snížení životnosti vlivem vyšších teplot. Překážkou dnešní doby je i vznik emisí CO₂, který vysokoteplotní typy produkují kvůli častému využití nepřímých paliv za účelem snížení nákladů na provoz.

Nízkoteplotní palivové články disponují především rychlým náběhem, okamžitou odezvou na změnu výkonu a čistou formou energie. Při jejich využití dochází pouze ke vzniku čisté vody, díky čemuž nezatěžují životní prostředí. Hlavní nevýhodou nízkoteplotních typů je nutnost přítomnosti platinových elektrod, a tím i zajištění čistoty reakčních látek, neboť by mohlo dojít k nefunkčnosti celého zařízení otrávením těchto elektrod oxidem uhelnatým. Kromě DMFC, který využívá jako palivo pouze metanol, je v 99,999 % nejčastěji palivem u těchto typů palivových článků vodík v čisté formě [27].

Podle typu elektrolytu rozdělujeme palivové články na:

- alkalické články (AFC – Alkaline Fuel Cells),
- články s polymerní membránou (PEMFC – Proton Exchange Membrane Fuel Cells, DMFC – Direct Methanol Fuel Cells),
- články s kyselinou fosforečnou (PAFC – Phosphoric Acid Fuel Cells),
- články s roztavenými uhličitany (MCFC – Molten Carbonate Fuel Cells),
- články s tuhými oxidy (SOFC – Solid Oxide Fuel Cells).

2.1 AFC – ALKALICKÉ ČLÁNKY

Palivové články s alkalickým elektrolytem jsou nejstarší a nejlevnější z řad palivových článků. Jejich pracovní teploty se dříve pohybovaly mezi 100–250 °C, ale nyní jsou typické teploty okolo 70 °C, které je řadí do kategorie **nízkoteplotních** [12]. Díky takto nízkým teplotám lze docílit rychlého náběhu, okamžité odezvy na změnu výkonu a uplatnění pro

dynamické provozní režimy. Vzhledem k rychlosti chemických reakcí je AFC typem, který má jednu z nejvyšších účinností ze všech druhů FC (až 60 %) s výkonností nejčastěji do 100 kW, jenž vytváří napětí naprázdno 1 V [7]. Články jsou primárně navrhovány pro kompaktní systémy, ale je možná i instalace do velkých elektráren. Nejvyužívanější byly ve druhé polovině 20. století, kdy sloužily jako zdroj elektrické energie a pitné vody při misích Apollo a poté v raketoplánech Orbiter.

Elektrolytem je hydroxid draselný (KOH), fixovaný v azbestové matici, v koncentraci mezi 35–50 hmotnostními procenty [4]. KOH se používá pro svoji výbornou vodivost, která je z alkalických hydroxidů největší. Jeho teplota tuhnutí pod $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ umožňuje startování v podmínkách i pod bodem mrazu [13]. Podle proudění lze elektrolyt rozdělit na cirkulující a nehybný. Rozdíl mezi nimi spočívá především v tom, že při cirkulaci dochází k odvádění tepla a vody spolu s elektrolytem, zatímco u nehybného je voda odváděna z anody v samostatné formě.

Palivem pro správnou funkci článku je pouze čistý vodík a **okysličovadlem** čistý kyslík. Vzduch v tomto případě nelze využít, neboť by oxid uhličitý obsažený ve vzduchu vytvořil s KOH uhličitán draselný (K_2CO_3), který by póry elektrod zanášel a bránil v difuzi [2]. Vysoké účinnosti alkalického článku se dosahuje právě díky takto čistým reakčním plynům, jež nezanášejí elektrody nečistotami, a nevznikají tak zbytečné ztráty.

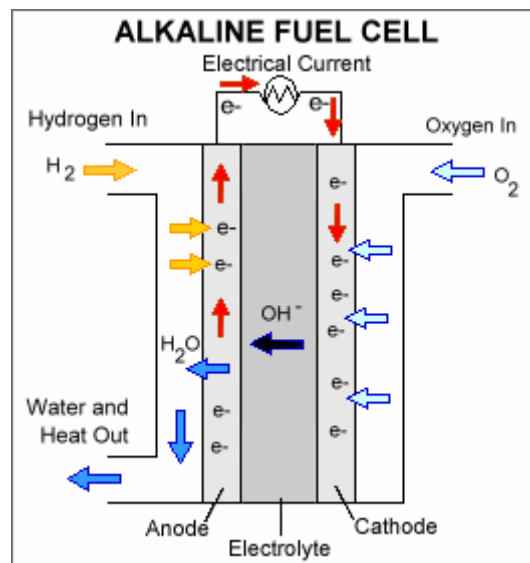
Elektrody, jakožto katalyzátory, se díky alkalickému prostředí u tohoto typu nezhotovují pouze z platiny. Vyrábí se nejčastěji z porézního práškového niklu, ale také ze stříbra či dalších ušlechtilých kovů pro snížení ceny celého zařízení [3]. Zásaditý elektrolyt umožňuje rychlejší redukci kyslíku na katodě oproti kyselému [6].

U palivového článku s alkalickým elektrolytem se na katodě sloučí molekuly vody s molekulami kyslíku, absorbují elektrony a vytvoří anionty hydroxidu. Chemická reakce probíhá podle rov. 12 [2].



Poté anionty hydroxidu putují k anodě přes elektrolyt, kde je oxidace popsána chemickou rov. 13 [2]. Tady se anionty hydroxidu spojí s molekulami vodíku za vzniku vody a elektronů, které poté putují vnějším obvodem ke katodě a vytváří elektrickou energii. Pohyblivé ionty nejsou u AFC kladné ionty vodíku, jako u elektrolytu s kyselým roztokem či polymerní membránou, ale právě již zmíněné záporné ionty hydroxidu, jež mají opačný směr prostupu přes elektrolyt.





Obr. 14 Alkalický palivový článek [37]

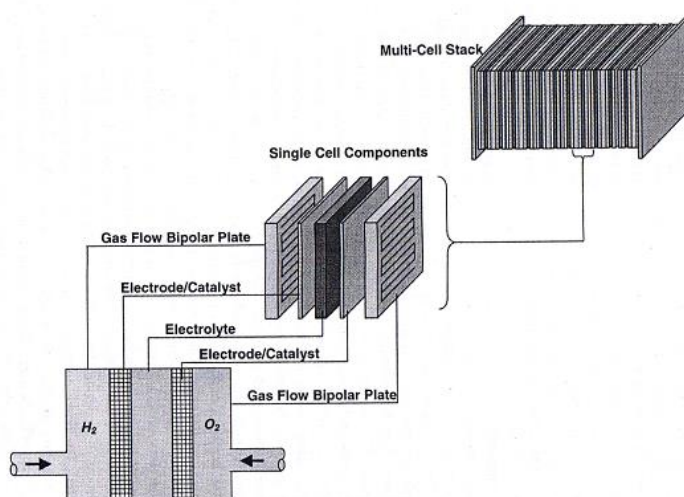
AFC není příliš vhodným typem pro použití v automobilovém průmyslu kvůli jeho nárokům na čistotu reaktantů. Největší potenciál je v již ověřených vesmírných programech, kde je potřeba zařízení, které není náchylné na sebemenší změny teplot, jako je tomu u typů PEMFC (vliv na funkci membrány) [13]. Další předností je velké množství vody, které se na anodě vytváří dvakrát rychleji, než se spotřebovává, a je odvedeno jako vedlejší produkt reakce pro případnou recyklaci nebo právě pro kosmonauty jako zdroj pitné vody [2]. Vědci se snaží stále zlepšovat alkalické články a zaměřují se i na membránové elektrolyty AAEM, které by měly zrychlit reakci redukce kyslíku na katodě a možnost využití i dalších neplatinových katalyzátorů.

2.2 PEMFC – ČLÁNKY S POLYMERNÍ MEMBRÁNOU

Dalším typem **nízkoteplotního** palivového článku je PEMFC. Tento typ pracuje při teplotách do $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ [3], neboť při překročení $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (bodu varu vody) dochází k dehydrataci polymerní membrány. Vzhledem k pozitivním vlastnostem nízkoteplotních palivových článků a necitlivosti membrány na oxid uhličitý je PEMFC článkem nejperspektivnější pro pohon vozidel v automobilovém průmyslu či jako univerzální zdroj elektrické energie s účinností článku okolo 60 % a výkonností obvykle do 250 kW [8], který generuje napětí 1,1 V [7].

Elektrolytem tohoto článku je tuhá membrána, jejíž vzhled připomíná tlustší fólii. Používá se polymerní materiál na bázi uhlíku a fluoru, k jehož řetězci je připojena kyselina sulfonová (komerční název Nafion) [2]. Tento materiál zajistí snížení nebezpečí koroze, prodloužení životnosti článku, skvělou vodivost vodíkových kationtů, elektronovou izolaci a dokáže snášet vysokou proudovou hustotu. Polymerní membrána je dost závislá na nasycení vodou. Musí se zajistit vysoká hydratace membrány z důvodu iontové vodivosti, pro snížení elektrického odporu a zachování optimální výkonnosti [27]. Sycení probíhá pomocí vody, která vzniká chemickou reakcí na katodě, a dále je podporováno zvlhčováním plynů vstupujících do FC. U PEMFC musí být zajištěno také dostatečné chlazení a vytápění, aby se palivový článek nepřehřál, případně voda uvnitř článku nezamrzla při teplotách okolí pod $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a neztratil výkon kvůli degradaci membrány [27].

Vzhledem k nízké toleranci vůči nečistotám, hlavně na oxid uhelnatý, je **palivem** v 99,9 % případů čistý vodík, což je hlavní příčinou vysokých nákladů na provoz [26]. Oproti tomu kyslík, jakožto **redukční činidlo**, může být v čisté formě či získán na katodě přímo ze vzduchu, díky již zmíněné necitlivosti membrány na CO₂.



