



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

VODÍKOVÉ TECHNOLOGIE PRO EKOLOGICKÉ ENERGETICKÉ HOSPODÁŘSTVÍ V DOPRAVĚ

HYDROGEN TECHNOLOGY AS A CLEAN ENERGY SOLUTION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Vojtěch Pavliska

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ján Poláčik

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: Vojtěch Pavliska
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: Ing. Ján Poláček
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.1111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Vodíkové technologie pro ekologické energetické hospodářství v dopravě

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedním z nejzávažnějších faktorů ovlivňujících čistotu životního prostředí je energetický průmysl. Proto je snaha o využívání co nejčistších zdrojů s minimálním dopadem na ekologii. Vodík je vhodný nejen pro svou vysokou výhřevnost a energetickou hustotu, ale také proto, že jediným produktem jeho spalování je vodní pára.

Účelem práce bude popsat vodík jako bezemisný nosič energie, vodíkové hospodářství, využití vodíku v praktických oblastech energetiky se zaměřením na hromadnou přepravu osob. V praktické části bude práce porovnávat ekonomickou náročnost a ekologický dopad vodíkového vozidla s vozidly se spalovacím motorem.

Cíle bakalářské práce:

1. Rešerše zaměřená na popis vlastností vodíku, výhody jeho využití v energetice, současné způsoby výroby a skladování.
2. Popis aplikace palivového článku jako zdroje energie pro vozidla hromadné dopravy.
3. Praktická část porovnáající ekologické a ekonomické aspekty vodíkových a ostatních vozidel hromadné dopravy.

Seznam doporučené literatury:

GUPTA, R. Hydrogen fuel: production, transport, and storage. Boca Raton: CRC Press, c2009. ISBN 9781420045758

KAMEŠ, J. Vodík - alternativní palivo. Praha: CVUT, 2008. 283 s. ISBN 978-80-254-1686-0

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Postupný přechod k obnovitelným zdrojům energie je jednou z hlavních věcí, které musí lidstvo v současné době řešit. Nejedná se pouze o výrobu elektrické energie, ale také o dopravní prostředky. Znečištění ovzduší ve větších městech je z velké většiny způsobeno automobilovou dopravou, která je zároveň zodpovědná za nemalé procento produkce skleníkových plynů. Z těchto důvodů je zásadní hledat šetrnější a udržitelnější způsoby pohonu motorových vozidel. Průmyslově vyráběný vodík je jednou ze slibných variant náhrady fosilních paliv. Tato práce popisuje aplikaci vodíkových technologií pro autobusy městské hromadné dopravy. Přináší ukázky některých existujících vozidel a jejich srovnání s běžně používanými druhy hromadné dopravy.

Klíčová slova

Vodík, palivový článek, vodíkový autobus, alternativní energie, ekologická doprava

ABSTRACT

Gradual transition towards renewable sources of energy should be one of the main concerns of today's society. This does not only concern the production of electricity but also automotive industry. Transportation is the main cause of air pollution in bigger cities and is also responsible for a solid percentage of green-house gases production. For these reasons, it is key to seek more sustainable and eco-friendly ways of motorized vehicles propulsion. Artificially produced hydrogen is one of the more promising alternatives to fossil fuels. This thesis describes the application of fuel cell technology for city busses. It presents some existing examples of hydrogen busses and their comparison with common means of mass transportation.

Key words

Hydrogen, fuel cell, hydrogen bus, alternative energy, eco-friendly transportation

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PAVLISKA, V. *Vodíkové technologie pro ekologické energetické hospodářství v dopravě*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 57 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Ján Poláček.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Vodíkové technologie pro ekologické energetické hospodářství v dopravě** vypracoval(a) samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Jánmu Poláčikovi za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování bakalářské práce. Zároveň děkuji svým rodičům za podporu během celého studia.