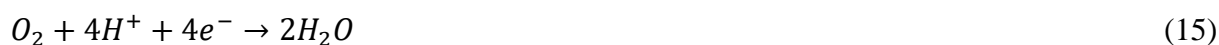
Obr. 15 Stavba palivového článku s polymerní membránou [28], Multi-Cell Stack – zásobník se svazky palivových článků, Single Cell Components – samostatný palivový článek, Gas Flow Bipolar Plate – bipolární deska s mikrokanálky pro plyn, Electrode/Catalyst – elektroda/katalyzátor, Electrolyte – elektrolyt

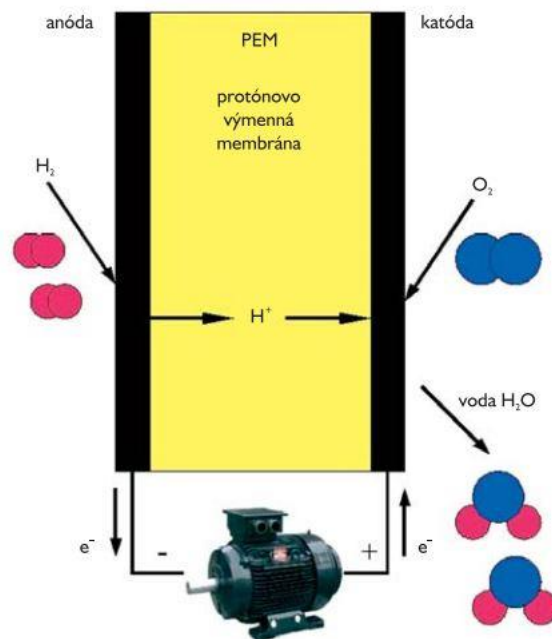
Elektrody jsou pórovité uhlíkové listy papíru (difuzní vrstva) s teflonovou ochranou proti zvlhnutí, které jsou pokryty z jedné strany platinovým katalyzátorem a z druhé strany opatřeny bipolárními deskami, jež vedou elektrický proud do vnějšího obvodu a mikrokanálky rozvádějí reakční plyny [2]. Díky nízkým pracovním teplotám a skvělé schopnosti redukovat kyslík je platina vyžadována jako katalyzátor. Ovšem přesto je oxidace na anodě rychlejší než redukce na katodě, což způsobuje snížení rychlosti reakce, ztrátu napětí článku, a hlavně možné zaplavení katody [27]. Proto je zapotřebí zajistit na kladné elektrodě vyvážené odsávání vody, jelikož je voda produkována díky nízkým teplotám ve formě kapaliny, a ne ve formě páry, a zajistit transport kyslíku přes porézní elektrodu. Při příliš vysoké rychlosti odstraňování H₂O by docházelo k vysoušení a degradaci membrány [29].

Rovnice popisující děj na anodě, kde dochází k rozkladu molekuly vodíku [2]:



Následně elektrony putují přes vnější obvod a kationty vodíku skrz polymerní membránu ke katodě, kde za přísunu kyslíku vznikají molekuly vody [2]:





Obr. 16 Princip palivového článku s polymerní membránou [9]

Díky jeho velké využitelnosti, která je ze všech typů největší, se řada výzkumníků snaží v posledních letech snížit náklady na jeho konstrukci, provoz a najít cestu ke komerčnímu využití. Nevýhodou nízkoteplotního PEMFC jsou právě ony nízké teploty. Při využití vyšších provozních teplot u palivových článků představují velký plus menší ztráty napětí, zvýšení rychlosti reakce, lepší hospodaření s teplem a vyšší tolerance elektrod na CO a možnost využití reformovaného paliva, jak již bylo zmíněno u rozdělení palivových článků. Bylo objeveno, že těchto pozitivních vlastností lze docílit použitím polybenzimidazolové (PBI) membrány, která je dopována kyselinou fosforečnou a schopna pracovat při teplotách až 200 °C [27]. Jeví se tak jako nejpravděpodobnější pro budoucí využití vysokoteplotního PEMFC. Na druhé straně i toto má svá úskalí jako vznik emisí a vyplavování kyseliny, což vede ke zničení současných materiálů součástí palivových článků [26]. Proto je ještě zapotřebí dalších výzkumů, jež se budou zaměřovat na tuto problematiku.

2.3 DMFC – ČLÁNKY PRO PŘÍMOU REAKCI METANOLU

Kvůli problémům s manipulací vodíku (skladování, přeprava, tankování) a snahou využít palivové články v automobilech, lze použít kapalný nebo plynný metanol jako přímé palivo, neboť manipulace s ním je bezpečnější a jednodušší než u vodíku. Jde o téměř totožný FC jako PEMFC, jehož konstrukce článku zůstává téměř stejná a liší se pouze v palivu. Není zapotřebí žádné reformace, metanol je přímo veden ze zásobníku k palivovému článku. Jedná se o **nízkoteplotní** zařízení, ve kterém se pracovní teplota pohybuje podle [8] od 20 do 130 °C s výkonem do 100 kW, účinnosti okolo 40 % a generovaným napětím 0,4 V [7]. Takto nízká účinnost s napětím je zapříčiněna především pomalou katalýzou oxidace metanolu na anodě, nežádoucím průchodem metanolu přes polymerní membránu, a tedy špatnou elektrokatalýzou na katodě [31].

Jediným rozdílným komponentem oproti PEMFC je anoda. Katalyzátor na záporné elektrodě je tvořen z platiny a ruthenia v poměru 1:1. Ruthenium napomáhá oxidaci uhličitých skupin (COH, COOH, CO), které vznikají při několikasupňové reakci na anodě a brání reakci metanolu na elektrodě. Díky těmto několika reakčním mezistupňům je ale oxidace metanolu pomalejší než u vodíku. [4]

Reakční směs metanolu s vodou difunduje přes porézní anodu a následně zde oxiduje. Touto reakcí vzniknou kladné náboje vodíku, které migrují na katodu, a také oxidy uhličitě, jež difundují zpět do anodových kanálů. Kromě toho dochází k nežádoucímu transportu metanolu přes polymerní membránu z anody na katodu, což způsobí reakci s přítomným kyslíkem a zapříčiní vznik dalšího CO₂ [32]. Na katodě přichází kationty vodíku reagují s kyslíkem za vzniku vody po přijetí elektronů, jež jsou odváděny ve formě páry nebo kapaliny v závislosti na pracovní teplotě. Vedlejším produktem je tedy voda s oxidem uhličitým.

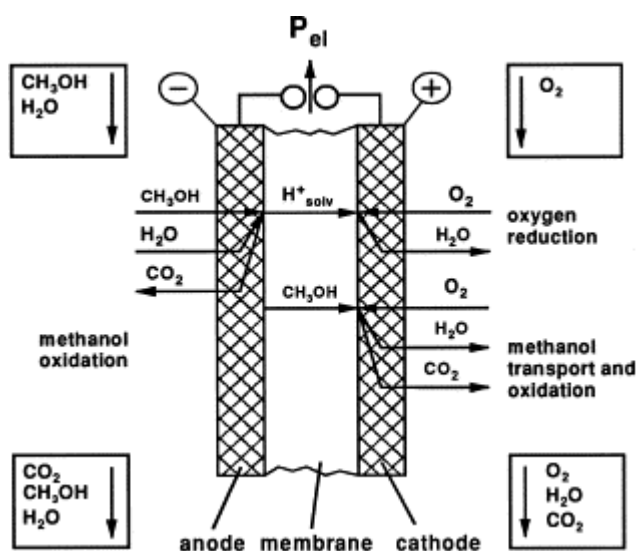
Oxidace paliva na záporné elektrodě je popsána rovnicí [1]:



Redukce kyslíku na kladné elektrodě [1]:



Výsledná reakce [1]:



Obr. 17 Článek pro přímou reakci metanolu [32]

2.4 PAFC – ČLÁNKY S KYSELINOU FOSFOREČNOU

Palivové články s kyselinou fosforečnou, vzhledem k malé iontové vodivosti při nízké teplotě, pracují v rozmezí od 150 do 220 °C [3], a řadí se tak už mezi **vysokoteplotní** typy. Teplota

zde musí být optimálně držena okolo 200 °C, neboť při poklesu teploty pod 190 °C je část vodní páry pohlcena elektrolytem a při teplotách vyšších než 210 °C dochází k rozkladu elektrolytu [2]. Obě možnosti jsou nežádoucí, mohou palivový článek poškodit a je nutné jej vybavit chladícím i ohřívacím zařízením. Uplatňují se u dopravních prostředků, v běžném životě a v elektrárnách, neboť výkonost PAFC může být v některých případech až 1 MW [7]. Jejich účinnost se pohybuje okolo 40 %, nicméně s využitím tepelné energie dosahuje přibližně 80 %. Rekuperací uvolněného tepla lze tepelnou energii přeměnit na mechanickou práci nebo elektrickou energii, a zlepšit tak účinnost systému [33]. Napětí, které tento FC vytváří, dosahuje 1,1 V [7].

Elektrolyt je 100 % kyselina fosforečná (H_3PO_4), která je obsažena v azbestové matici nebo v karbidu křemíku s přísadou teflonu [3]. Porézní matrice do určité míry zabraňuje úniku elektrolytu, ale i přesto se hladina kontroluje a popřípadě doplňuje [2]. K nevýhodám H_3PO_4 patří pomalejší uvedení do provozu, neboť do 40 °C je kyselina v tuhé fázi, a také její agresivita, mající korozivní účinky [7].

Palivem může být čistý vodík nebo některé uhlovodíky (např. metan nebo metanol) a **okysličovadlem** čistý kyslík či vzduch, jelikož elektrolyt není citlivý na oxid uhličitý [2]. Díky takto nízkým požadavkům na čistotu reakčních plynů a poměrně vysoké pracovní teplotě, která zajišťuje potřebné teplo pro endotermickou reakci reformování paliva, není potřeba dalšího zařízení pro odstranění oxidu uhelnatého a elektrodám nehrozí otrava. Teploty nad 180 °C spolu s vodní párou zajišťují posouvající reakci oxidu uhelnatého na oxid uhličitý popsanou rov. 19 [3].



Elektrody jsou tenké porézní uhlíkové destičky, na nichž je nanášena vrstva platinového katalyzátoru [2]. Platina je jediný kov, který dokáže odolávat kyselému elektrolytu H_3PO_4 a zajistit současně urychlení chemických reakcí [34].

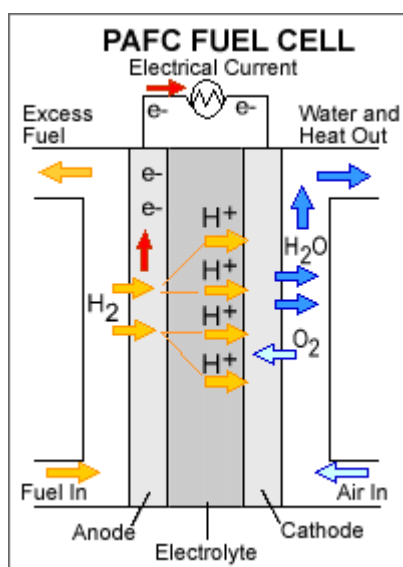
Rovnice definující oxidační reakci na anodě [3]:



Rovnice popisující děj na katodě, kde přísunem kyslíku, pohyblivých kladných iontů vodíku a elektronů, probíhá oxidace [3]:



Vzniklá voda je díky vysoké pracovní teplotě odváděna z katody ve formě vodní páry spolu se vzduchem, popřípadě při využití nepřímého paliva, je z FC odváděn i oxid uhličitý.



Obr. 18 Princip PAFC s čistými reakčními plyny [37]

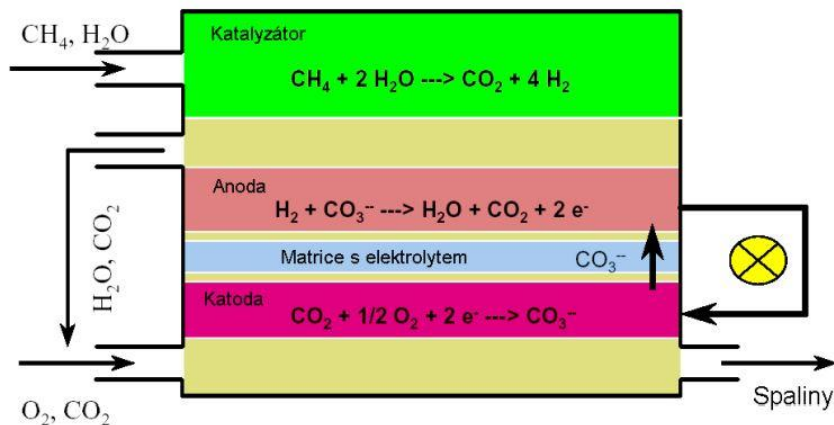
2.5 MCFC – ČLÁNKY S ROZTAVENÝMI UHLIČITANY

MCFC jsou **vysokoteplotní** články, jejichž pracovní teplota se pohybuje okolo 650 °C pro zajištění kapalného skupenství (teploty nad 500 °C) a dostatečné vodivosti uhličitanevého elektrolytu. Součástí palivového článku musí být regulátor teploty, který zajišťuje stabilní podmínky provozu článku [35]. Při nízkých teplotách zabraňuje zamrznání a při příliš vysokých zamezuje odpařování elektrolytu. Velkou výhodou tohoto typu je uvolněné teplo v palivovém článku, neboť umožňuje vnitřní reformaci a využití tepelné energie v kogeneračních jednotkách, které zvýší účinnost zařízení až na 80 % [3]. Bez využití tepelné energie se běžně pohybuje podle [8] mezi 45 až 60 %. Generované napětí palivového článku naprázdno je v rozmezí od 0,7 do 1 V [7]. Zařízení dokáže vytvořit obrovský výkon, až několik megawattů, a současně s výhodnou hospodárností při výkonnosti od několika stovek kilowattů se uplatní pouze v elektrárnách. Hlavním minusem jsou vysoké teploty, které opotřebovávají materiály vlivem koroze, snižují tak životnost zařízení a způsobují pomalé najíždění do provozu.

Elektrolytem je směs roztavených alkalických uhličitaneů fixovaná v pórovité chemicky inertní keramické matrici. Ta se skládá ze směsi oxidů lithia a hliníku (LiAlO_2). Složení elektrolytu je nejčastěji 62 % mol uhličitaneu lithného (Li_2CO_3) a 38 % mol uhličitaneu draselného (K_2CO_3). Může se měnit, neboť přidáváním lithia lze docílit vyšší vodivosti a nižších odporových ztrát vzniklých velkou tloušťkou elektrolytu, zároveň však dochází ke snížení difuze a k rychlejší korozi zejména na katodě. [6]

Při takto vysoké pracovní teplotě není zapotřebí drahých katalyzátorů z ušlechtilých kovů jako u předchozích typů palivových článků, kde se nejčastěji pro zrychlení redukce kyslíku využívala platina, a není tak kladen důraz na čistotu paliva. Proto je nejčastěji využit zemní plyn, popř. uhelný plyn, jakožto **palivo** pro fungování článku. **Okysličovadlem** přiváděným na katodu je kyslík a oxid uhličitý, který se vylučuje na anodě a při vnitřním reformování. Jde o jediný typ palivového článku, který pro správnou funkci potřebuje CO_2 .

Elektrody musí být rezistentní vůči agresivnímu prostředí a vysokým teplotám, jelikož tyto dva faktory vyvolávají korozivní účinky, čímž snižují životnost článku. Při této teplotě je reakční kinetika taková, že články nepotřebují k dosažení potřebného výkonu již zmíněné katalyzátory z ušlechtilých kovů, ale teplota není ani tak vysoká, aby vyžadovala exotické slitiny (např. zirkonium) nebo keramiku. Tím je palivový článek odolnější vůči nečistotám, odpadá otrava katalyzátorů vlivem CO a dochází ke snížení nákladů. Záporná elektroda, jež je velmi porézní, se vyrábí ze slitiny niklu (s chromem nebo hliníkem) a kladná elektroda zpravidla z oxidu nikelnatého (NiO) s příměsí lithia [4].



Obr. 19 Palivový článek s roztavenými uhličitany [6]

Reformování uvnitř palivového článku je definováno rovnicí [6]:

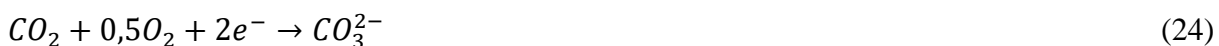


Takto vzniklé plyny oxidu uhličitého a vodíku jsou následně vedeny na elektrody (CO₂ na katodu a vodík na anodu).

Na anodě probíhají reakce [6]:

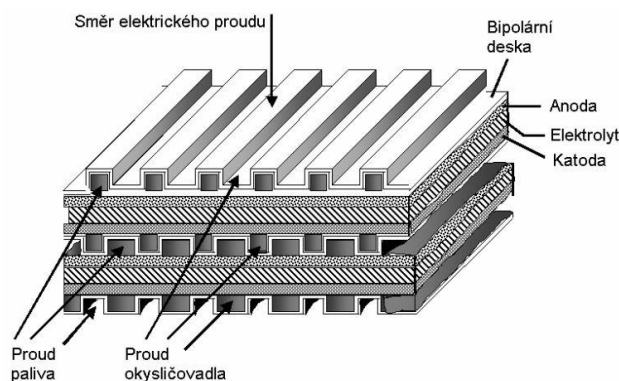


Na katodě je děj popsán rovnicí [6]:



Pohyblivými ionty jsou v elektrolytu právě takto vytvořené uhličitánové anionty (CO₃²⁻), procházející od kladné elektrody k záporné, jež reagují s vodíkem na straně anody za vzniku vodní páry a oxidu uhličitého. Část CO₂ je následně vedena zpět na katodu a druhá část odchází s vodní párou pryč z palivového článku.

MCFC nejsou zcela zelenou technologií, avšak slibují dobrou spolehlivost, menší cenovou nákladnost a vysokou účinnost. Největší potenciál použití je pro separaci CO₂ z výfukových plynů, což je velice výhodné při využívání uhlí jako hlavního fosilního paliva v elektrárnách. [35]



Obr. 20 Konstrukce MCFC [6]

2.6 SOFC – ČLÁNKY S TUHÝMI OXIDY

Jedná se o **vysokoteplotní FC** pracující při teplotách 600–1 000 °C [7]. Vysoká teplota zajišťuje výbornou vodivost kyslíkového aniontu, který prochází přes elektrolyt od katody k anodě, odpadá potřeba drahých ušlechtilých kovů na výrobu katalyzátorů a umožňuje vnitřní reformování paliva [36]. Články s tuhými oxidy jsou nejodolnější vůči všem vlivům nepřímých paliv, nehrozí u nich otrávení katalyzátorů oxidem uhelnatým ani otrava sírou. Aby nedocházelo k velkým termodynamickým ztrátám, je možné využít odpadní teplo ve formě páry, které se přivede na turbíny v elektrárnách, a vytvoří se tím další elektrická energie, která zvýší celkovou účinnost. Účinnost samotného článku se pohybuje v rozmezí 50 až 60 %, při využití kogeneračních jednotek lze docílit hodnot okolo 80–85 % [3]. SOFC je zařízení schopné vytvářet ty největší výkony (několik megawattů) a samotný palivový článek generuje napětí 0,8–1 V [7].

Elektrolytem je tuhý keramický materiál, díky kterému odpadá koroze jako u kapalných elektrolytů. SOFC využívá tuhý směs elektrolytu z oxidu zirkoničitého (ZrO_2), který je výborným vodičem aniontů kyslíku, stabilizovaného oxidem yttritým (Y_2O_3) [1]. Díky tuhému elektrolytu nejsou kladeny požadavky na tvar článku a lze jej navrhovat v různých geometrických tvarech [4]. Ovšem nevýhodou směsi je teplotní roztažnost vyvolávající teplotní pnutí a nutnost volit ostatní materiály článku s podobnou roztažností a umožňující pouze elektronovou vodivost.

Oproti MCFC nejsou **elektrody** náchylné ke korozi. Anoda je tvořena z niklu, s přísadou oxidu zirkoničitého stabilizovaného oxidem yttritým, aby se zamezilo spékání niklu. Použitý materiál pro katodu závisí na pracovní teplotě. Pro 800 až 1 000 °C je nejčastěji katoda tvořena ze slitiny lanthan-stroncium-manganitu ($LaSrMnO_3$), jež se nazývá LSM a poskytuje dobrý výkon při teplotách nad 800°C. Pro teploty od 600 do 800 °C je možné využít např. lanthan-stroncium-feritu ($LaSrFeO_3$) či další alternativní materiály, které vychází především z lanthanu a stroncia. Obě tyto elektrody jsou porézní a mají podobnou tepelnou roztažnost jako zirkoniový elektrolyt, a splňují tak hlavní podmínku tohoto typu palivového článku. [1], [36]

Redukční činidlo přiváděné na katodu je vzduch, jelikož palivový článek není citlivý ani na oxid uhličitý, nebo popř. čistý kyslík. **Palivem** může být čistý vodík, ale nejčastěji to jsou

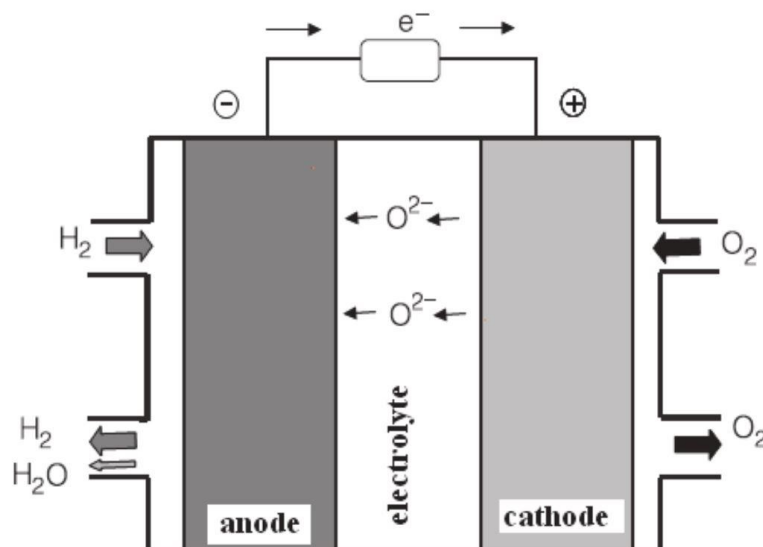
plynné látky získané vnějším reformováním z uhlí či zemního plynu. Tyto látky obvykle obsahují vodík, oxid uhelnatý a metan. Na anodě poté dochází k reakci všech těchto složek s anionty kyslíku (O^{2-}) za vzniku vody a oxidu uhličitého podle rovnic [2]:



Reakce vzniku aniontů kyslíku (O^{2-}) na katodě, které následně přebíhají skrz elektrolyt na anodu, je definována [2]:



Pohyblivé kyslíkové ionty přeskakují z katody na anodu. Děje se tak kvůli dírám v krystalické struktuře, kde chybí právě kyslíkové ionty, a elektrolyt tak umožňuje tento přechod. ZrO_2 má ke každému zirkoniovému iontu dva kyslíkové ionty. Ale v Y_2O_3 je pouze 1,5 kyslíkového iontu na každý atom yttria, a vznikají tak díry ve struktuře elektrolytu, což dovoluje pohyb kyslíkových iontů z otvoru do otvoru. [36]



Obr. 21 Palivový článek s tuhými oxidy [11]

Využití u automobilů je u tohoto typu článku nevhodné, poněvadž dlouho trvá (až 10 minut), než se článek zahřeje a dostane se na požadovanou pracovní teplotu, při které může být použit, aniž by byl poškozen. Další překážkou je také vysoká teplota, jež může způsobit poškození součástí okolo článku, a muselo by tak být zajištěno tepelné odstínění. S palivovým článkem SOFC se v budoucnu počítá jako s článkem číslo jedna pro využití v elektrárnách na výrobu elektrické energie, a to pro jeho vysokou spolehlivost i účinnost a možnost použití široké škály paliv.