OBSAH

ÚVOD.....	11
1 Vodík	13
1.1 Vlastnosti vodíku	13
1.2 Výroba vodíku	14
1.2.1 Parní reformace	14
1.2.2 Parciální oxidace	15
1.2.3 Elektrolýza	16
1.2.4 Vysokoteplotní elektrolýza	17
1.2.5 Termochemické štěpení vody.....	17
1.2.6 Výroba vodíku z biomasy	18
1.3 Skladování a transport	19
1.3.1 Skladování vodíku v plynném skupenství.....	19
1.3.2 Skladování vodíku v kapalném skupenství	20
1.3.3 Alternativní způsoby skladování vodíku.....	20
1.3.4 Transport vodíku	21
1.4 Využití vodíku jako nosiče energie	21
2 Palivový článek	22
2.1 Historie.....	22
2.2 Princip	23
2.3 Výhody palivového článku	24
2.4 Typy palivových článků.....	25
2.4.1 Palivový článek polymer – elektrolyt (PEMFC).....	25
2.4.2 Alkalický palivový článek (AFC)	26
2.4.3 Palivový článek s kyselinou fosforečnou (PAFC)	26
2.4.4 Palivový článek s roztavenými uhlíčitany (MCFC).....	26
2.4.5 Palivový článek s tuhými oxidy (ITSOFC).....	26
2.4.6 Palivový článek s tuhými oxidy – trubkový (TSOFC).....	26
3 Použití palivových článků	28
3.1 Stacionární zdroje energie.....	28
3.2 Přenosné aplikace	28
3.3 Záložní zdroje energie	29
3.4 Autobusy, užitková a další vozidla	29
3.5 Osobní automobily.....	29

3.6	Letectví.....	30
3.7	Lodní doprava.....	31
4	Autobus na vodíkový pohon	33
4.1	Pohon.....	33
4.1.1	Architektura pohonného systému	34
4.2	Skladování paliva ve vozidle.....	35
4.3	Čerpací stanice	35
4.3.1	Stanice s dodávkou vodíku	35
4.3.2	Stanice s vlastní produkcí	36
4.3.3	Čerpací stanice ve světě.....	36
4.4	TriHyBus	36
4.4.1	Tankování paliva	37
4.4.2	Technické parametry	37
4.5	Toyota SORA	38
4.5.1	Technické parametry	38
5	Porovnání pohonných systémů městských autobusů	39
5.1	Ekonomické porovnání.....	39
5.1.1	Pořizovací náklady.....	39
5.1.2	Provozní náklady	41
5.2	Ekologický dopad.....	42
5.3	Modelový příklad města Brna	44
5.3.1	Ekonomické hledisko.....	44
5.3.2	Ekologické hledisko.....	46
	ZÁVĚR	48
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	49
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	55
	SEZNAM OBRÁZKŮ	56
	SEZNAM TABULEK.....	57

ÚVOD

V moderním světě existuje mnoho problémů a rizik, kterým je lidstvo nuceno čelit. Globální populace roste, a s ní i dopad, který má na životní prostředí. Dva z nejpálčivějších environmentálních problémů jsou globální oteplování a znečištění ovzduší, přičemž doprava má nezanedbatelný vliv na oba z nich. Globální oteplování zvyšuje celosvětově teplotu zemského povrchu, což má za následek nejen úbytek orné půdy, ale dochází rovněž k tání ledovců, a tím k ohrožení nespočtu živočišných druhů, pro které jsou ledové oblasti přirozeným prostředím. Znečištění ovzduší, nejcitelnější ve velkých městech, má negativní vliv na zdraví jejich obyvatel a kvalitu života obecně.