2.7 SHRnutí VLASTNOSTÍ JEDNOTLIVÝCH TYPŮ PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ

Jednotlivé typy palivových článků mají své výhody i nevýhody. Avšak obecně lze říci, že vysokoteplotní FC mají celou řadu kladných vlastností a z hlediska technických parametrů i nákladů dominují nad nízkoteplotními. Jejich velkými negativy jsou dlouhá doba náběhu zařízení do provozu a častá produkce skleníkového plynu CO₂. Oproti tomu nízkoteplotní palivové články mají výhodu v rychlém rozběhu a čisté energii, díky níž je vedlejším produktem pouze voda. Na druhé straně postrádají větší rychlosti kinetiky reakcí na elektrodách, z čehož vyplývá, že dochází ke ztrátám napětí, a dále využívají cenově nákladnou platínu pro reakce na elektrodách. V Tab. 2 jsou shrnuty nejdůležitější vlastnosti, jež charakterizují jednotlivé typy.

Tab. 2 Porovnání technických parametrů a vlastností palivových článků

Typ	Nízkoteplotní			Vysokoteplotní		
	AFC	PEMFC	DMFC	PAFC	MCFC	SOFC
Pracovní teploty	Okolo 70 °C	Okolo 90 °C	20 až 130 °C	150 až 220 °C	Okolo 650 °C	600 až 1000 °C
Elektrolyt	Hydroxid draselný	Polymerní membrána	Polymerní membrána	Kyselina fosforečná	Směs uhličitánu lithného a uhličitánu draselného	Oxid zirkoničitý stabilizovaný oxidem yttritým
Palivo	Vodík	Vodík	Metanol	Vodík, reformovaná paliva	Nepřímá paliva	Vodík, nepřímá paliva
Okysličovadlo	Kyslík	Kyslík, vzduch	Kyslík, vzduch	Kyslík, vzduch	Kyslík + CO ₂	Kyslík, vzduch
Pohyblivý iont	OH ⁻	H ⁺	H ⁺	H ⁺	CO ₃ ⁻	O ²⁻
Výkonnost	Do 100 kW	Do 250 kW	Do 100 kW	Do 1 MW	Do několika MW	Do několika MW
Účinnost	60 %	60 %	40 %	40 % (85 %)	45 až 60 % (85 %)	50 až 60 % (80 %)
Generované napětí	1 V	1,1 V	0,2 až 0,4 V	1,1 V	0,7 až 1 V	0,8 až 1 V
V závorkách jsou uvedeny účinnosti s využitím tepelné energie						

Kvůli nynějším přísným normám na skleníkové plyny vydaným Evropskou unií je důležité si shrnout i vzniklé vedlejší produkty. Emise palivových článků záleží na čistotě reakčních látek. Při využití čistého vodíku a čistého kyslíku nevznikají žádné škodlivé látky, jako jsou oxid

uhličitý či oxid uhelnatý. Toho využívají především palivové články AFC, PEMFC a popřípadě PAFC. Oproti tomu nepřímá paliva využívaná u MCFC, SOFC, DMFC a PAFC mají nevýhodu, že při reakci v palivovém článku vzniká CO_2 . Avšak např. systém SOFC pracující s metanem, jakožto s palivem, produkuje oproti běžným elektrárnám využívajícím fosilní paliva dvojnásobně menší množství oxidu uhličitého a veškerý uvolněný uhlík by dokázaly v případě využití paliva ve formě zemního plynu odebrat z atmosféry rostliny pomocí fotosyntézy [36].

3 VYUŽITÍ VODÍKU V ČR

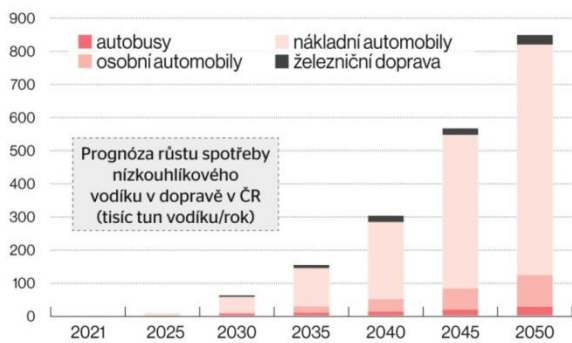
Vodík v České republice není v současné době příliš rozšířen. Nejvíce se u nás zaměřují na vodíkové technologie ve výzkumném ústavu v Řeži. Zde byl vyvinut hybridní vodíkový autobus TriHyBus, který byl v provozu mezi lety 2009 až 2014, a byla pro něj postavena čerpací stanice v Neratovicích. Po skončení provozu autobusu slouží čerpací stanice pro pohon deseti vodíkových automobilů, jež jsou v ČR registrovány a čemuž odpovídá i infrastruktura v České republice. Nyní jsou v provozu pouze dvě neveřejné čerpací stanice, jedna v již zmiňovaných Neratovicích a druhá v Řeži. Mimo jiné se výzkumný ústav zabývá ukládáním energie z fotovoltaických článků do vodíku nebo se podílí na vývoji prvního nákladního automobilu svého druhu ve spolupráci s Tatra Trucks. [38]

Jde o Tatra H2, která by měla vytvářet elektrickou energii pomocí vodíkového palivového článku a pohánět by ji měl elektromotor postavený na podvozku Tatra Force. Firma Tatra Trucks se rozhodla, že za účelem snížení emisí u nákladních vozidel se vydá cestou vodíku, poněvadž baterie nepředstavují takovou perspektivu. Je to zapříčiněno dlouhými časy nabíjení, vysokou hmotností akumulátorů, jež by snižovala přepravní výkon, a kratším dojezdem [44]. Vůz by měl pracovat v extrémních podmínkách (např. staveniště, doly, lesy), kde není příliš možné nabíjení a řidiči se střídají ve směnách 24 hodin [43]. Není tedy čas na prostoje kvůli nabíjení a je potřeba zajistit srovnatelnou dobu čerpání jako u běžných pohonných hmot pro spalovací motory. Představení tohoto vozidla se prozatím plánuje na závěr roku 2023.

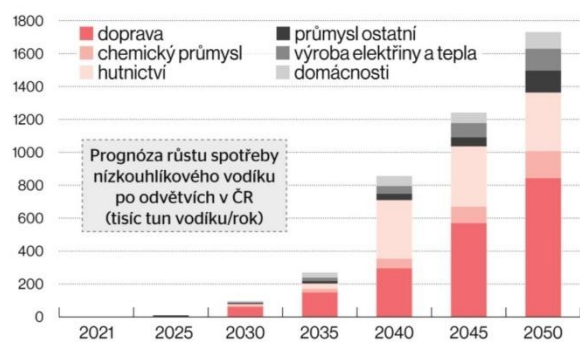


Obr. 22 Podvozek Tatra Force [43]

Minimální využití vodíku v ČR hodlá česká vláda změnit. Minulý rok schválila Vodíkovou strategii ČR, která navazuje na evropskou strategii a má zajistit snižování emisí skleníkových plynů, závislost na zemním plynu a též na ropě. Strategie je postavena na čtyřech základních pilířích, kterými jsou výroba nízkouhlíkového vodíku, jeho využití, doprava vodíku, skladování a zaměření se na další vývoj vodíkových technologií. Neočekává se, že by ČR měla být velkým producentem zeleného vodíku, ale hodlá se zaměřit na výrobu modrého vodíku, který uchovává vzniklý oxid uhličitý a jeho emise jsou tak minimální. Bezemisní vodík bude velmi pravděpodobně dovážen ze zemí, kde jsou podmínky pro jeho produkci výhodnější. Jedná se o místa s větším množstvím slunečního svitu, větru, přístupu k moři a s možností využití geotermální energie. [39]



Obr. 23 Předpověď růstu spotřeby nízkouhlíkového vodíku v dopravě v ČR [40]



Obr. 24 Předpověď růstu spotřeby nízkouhlíkového vodíku po odvětvích v ČR [40]

Nasazení vodíku je plánováno nejdříve v dopravě, kde je momentálně s přihlédnutím k ceně vodíku využití nejefektivnější, a poté v návaznosti na poklesu ceny i v energetice. V soupeření o prvenství ve vodíkové hromadné dopravě aktuálně vedou města Ústí nad Labem a Ostrava, jež si daly za cíl do roku 2023 nakoupit autobusy a postavit vodíkové čerpací stanice. Dopravní podnik města Ústí nad Labem uzavřel kontrakt s polskou společností Solaris na dodání až 20 autobusů s vodíkovými palivovými články nesoucích označení Urbino 12 [41]. Ostrava chce pět vodíkových autobusů, které budou brázdit její ulice, a současně vybudovat čerpací stanici, která by měla stát ve čtvrti Hranečnick [42].

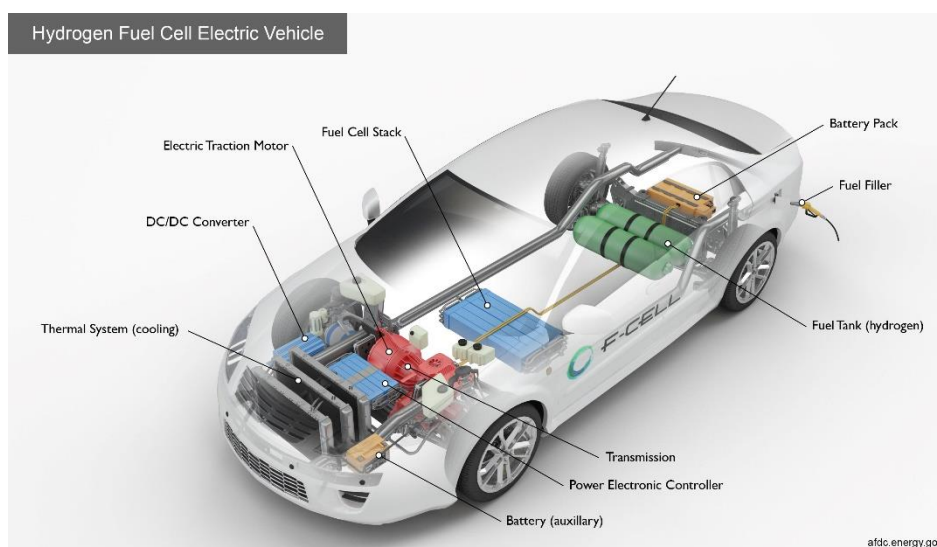
Čerpací stanice v Ústí nad Labem a v Ostravě ovšem nejsou jedinými zvažovanými místy v České republice. V současné době jsou schváleny a ve výstavbě první dvě veřejné čerpací stanice sítě Orlen Unipetrol v Praze a v Litvínově, jež by měly být otevřeny už v tomto roce. Současný velmi ambiciózní plán Česka je do deseti let vybudovat osmdesát čerpacích stanic na vodík, dále by se mělo na českých silnicích objevit 40 000 až 50 000 osobních automobilů a 870 autobusů s pohonem zajišťovaným HFC [38].

4 SOUČASNÉ VYUŽITÍ VODÍKU U ZAHRANIČNÍCH VÝROBCŮ AUTOMOBILŮ

Alternativní pohonnou látkou v automobilovém průmyslu, vůči dnešním běžným a široce rozšířeným spalovacím motorům na benzín nebo naftu, je vodík. Základní princip pohonu spočívá v převodu chemické energie vodíku na mechanickou energii, která je v automobilech realizována dvěma možnými způsoby:

- přímým spalováním vodíku v pístovém nebo rotačním spalovacím motoru,
- reakcí vodíku s kyslíkem v palivovém článku, během níž se vyrábí elektrická energie, která v automobilu pohání elektromotor (označují se FCEV – Fuel Cell Electric Vehicle).

Princip přímého spalování je podobný jako u benzínových nebo naftových motorů. Vodíkové palivo se pod vysokým tlakem vstříkuje do spalovacího prostoru nebo do sání a zapaluje se jiskrou ze zapalovací svíčky. Pro spalování vodíku touto metodou se v současnosti používají upravené vznětové pístové nebo konvekční čtyřtákní zážehové motory. Tuto metodu spalování využívala např. automobilka BMW u svých prototypových modelů BMW Hydrogen 7 a BMW H2R, nicméně v posledních letech se zdejší vývoj, a také u mnoha dalších výrobců vodíkových automobilů, přiklonil ke druhé variantě.



Obr. 25 FCEV vozidlo [61], Thermal System (cooling) – tepelný systém (chlazení), DC/DC Converter – DC/DC měnič, Electric Traction Motor – elektromotor, Fuel Cell Stack – svazek palivových článků, Battery Pack – svazek baterií, Fuel Filler – plnička paliva, Fuel Tank (hydrogen) – palivová nádrž (vodík), Transmission – převodovka, Power Electronic Controller – elektronická řídicí jednotka, Battery (auxiliary) – baterie (pomocná)

Rychlé širší rozšíření automobilů na vodíkový pohon komplikuje současná nepřipravená infrastruktura. Manipulace s vodíkem je komplikovanější, než je tomu u běžných spalovacích motorů, kde se pohonná látka přečerpává z cisteren a zásobníků do nádrže v automobilu za běžného tlaku. Vodík se musí stlačit do menšího objemu a takto se s ním dále manipuluje, což zvyšuje nároky na jeho dopravu i skladování. Proto většina evropských automobilek dává od palivových článků ruce pryč a zaměřuje se primárně u osobních vozidel na baterie, jež mají i vyšší účinnost a při běžném dojezdu 500 km podobnou hmotnost. K těm nemnoha, jež

nevyloučily vodík, náleží BMW, Land Rover, Volvo Trucks a Daimler, který chce spolu s Volvem tento pohon využít pro svá nákladní vozidla [45]. HFC jsou pro nákladní vozy prozatím nejvhodnějším alternativním pohonem. Oproti bateriím mají FCEV vozidla díky vodíku nejvyšší měrnou energii ze všech paliv, zajišťují znatelně nižší hmotnost vozidel pro dlouhé vzdálenosti a vyrovnají se tak v těchto směrech naftovým nákladním vozidlům. Kupříkladu pro ujetí vzdálenosti 1400 km by elektrické nákladní vozidlo poháněné baterií potřebovalo akumulátor o hmotnosti 25 tun a uvezlo by pouze čtyři tony nákladu [46]. To je oproti běžným naftovým tahačům, které na jednu nádrž ujedou stejnou vzdálenost a utáhnou dvacet tunový náklad, dost velký nepoměr. Samotná tíha baterie ubírá výkon elektromotoru na úkor hmotnosti nákladu. Jediní, kteří v Evropě už počítají s osobními FCEV vozidly, jež v jejich řadách budou doplňovat osobní automobily s bateriemi, jsou konstruktéři a lidé z BMW. Jde o první evropskou automobilku, která bude v malé sérii vyrábět ještě do konce letošního roku vozidlo s palivovými články, model SUV iX5 Hydrogen [47].

Nejvíce se o palivové články zajímají automobiloví výrobci z asijských zemí. Jedná se o Jižní Koreu (Hyundai) a především Japonsko (Toyota, Nissan a Honda), tato země má málo zásob fosilních paliv a katastrofa ve Fukušimě v roce 2011 přinutila Japonsko zvážit její závislost na jaderné energii [48]. Největšími průkopníky současné doby jsou v tomto směru Hyundai a Toyota, kde se mimo osobní automobily věnuje pozornost i nákladním vozům či autobusům. Jde o jediné výrobce, kteří vyrábí tyto dopravní prostředky sériově, a další kapitoly tak budou zaměřeny především na ně.

4.1 TOYOTA MIRAI II

Nejrozšířenějším osobním automobilem na vodík je nyní Toyota Mirai, které byla věnována pravděpodobně největší mediální pozornost. Tento vůz je na trhu aktuálně již ve 2. verzi (první generace jezdí od roku 2014) a v současné době je prvním oficiálně prodávaným vodíkovým vozidlem na českém trhu. Pohonné ústrojí vozu Toyota Mirai II vyrábí elektrickou energii z vodíku, kterou používá pro svůj pohon. Vedlejším produktem je pouze čistá voda, a vůz má tedy nulové CO₂ emise. Použitá technologie se nazývá TFCS (Toyota Fuel Cell System) a kombinuje hybridní pohon s palivovými články FC Stack (technologie automobilky Toyota). Při velmi pomalé jízdě (rozjezd) zajišťuje pohon pouze baterie, nicméně se zvyšující se rychlostí pohon elektromotoru přebírají palivové články. Pro dosažení maximálních výkonů je však zapotřebí zapojit oba tyto zdroje. Dobíjení baterie je poté realizováno rekuperací, kdy při zpomalení vozidla je využit elektromotor pro vytvoření potřebné elektřiny. Zajímavé na Toyotě Mirai II a všech dalších FCEV vozidlech je, že pomocí vzduchových filtrů vypouštějí do ovzduší čistší vzduch, než jaký nasávají kompresorem.

Díky novému měniči, který zvyšuje v elektročláncích napětí, mohou být oproti předchozí verzi menší rozměry elektromotoru a počet palivových článků v sadě. Celá soustava Toyota FC Stack je umístěna pod kapotou automobilu pro zvýšení počtu vysokotlakých zásobníků a správné rozložení váhy mezi přední a zadní částí. Dvě největší nádrže jsou uloženy uprostřed vozu pod podlahou a jedna menší se nachází v zadní části spolu s elektromotorem a baterií, neboť vůz je konstruován pro zadní pohon kol. Baterie poskytuje zdroj vysokého i nízkého napětí. Vysoké napětí je nutné pro pohon elektromotoru a nízké zajišťuje nastartování a napájení veškerého příslušenství ve vozidle. Dojezd na jedno natankování je

u třídy G 850 km a u třídy Z 750 km [49]. Vodíkové nádrže se dokážou naplnit za pět minut [50].



Obr. 26 Toyota Mirai II – pohonná jednotka [49]



Obr. 27 Toyota Mirai II [49]

Nádrže Toyoty Mirai II a všech FCEV vozidel uchovávají H_2 v plynném skupenství. Jsou velice bezpečně propracované a konstruktéři nejen v Toyotě, ale i u všech dalších výrobců vodíkových vozidel, si byli vědomi nástrah vodíku. Průniku vodíku přes stěny je zabráněno polymerovými vnitřními vložkami, a aby snesly vysoký tlak, jsou nádrže obaleny zesílenými uhlíkovými vlákny. Pro případ vzniku požáru nebo načerpání příliš velkého množství plynu jsou zásobníky vybaveny bezpečnostními ventily a senzory, které podle potřeby upustí přebytek H_2 , zabrání prostupu ohně do nádrže a monitorují únik vodíku. Například při srážce jsou senzory navrženy tak, aby zastavily průtok vodíku do palivových článků a jakýkoliv uniklý plyn rychle a bezpečně unikl zpět do atmosféry. [49]

Vybrané technické specifikace Toyota Mirai II [49]:

- typ palivového článku: PEMFC,
- maximální výkon palivových článků: 128 kW,
- maximální výkon baterie: 31,5 kW,
- celkový vyprodukovaný výkon: 159,5 kW,
- maximální výkon elektromotoru: 134 kW,
- počet palivových článků: 330,
- baterie: lithium-iontová (Li-ion) s kapacitou 1,2 kWh,
- počet nádrží: 3,
- plnicí tlak: 70 MPa,
- kapacita nádrží: 5,6 kg vodíku (142 l),
- maximální rychlost: 175 km/h,
- hmotnost vozidla: 1 920 kg,
- rozměry (délka × šířka × výška): 4 975 × 1 885 × 1 470 mm.

4.2 HYUNDAI NEXO

Dalším elektrickým FCEV automobilem s palivovými články je vůz automobilky Hyundai, model Nexo, který je na trhu od roku 2018. Jde též o osobní bezemisní automobil, který během jízdy vypouští pouze vodu a čistý vzduch. Hyundai se avšak rozhodl přispívat ke zlepšení životního prostředí i jinak. V kabině využívá materiály na biologické bázi a přispívá ke snížení emisí CO_2 produkovaných během výroby. Díky tomu byl výrobce oceněn

pětihvězdičkovým oceněním nezávislé organizace Green NCAP v hodnocení založeném na energetické hospodárnosti a emisích.



Obr. 28 Hyundai Nexo [51]

Tento model má rozloženy základní komponenty tak, že v přední části pod kapotou se nachází zařízení s palivovými články a také elektromotor, který pohání přední nápravu. V zadní části se nachází tři vysokotlaké zásobníky s akumulátorem. Tankování nádrží zabere pět minut a podle normy WLTP jejich kapacita vystačí k ujetí vzdálenosti 666 km [52]. Baterie u automobilů s palivovými články slouží především k dodání částečného výkonu elektromotoru, jako zdroj pro palubní systémy a pro rozehrání palivových článků na pracovní teplotu. Vůz dokáže startovat bez problémů i v hlubokých mrazech, kdy při -30 °C se provozní teploty docílí během 30 sekund [53].

Nádrže jsou vyráběny obdobně jako u vozu Toyota Mirai II, avšak kvůli uložení všech tří nádrží v zadní části vozu, Hyundai využil pomocného rámu nosiče nádrží. Ten je vyroben z vysokopevnostní oceli a poskytuje maximální ochranu kompozitních nádrží v případě nárazu zezadu [53].