Většina zemí si dnes dobře uvědomuje, že naše závislost na fosilních palivech je stále vysoká a zcela určitě neudržitelná. Neustále se zvyšující poptávka po energetických zdrojích a snižující se dostupnost cenově přijatelných fosilních paliv jasně ukazuje potřebu hledání alternativních řešení. Množí se názory, že právě vodík je potenciálně schopen eliminovat negativní dopad uhlíkatých paliv na přírodu. Byť sám není klasickým palivem, může sloužit jako energetický nosič, schopný uchovávat elektrický náboj. Vyrábět vodík průmyslově lze například z vody nebo biomasy, za použití celé řady energetických zdrojů, což produkci činí potenciálně realizovatelnou kdekoli na světě. Své uplatnění nalezne vodík ve stacionárních zdrojích elektrické energie, v záložních systémech, menších mobilních aplikacích a v neposlední řadě také v dopravě, a to jak silniční, tak i námořní nebo letecké.

Právě silniční doprava je odvětví, které zaznamenává jeden z nejzásadnějších vývojų v oblasti vodíkových technologií. Důvodem je řada výhod, které nabízí oproti klasickým palivům. Vodík spotřebovaný ve spalovacím motoru nebo palivovém článku neprodukuje žádné CO₂ ani zdraví ohrožující látky. Aplikace ve formě palivového článku pak nabízí účinnosti daleko převyšující dostupné spalovací motory.

Tato bakalářská práce je rozdělena do pěti kapitol. První z nich se zabývá vodíkem samotným, jeho obecnými vlastnostmi a potenciálem stát se energetickým nosičem číslo jedna. Popisuje způsoby výroby, a to nejen z fosilních paliv, ale i ekologičtější cesty, jako jsou například produkce vodíku z biomasy nebo vodní elektrolýza. Uvádí možnosti jeho skladování v plynné i kapalně formě, stejně tak způsoby jeho transportu.

Následující dvě kapitoly se zabývají palivovými články. Obsahují stručný popis jejich historie, princip technologie a rozdělení jednotlivých typů. Práce zmiňuje výhody i nevýhody využívání palivových článků a představuje jejich aplikaci v různých oblastech, s důrazem na dopravní průmysl.

Čtvrtá kapitola rozebírá aplikaci palivového článku využívajícího vodík pro autobus městské hromadné dopravy. Je zde popsána architektura pohonného systému i skladování paliva na palubě vozidla. Řeč je rovněž o vodíkových čerpacích stanicích, projektu TriHyBus, který zatím zůstává jediným, jež byl v České republice realizován i nejnovějším modelem představeném na světových trzích.

Závěr práce je věnován srovnání ekonomických a ekologických aspektů autobusů s různými druhy pohonu. Pozornost se, kromě palivového článku, soustředí především na dva hlavní typy fungující v České republice, tedy diesel a CNG. Zmínka je částečně také o autobusu s elektrickým pohonem a naftovém hybridu. Ekonomický pohled zahrnuje porovnání pořizovacích cen a provozních nákladů, z hlediska ekologie přibližuje produkci emisí CO₂ při procesu zpracování a spotřeby různých druhů paliv i bezprostřední dopad, který mají jednotlivé pohonné koncepty na své okolí a lidi v něm žijící. Pro docílení určité

perspektivy porovnávaných dat je využít příklad města Brna, jakožto podkladového schématu. Ekonomické a ekologické porovnání jednotlivých pohonných konceptů pracuje s reálnými daty brněnské MHD.

1 Vodík

Vodík je nejvíce zastoupený prvek ve vesmíru, jenž tvoří přibližně 75 % veškeré hmoty. Spolu s héliem je hlavní stavební součástí většiny hvězd i mezihvězdného prostředí. Je rovněž součástí mnoha důležitých molekul, jako je voda, karbohydráty, bílkoviny nebo DNA. Existence vodíku je tudíž pro samotný život naprosto nepostradatelná. Tato kapitola se věnuje jeho základním vlastnostem, možnostem výroby, skladování a transportu. [1, 2]