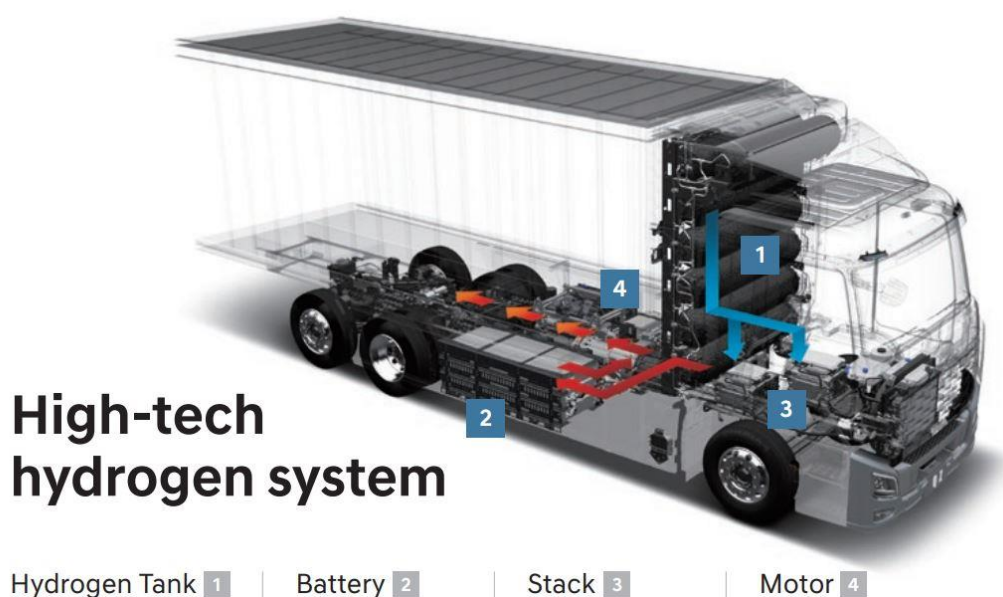
Vybrané technické specifikace Hyundai Nexo:

- typ palivového článku: PEMFC,
- maximální výkon palivových článků: 95 kW,
- maximální výkon baterie: 40 kW,
- celkový vyprodukovaný výkon: 135 kW,
- maximální výkon elektromotoru: 120 kW,
- baterie: lithium-iontová polymerová (Li-pol) s kapacitou 1,56 kWh,
- počet nádrží: 3,
- plnicí tlak: 70 MPa,
- kapacita nádrží: 6,33 kg vodíku (156 l),
- maximální rychlost: 177 km/h,
- hmotnost vozidla: 1 889 kg,
- rozměry (délka \times šířka \times výška): 4 670 \times 1 860 \times 1 630 mm.

4.3 HYUNDAI XCIENT FUEL CELL

Od roku 2020 je v prodeji první velkosériově vyráběný těžký nákladní automobil s palivovými články XCIENT Fuel Cell, jež vyrábí a prodává automobilka Hyundai. Výrobce chce podpořit úsilí o nahrazení znečišťujících naftových nákladních vozidel [54]. Automobil je nejvíce využíván ve Švýcarsku, kde je momentálně jedna z nejrozšířenějších infrastruktur pro vodík a silnice zde brázdí už 186 kusů (46 kusů staršího modelu a 140 kusů nového). V rámci svého plánu chce Hyundai v Evropě do roku 2025 uvést do provozu 1600 těchto vozidel [55]. V současné době existují dvě verze. V roce 2021 přišel výrobce s úpravou masky, zlepšením provozních vlastností a v nabídce se objevily dvě konfigurace podvozku 4×2 a 6×2. Původní model 2020 byl vyráběn pouze s pevnou karoserií 4×2.

Podle Obr. 29 lze vidět, že palivové články se nachází přímo pod sedačkou řidiče a sedm vystavěných vysokotlakých nádob od zdola až nahoru je za jeho zády. Při jejich plném natankování je nákladní vozidlo s pevnou karoserií 4×2 a s maximální možnou celkovou hmotností soupravy 38 tun schopno ujet vzdálenost 400 km a naplnění nádrží do plna trvá osm až dvacet minut v závislosti na teplotě [56]. Elektromotor s bateriemi je umístěn v zadní části automobilu, neboť Hyundai XCIENT má pohon zadních kol.



Obr. 29 Hyundai XCIENT Fuel Cell – pohonná jednotka [56]

Příští plánovaná generace vozů XCIENT Fuel Cell (termín uvedení na trh nebyl prozatím zveřejněn) bude mít nápravy s integrovanými elektromotory a dvěma systémy palivových článků s výkonem 200 kW. Výrobní plán počítá se dvěma typy nákladních vozidel a jedním typem tahače s hmotností 44 tun a dojezdem až 1000 km na jednu náplň palivových nádrží. [54]

Vybrané technické specifikace Hyundai XCIENT Fuel Cell (model 2021) [56]:

- typ palivového článku: PEMFC,
- maximální výkon palivových článků: 180 kW (2 × 90 kW),
- maximální výkon elektromotoru: 350 kW,

- baterie: lithium-iontová (Li-ion) s kapacitou 73,2 kWh (3×24 kWh),
- počet nádrží: 7,
- plnicí tlak: 35 MPa,
- kapacita nádrží: 31 kg vodíku,
- maximální rychlost: 85 km/h,
- maximální celková hmotnost vozidla bez přívěsu: typ 4×2 – 19,5 t, typ 6×2 – 27 t,
- maximální celková hmotnost soupravy s přívěsem: typ 4×2 – 38 t, typ 6×2 – 42 t,
- rozměry (délka × šířka × výška): 9 745 × 2 515 × 3 730 mm.

4.4 TOYOTA SORA

Kromě automobilů se Toyota zabývá i výrobou bezemisních autobusů s palivovými články nesoucích označení Sora. Název autobusu je akronymem výrazů vodního cyklu sky, ocean, river, air (obloha, oceán, řeka, vzduch) [57]. Jde o první autobus s palivovými články, který získal certifikaci typu vozidla v Japonsku a přišel na trh v roce 2018. Využívá komponenty z již popsané Toyoty Mirai, avšak ke svému pohonu využívá především palivové články Toyota FC Stack, zatímco pomocná baterie slouží pouze jako nouzový zdroj energie.



Obr. 30 Toyota Sora – umístění jednotlivých komponentů [58]

Umístění jednotlivých komponentů lze vidět na Obr. 30. Vysokotlaké nádrže jsou připevněny v přední části na střeše autobusu. Jejich naplnění vodíkem trvá přibližně deset minut a umožňují dojezd 200 km [59]. FC se nacházejí též na střeše autobusu, ale tentokrát v zadní části. Oproti tomu elektromotor je umístěn spolu s baterií, která je dobíjena rekuperací, v zadní části pod sedačkami cestujících.

Technologie nevyžaduje řazení jako u naftových autobusů a jízda je plynulejší, což uvítají především stojící pasažéři. Autobus dokáže sám detekovat vodící čáry a pomalu zastavit

u zastávky 3 až 6 cm od kraje a 10 cm před nebo za polohou zastávky. Tato funkce tak zjednoduší nastupování osobám tělesně postiženým a cestujícím s kočárky. Ve výbavě je také snímání okolí autobusu osmi kamerami nebo funkce, která zamezuje náhlému zrychlování, a Toyota se tak snaží vyjít cestujícím i řidiči co nejvíce vstříc. [60]

Vybrané technické specifikace Toyota Sora [60]:

- typ palivového článku: PEMFC,
- maximální výkon palivových článků: 228 kW (2×114 kW),
- maximální výkon baterie: 9 kW,
- maximální výkon elektromotoru: 226 kW (2×113 kW),
- baterie: nikel-metal hydridová (NiMH) s kapacitou 235 kWh,
- počet nádrží: 10,
- plnicí tlak: 70 MPa,
- kapacita nádrží: 600 l,
- kapacita cestujících: 78,
- rozměry (délka \times šířka \times výška): 10 525 \times 2 490 \times 3 340 mm.

4.5 SHRUTÍ SOUČASNÉHO VYUŽITÍ VODÍKU U ZAHRANIČNÍCH VÝROBCŮ AUTOMOBILŮ

Využití vodíku u zahraničních výrobců je především v palivových člancích PEMFC, které slouží jako zdroj elektrické energie pro elektromotory vozidel. Všechny FCEV automobily ani autobusy neprodukují žádné škodlivé emise, pouze vodu a teplo, které často využívají pro vyhřívání kabiny. Nicméně bez baterie se ani tento typ dopravních prostředků zcela neobejde. Jedná se o důležité zařízení, které pomáhá rozehřívát FC na pracovní teplotu, případně slouží jako sekundární či nouzový zdroj pro pohon elektromotoru. Dobíjení akumulátoru u všech typů probíhá především rekuperací při brždění nebo z palivových článků, díky čemuž není vyžadována žádná nabíječka. Výhodou pro životní prostředí je jejich schopnost čistit vzduch, jež člověk dýchá. Nasátý vzduch, než přijde do palivového článku, projde přes vzduchový filtr, následně je přiváděn na katodu, a nakonec jeho přebytek odchází v čisté formě spolu s vodou pryč výfukem. Tudiž, čím více FCEV vozidlo jezdí, tím je čistší vzduch. Doba čerpání se pohybuje podobně jako při tankování benzínu či nafty, což je oproti elektromobilům poháněným bateriemi další velké neopomenutelné plus.

K hlavním problémům vodíku patří jeho možný únik a nahromadění, tudíž je nutné u nádrží všech dopravních prostředků zajistit neustálou kontrolu a popřípadě při nárazu eliminovat tyto problémy. Proto jsou všechna FCEV vozidla opatřena potřebnými senzory a ventily, které uzavírají nádrže v případě požáru či nárazu, případně při detekci úniku H₂, plyn uniká bezpečnostním potrubím do atmosféry. Vysoká pevnost a robustnost nádob při extrémním zatížení zajišťuje odolnost např. i proti přímému zásahu střelnou zbraní a díky takto navržené konstrukci nemůže nastat jejich protržení. To podporuje i správné umístění, jež je voleno vzhledem k bezpečnosti mimo deformační zóny, a do míst, kde je konstrukce zesílena.

Základní komponenty FCEV vozidel a jejich účel:

- palivové články – primární pohon elektromotoru,
- vysokotlaké nádrže – uchovávají plynný vodík,



- elektromotor – pohání vozidlo,
- baterie – vysokonapěťový akumulátor slouží pro sekundární pohon elektromotoru, nízkonapěťový akumulátor je použit pro nastartování a napájení příslušenství vozidla,
- měnič – zvyšuje generované napětí z palivových článků,
- kompresor – nasává vzduch,
- tepelný systém – udržuje správné teploty v palivových člancích.

ZÁVĚR

Problematika vodíkových palivových článků není úplně novodobá záležitost. Výrobci dopravních prostředků zkouší uvést tuto technologii do provozu už posledních 15 let. Nicméně dříve se jí nevěnovala taková pozornost, ale s příchodem zelené energie a snahou omezit skleníkové plyny v atmosféře se současný stav změnil.

Jde o jednoduché elektrochemické zařízení, které přeměňuje vnitřní energii paliva na energii elektrickou a pohání zpravidla elektromotor. Aby palivové články mohly pohánět i vytvářet dostatečné množství energie, je zapotřebí řadit toto zařízení do svazků. Jejich slabou stránkou je ovšem palivo (vodík), jež se na planetě Zemi téměř nenachází v čisté formě, ale nejčastěji ve sloučeninách, a je proto zapotřebí ho z nich extrahovat. Nyní se nejčastěji získává reformací ze zemního plynu, avšak do budoucna je potřeba vodík získávat především elektrolýzou z vody, která za sebou nezanechává žádné škodlivé emise, využívat k tomu především solární panely, geotermální energie, větrné a vodní elektrárny. Popřípadě při výrobě vodíku ze zemního plynu zachytávat CO₂ pomocí zařízení CCS a CCU, jež oxid uhličitý trvale uloží, případně se použije pro hodnotnější produkty. Účinnost jednotlivých typů palivových článků se pohybuje okolo 60 %, avšak u vysokoteplotních typů lze díky využití tepelné energie v kogeneračních jednotkách dosáhnout až 90 %, což slibuje dostatečně kvalitní náhradu za konvenční spalovací motory a zdroje energie v tepelných elektrárnách.

HFC lze rozdělit do dvou typů podle teploty (na nízkoteplotní a vysokoteplotní) a dále také podle použitého materiálu elektrolytu na pět druhů. Díky takto širokému spektru lze dosáhnout různorodého využití. Každý druh pracuje při odlišných teplotách a je určen pro jiné výkony. Nízkoteplotní články dokážou pokrýt celý rozsah potřebných výkonů, a to od autíčka na ovládání přes osobní vozidla, nákladní automobily, letadla až po lodě. Vysokoteplotní druhy umožní vyrábět elektrickou energii v elektrárnách. Těmito způsoby lze eliminovat skleníkové plyny, především ve formě uhlíkových a dusíkových oxidů, které se v atmosféře nacházejí, a snížit tak závislost na fosilních palivech. Nízkoteplotní FC nevytváří žádné škodlivé emise a vysokoteplotní nízké množství, jež by mělo být odebíráno z ovzduší fotosyntézou rostlin.

Využívání vodíku v ČR není téměř vůbec rozšířeno. Už vzhledem k válce na Ukrajině a agresí Ruska je zapotřebí více investovat do vodíkové infrastruktury, a stát se tak nezávislým na ropě a plynu, který je do Česka dodáván především z Ruska. Je zapotřebí zajistit u nás výrobu nízkouhlíkového modrého vodíku a v malé míře i zeleného. Získání vodíku bez emisí je v ČR poměrně problematické, neboť umístění České republiky není příliš ideální a nepanují zde podmínky, které by zaručily stálou výrobu zeleného vodíku. Zavedení H₂ do dopravy bude tím nejlepším začátkem, už z hlediska efektivity, jež přinese snížení cen a možné budování elektráren s vodíkovými palivovými články.

Kvůli nutnosti vybudování nové infrastruktury pro vodík, složité manipulaci s ním a nižší účinnosti systému oproti elektromobilům s bateriemi, nebudou v budoucnu pravděpodobně FC využívány v tak hojném množství u osobních automobilů. Nicméně vodíkové palivové články mohou být tou správnou nízkoemisní technologií pro některé průmyslové procesy nebo těžko elektrifikovatelné dopravní segmenty, jako jsou lodě, letadla či nákladní vozidla. Hlavním důvodem jsou příliš těžké baterie, které v důsledku své značné hmotnosti odebírají výkon elektromotoru, snižují tak rapidně přepravní hmotnost a zvyšují hmotnost celého dopravního prostředku. Oproti tomu vodík má nejvyšší hustotu energie ze všech paliv, která se projeví výrazně na hmotnosti u prostředků vyžadujících dlouhé cestovní vzdálenosti.

Obrovským plusem je i rychlost naplnění nádrží palivem, jež se pohybuje obdobně jako u dopravních prostředků poháněných benzínem či naftou. Největšími propagátory FCEV vozidel jsou automobilky Toyota a Hyundai, jež ušly už dlouhou cestu v této technologii a začali sériově vyrábět jak osobní automobily, tak i nákladní vozy či autobusy. Používají především palivové články typu PEMFC, které jsou díky nejlepším vlastnostem v oblasti tohoto použití tím nejlepším kandidátem.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] KAMEŠ, Josef. *Alternativní pohon automobilů*. Praha: BEN – technická literatura, 2004. ISBN 80-7300-127-6.
- [2] VLK, František. *Alternativní pohony motorových vozidel*. Brno: František Vlk, 2004. ISBN 80-239-1602-5.
- [3] ŠULC, Jaroslav. *Obnovitelné zdroje energie*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní, KEZ, 2015. ISBN 978-80-7494-235-8.
- [4] HROMÁDKO, Jan. *Speciální spalovací motory a alternativní pohony: komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol*. Praha: Grada Publishing, 2012, 160 s. ISBN 978-80-247-4455-1.
- [5] MIŠÁK, Stanislav. *Vybrané typy zdrojů elektrické energie*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2010, 228 s. ISBN 978-80-248-2168-9.
- [6] PORŠ, Zdeněk. *Palivové články* [online]. ÚJV Řež, 2002 [cit. 2022-02-02]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/palivove-clanky.pdf>
- [7] BIROŠ, Milan a František ĎUROVSKÝ. *Technológia palivových článkov v automobilech*. *Elektrotechnické list* [online]. 2016, 1(2) [cit. 2022-03-22]. ISSN 2453-8981. Dostupné z: http://elektrotechnickelisty.eu/casopis/rocnik_I/clanky/EL_16_2016.pdf
- [8] KŘEPINSKÝ, Josef, Vladimír CIVÍN, Miroslav BLEHA, Jana ČEJKOVÁ, Miroslav MALÝ a Jaroslav VÍCH. *Palivové články* [online]. 2003 [cit. 2022-03-22]. Dostupné z: <https://www.mpo-efekt.cz/dokument/3111.pdf>. Závěrečná zpráva. Česká energetická agentura. Vedoucí práce Antonín Český.
- [9] PETRÁŠ, Branislav a Tomáš BRESTOVIČ. *Palivový článok – zdroj energie*. *AT&P journal* [online]. 2007 [cit. 2022-03-22]. Dostupné z: <https://www.atpjournal.sk/buxus/docs/online61.pdf>
- [10] *Obnovitelné zdroje: Co je to palivový článek*. *TŘÍPÓL* [online]. 2003 [cit. 2022-03-22]. Dostupné z: <https://www.3pol.cz/cz/rubriky/obnovitelne-zdroje/1084-co-je-to-palivovy-clanek>
- [11] MATENCIO, Tulio. *Ceramic Materials for Solid Oxide Fuel Cells*. *ResearchGate* [online]. 2011 [cit. 2022-03-22]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-a-solid-oxide-fuel-cell-SOFC_fig1_300910216
- [12] *Alkaline fuel cell*. *FuelCellsWorks* [online]. [cit. 2022-03-22]. Dostupné z: <https://fuelcellsworks.com/knowledge/technologies/afc/>
- [13] *AFC vs. PEM Fuel Cell Technologies*. *GENCELL* [online]. [cit. 2022-03-22]. Dostupné z: <https://www.gencellenergy.com/news/afc-vs-pem/>

- [14] SHAHAN, Zachary. Chart: Why Battery Electric Vehicles Beat Hydrogen Electric Vehicles Without Breaking A Sweat. *CleanTechnica* [online]. 2021 [cit. 2022-03-22]. Dostupné z: <https://cleantechnica.com/2021/02/01/chart-why-battery-electric-vehicles-beat-hydrogen-electric-vehicles-without-breaking-a-sweat/>
- [15] Hydrogen colours codes. *H2 Bulletin* [online]. [cit. 2022-03-23]. Dostupné z: <https://www.h2bulletin.com/knowledge/hydrogen-colours-codes/>
- [16] Hydrogen Production: Natural Gas Reforming. *ENERGY.GOV* [online]. [cit. 2022-03-02]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-natural-gas-reforming>
- [17] Hydrogen Production: Thermochemical Water Splitting. *ENERGY.GOV* [online]. [cit. 2022-03-02]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-thermochemical-water-splitting>
- [18] SYLIZER – další významný krok vpřed v rozvoji vodíkové energetiky. *VISIONS* [online]. 2020 [cit. 2022-03-02]. Dostupné z: <https://www.visionsmag.cz/sylizer-dalsi-vyznamny-krok-vpred-v-rozvoji-vodikove-energetiky>
- [19] Hydrogen Production: Photobiological. *ENERGY.GOV* [online]. [cit. 2022-03-02]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-photobiological>
- [20] DROBNÝ, Josef. Bezpečnost manipulace s vodíkem. *HydroRACE4schools* [online]. 2019 [cit. 2022-03-03]. Dostupné z: <https://hydro-race.eu/Bezpe%C4%8Dnost-manipulace-s-vod%C3%ADkem>
- [21] UDDIN, M. N., V. V. NAGESHKAR a R. ASMATULU. Improving water-splitting efficiency of water electrolysis process via highly conductive nanomaterials at lower voltages. *Energy Ecology and Environment* 5 [online]. 2020, 2 [cit. 2022-03-03]. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1007/s40974-020-00147-5](https://doi.org/10.1007/s40974-020-00147-5)
- [22] ANDERSSON, Joakim a Stefan GRÖNKVIST. Large-scale storage of hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2019, 44(23), 11901-11919 [cit. 2022-03-03]. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.063](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.063)
- [23] RAO, Arvind Gangoli, Feijia YIN a Henri G.C. WERIJ. Energy Transition in Aviation: The Role of Cryogenic Fuels. *Aerospace* [online]. 2020, 12(7) [cit. 2022-04-17]. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.3390/aerospace7120181](https://doi.org/10.3390/aerospace7120181).
- [24] Hydrogen Storage. *Vskills Certification* [online]. [cit. 2022-03-03]. Dostupné z: <https://www.vskills.in/certification/tutorial/hydrogen-storage/>
- [25] DROBNÝ, Josef. Skladování vodíku. *HydroRACE4schools* [online]. 2019 [cit. 2022-03-04]. Dostupné z: <https://www.hydro-race.eu/Skladov%C3%A1n%C3%AD-vod%C3%ADku>
- [26] CHANDAN, Amrit, Mariska HATTENBERGER, Ahmad EL-KHAROUF, et al. High temperature (HT) polymer electrolyte membrane fuel cells (PEMFC) – A review. *Journal of Power Sources* [online]. 2013, 231, 264-278 [cit. 2022-03-09]. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.11.126](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.11.126)

- [27] ROSLI, R.E., A.B. SULONG, W.R.W. DAUD, M.A. ZULKIFLEY, T. HUSAINI, M.I. ROSLI, E.H. MAJLAN a M.A. HAQUE. A review of high-temperature proton exchange membrane fuel cell (HT-PEMFC) system. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2017, **42**(14), 9293-9314 [cit. 2022-03-09]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.06.211>
- [28] BAKER, Ryan a JiuJun ZHANG. PROTON EXCHANGE MEMBRANE or POLYMER ELECTROLYTE MEMBRANE (PEM) FUEL CELLS. *The Electrochemical Society: Electrochemistry Encyclopedia* [online]. Vancouver: Institute for Fuel Cell Innovation, 2011 [cit. 2022-03-09]. Dostupné z: <https://knowledge.electrochem.org/encycl/art-f04-fuel-cells-pem.htm>
- [29] MASON, Thomas J., Jason MILLICHAMP, Tobias P. NEVILLE, Paul R. SHEARING, Stefaan SIMONS a Daniel J.L. BRETT. A study of the effect of water management and electrode flooding on the dimensional change of polymer electrolyte fuel cells. *Journal of Power Sources* [online]. 2013, **242**, 70-77 [cit. 2022-03-09]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.05.045>
- [30] FERRIDAY, T.B. a Peter H. MIDDLETON. Alkaline fuel cell technology - A review. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2021, **46**(35), 18489-18510 [cit. 2022-03-10]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.02.203>
- [31] LIU, Hansan, Chaojie SONG, Lei ZHANG, JiuJun ZHANG, Haijiang WANG a David P. WILKINSON. A review of anode catalysis in the direct methanol fuel cell. *Journal of Power Sources* [online]. 2006, **155**(2), 95-110 [cit. 2022-03-10]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.01.030>
- [32] DOHLE, H., J. DIVISEK a R. JUNG. Process engineering of the direct methanol fuel cell. *Journal of Power Sources* [online]. 2000, **86**(1-2), 469-477 [cit. 2022-03-10]. Dostupné z: doi:[https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(99\)00456-5](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(99)00456-5)
- [33] WILAILAK, Supaporn, Jae-Hyeon YANG, Chul-Gu HEO, Kyung-Su KIM, Se-Kyung BANG, In-Ho SEO, Umer ZAHID a Chul-Jin LEE. Thermo-economic analysis of Phosphoric Acid Fuel-Cell (PAFC) integrated with Organic Ranking Cycle (ORC). *Energy* [online]. 2021, **220**, 119744 [cit. 2022-03-10]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119744>
- [34] PATEL, Prachi. A Better Platinum Catalyst for Fuel Cells. *MIT Technology Review* [online]. 2010 [cit. 2022-03-10]. Dostupné z: <https://www.technologyreview.com/2010/05/05/203948/a-better-platinum-catalyst-for-fuel-cells/>
- [35] TOMCZYK, Piotr. MCFC versus other fuel cells—Characteristics, technologies and prospects. *Journal of Power Sources* [online]. 2006, **160**(2), 858-862 [cit. 2022-03-11]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.04.071>
- [36] STAMBOULI, A. Boudghene a E. TRAVERSA. Solid oxide fuel cells (SOFCs): a review of an environmentally clean and efficient source of energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2002, **6**(5), 433-455 [cit. 2022-03-21]. Dostupné z: doi:[https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(02\)00014-X](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(02)00014-X)

- [37] VAGHARI, Hamideh, Hoda JAFARIZADEH, Aydin BERENJIAN a Navideh ANARJAN. Recent Advances in Application of Chitosan in Fuel Cells. *ResearchGate* [online]. 2013 [cit. 2022-03-23]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-representation-of-an-alkaline-fuel-cell-AFC-2_fig2_268811074
- [38] Plyn budoucnosti. Jak daleko je Česko na cestě k jeho využití?. *Ekolist.cz* [online]. Praha, 2021 [cit. 2022-03-22]. Dostupné z: <https://ekolist.cz/cz/zpravodajstvi/zpravy/vodik-v-cesku.jak-daleko-jsme-na-cestech-k-vyuziti-plynu-budoucnosti>
- [39] Vodíková strategie ČR schválena vládou. *Ministerstvo průmyslu a obchodu* [online]. 2021 [cit. 2022-03-22]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/cz/prumysl/strategie-projekty/vodikova-strategie-cr-schvalena-vladou--262590/>
- [40] NOVOTNÝ, Radek. Česko na vodíku. Startuje byznys kolem paliva budoucnosti. *Ekonom* [online]. 2021 [cit. 2022-03-24]. Dostupné z: <https://ekonom.cz/c1-66998030-cesko-na-vodiku-startuje-byznys-kolem-paliva-budoucnosti>
- [41] V Ústí nad Labem budou jezdit Solaris Urbina na vodík. *BUSportál* [online]. 2021 [cit. 2022-03-24]. Dostupné z: <https://www.busportal.cz/clanek/v-usti-nad-labem-budou-jezdit-solaris-urbina-na-vodik-17734>
- [42] VODÍKOVÉ AUTOBUSY VYJEDOU DO OSTRAVSKÝCH ULIC UŽ PŘÍŠTÍ ROK. *Magistrát města Ostravy* [online]. 2022 [cit. 2022-03-24]. Dostupné z: <https://www.ostrava.cz/cs/o-meste/aktualne/vodikove-autobusy-vyjedou-do-ostravskych-ulic-uz-pristi-rok>
- [43] Vodíkový nákladák Tatra vyjede v roce 2023. *HYBRID.CZ* [online]. 2021 [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: <https://www.hybrid.cz/vodikovy-nakladak-tatra-vyjede-v-roce-2023/>
- [44] TOMÍŠEK, Marek. Vodíková Tatra bude až 50tunový obr do lomů a drsných podmínek. *Fdrive.cz* [online]. 2021 [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: <https://fdrive.cz/clanky/vodikova-tatra-bude-az-50tunovy-obr-do-lomu-a-drsnych-podminek-vyjede-pristi-rok-7805>
- [45] CAREY, Nick. German auto giants place their bets on hydrogen cars. *Reuters* [online]. 2021 [cit. 2022-04-04]. Dostupné z: <https://www.reuters.com/technology/german-auto-giants-place-their-bets-hydrogen-cars-2021-09-22/>
- [46] Konec benzínových a naftových automobilů?. *TRÍPÓL* [online]. 2018 [cit. 2022-04-05]. Dostupné z: <https://www.3pol.cz/cz/rubriky/bez-zarazeni/2158-konec-benzinovych-a-naftovych-automobilu>
- [47] BMW iX5 HYDROGEN DEFIES THE EXTREME COLD. *BMW GROUP* [online]. 2022 [cit. 2022-04-04]. Dostupné z: <https://www.bmwgroup.com/en/news/general/2022/bmw-ix5-hydrogen.html>
- [48] LEA, Robert. Expanding Hydrogen Fuel Cell Technology for a Greener Car Industry. *AZO Materials* [online]. 2020 [cit. 2022-04-04]. Dostupné z: <https://www.azom.com/news.aspx?newsID=55210>

- [49] Toyota Launches the New Mirai: A premium car that customers will truly want, achieved in an FCEV. *TOYOTA MOTOR CORPORATION* [online]. 2020 [cit. 2022-04-01]. Dostupné z: <https://global.toyota/en/newsroom/toyota/33558148.html>
- [50] Projeli jsme v Česku vodíkovou Toyotu Mirai 2. *Fdrive.cz* [online]. 2021 [cit. 2022-04-01]. Dostupné z: <https://fdrive.cz/clanky/test-projeli-jsme-v-cesku-vodikovou-toyotu-mirai-2-prvni-jizdni-dojmy-7964>
- [51] NOVÁ, Eliška. Jak zabít dvě mouchy jednou ranou. Hyundai chce pro pohon svých aut vyrábět vodík z plastového odpadu. *CzechCrunch* [online]. 2022 [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://cc.cz/jak-zabit-dve-mouchy-jednou-ranou-hyundai-chce-vyrabet-vodik-pro-pohon-svych-aut-z-plastoveho-odpadu/>
- [52] DITTRICH, Lukáš. HYUNDAI NEXO – Vodík podruhé. *Automotorevue* [online]. 2018 [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: https://www.automobilrevue.cz/rubriky/clanky/technika/hyundai-nexo-vodik-podruhe_46600.html
- [53] NEXO: Hyundai's hydrogen fuel-cell first. *Hyundai Motor Company* [online]. 2021 [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: https://www.hyundai.com/au/en/news/vehicles/nexo-hyundai-hydrogen-fuel-cell-first?fbclid=IwAR34jYQRZFaKNbm77fch7dUVXbNgmV-t7RW65FwFFxICi7Cm_F4Kquhvoyk
- [54] Nákladní Hyundai XCIENT Fuel Cell. *Trucker* [online]. 2020 [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: https://www.trucker.cz/rubriky/truck/nakladni-hyundai-xcient-fuel-cell_47595.html
- [55] Hyundai Motor v rámci expanze vylepšuje design a provozní vlastnosti modelu XCIENT Fuel Cell Truck. *AUTO-HOREJSEK* [online]. 2021 [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://www.auto-horejsek.cz/hyundai-motor-vylepsuje-model-xcient-fuel-cell-truck>
- [56] XCIENT Fuel Cell. *Hyundai Motor Company* [online]. 2022 [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: https://trucknbus.hyundai.com/hydrogen/ko/download/catalog_xcient-fuel-cell_en.pdf
- [57] Toyota posílá na silnice sériovou verzi vodíkového autobusu Sora. *Autosalon.tv* [online]. 2018 [cit. 2022-05-03]. Dostupné z: <https://www.autosalon.tv/novinky/archiv/toyota-posila-na-silnice-seriovou-verzi-vodikoveho-autobusu-sora>
- [58] Toyota Sora Fuel Cell bus gets more safety and communication tech. *Autodevot* [online]. 2019 [cit. 2022-05-03]. Dostupné z: <https://www.autodevot.com/2019/08/toyota-sora-fuel-cell-bus-gets-more-safety-tech/>
- [59] Toyota spustila výrobu autobusů Sora s palivovými články. *AUTO.CZ* [online]. 2018 [cit. 2022-05-03]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/toyota-spustila-vyrobu-autobusu-sora-s-palivovymi-clanky-121737>
- [60] Toyota Unveils FC Bus Concept "Sora." *TOYOTA MOTOR CORPORATION* [online]. 2017 [cit. 2022-05-03]. Dostupné z: <https://global.toyota/en/detail/19063778>

- [61] How Do Fuel Cell Electric Vehicles Work Using Hydrogen?. ENERGY.GOV [online]. [cit. 2022-05-17]. Dostupné z: <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-fuel-cell-electric-cars-wor>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

HFC	Vodíkové palivové články (Hydrogen Fuel Cells)
FC	Palivové články (Fuel Cells)
CCS	Zachytávání a ukládání oxidu uhličitého (Carbon Capture and Storage)
CCU	Zachytávání a využití oxidu uhličitého (Carbon Capture and Use)
AFC	Alkalický palivový článek
PEMFC	Palivové články s polymerní membránou
DMFC	Palivové články pro přímou reakci metanolu
PAFC	Palivové články s kyselinou fosforečnou
MCFC	Palivové články s roztavenými uhličitany
SOFC	Palivové články s tuhými oxidy
AAEM	Alkalická aniontová výměnná membrána
FCEV	Elektrické vozidlo s palivovými články (Fuel Cell Electric Vehicle)
$\eta_{\text{článku}}$ [-]	Elektrochemická účinnost palivového článku
V_{skut} [V]	Skutečná generovaná hodnota napětí palivovým článkem
$\varepsilon_{\text{článku}}$ [V]	Teoretická generovaná hodnota napětí palivovým článkem