1.1 Vlastnosti vodíku

Jeho vlastnosti se nejvíce blíží ideálnímu plynu. Za normálních podmínek je vodík bezbarvý plyn, bez chuti a zápachu. Jedná se o nejlehčí známý prvek s postavením č.1 v periodické soustavě prvků. Vyskytuje se ve třech izotopech. Protium má ve svém jádře jeden proton a jeden neutron. Deuterium a tritium mají každý vždy o jeden neutron v jádře navíc, počet protonů však zůstává stejný. Vlastnostmi se tyto tři isotopy příliš neliší, zásadní rozdíl je pouze v atomové hmotnosti. Na Zemi se vodík v elementární formě téměř nevyskytuje, pro veškeré technické využití je tedy nutná jeho průmyslová výroba. [3]

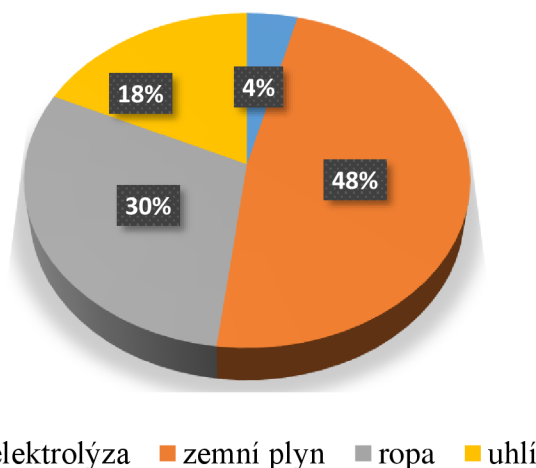
Vodík je svou elektronovou konfigurací (ns^1) příbuzný alkalickým kovům a halogenům, což má významný vliv na jeho vlastnosti. Vodík je za normálních podmínek relativně stálý, pro zvýšení reaktivity je třeba vysokých teplot. Vodík je jednovazebný prvek, který tvoří dvouatomové molekuly. Slučuje se s celou řadou prvků, například s halogeny, kyslíkem i dalšími nekovy, a to nejčastěji za vzniku kovalentní vazby. Je silným redukčním činidlem, reaguje s oxidy a chloridy mnohých kovů. Vodík má jeden z nejnižších bodů varu (-253°C), což je překážkou hlavně při jeho skladování v kapalné formě. [4, 5]

Tab.1.1 Srovnání vlastností vodíku a jiných paliv [6]

Vlastnosti	Vodík	Benzín	Etanol	Metan
Hustota, kapalné skupenství (kg/m^3)	0,0899	-	-	0,651
Hustota, plynné skupenství (NTP) (kg/m^3)	70,8	720-780	789,3	422,6
Bod tání ($^\circ\text{C}$)	-259,1	-40	-114,15	-182,3
Bod varu ($^\circ\text{C}$)	-252,76	-	78,29	-161,15
Výhřevnost (MJ/kg)	119,9	44,6	-	50,0
Spalné teplo (MJ/kg)	141,9	47,4	29,9	55,5
Obj. hustota energie (GJ/m^3), kapalina	10,10	34,85	23,6	230
Obj. hustota energie (GJ/m^3), plyn	0,013	-	-	0,651
Teplota plamene ($^\circ\text{C}$)	2045	2200	-	1875
Teplota samovznícení ($^\circ\text{C}$)	585	228-501	423	540
Minimální energie pro vznícení (MJ)	0,2	0,24	-	0,29
Meze výbušnosti ve vzduchu (obj. %)	4-75	1,0-7,6	4,3-19	5,3-15
Rychlost šíření plamene (m/s)	2,65	0,4	-	0,4
Rychlost difúze do vzduchu (cm^2/s)	0,61	0,05	-	0,16
Toxicita	NE	ANO	NE	NE

1.2 Výroba vodíku

Jak již bylo zmíněno, vodík se na zemském povrchu v elementární formě téměř nevyskytuje, a proto je nutné jej průmyslově vyrábět. V dnešní době převažuje výroba z fosilních paliv, to ovšem problém z hlediska budoucnosti neřeší, jelikož se jedná o neobnovitelné zdroje energie. Navíc, pokud budeme hovořit o vodíku jako o čistém palivu, pak je nezbytné, aby byla maximálně ekologicky šetrná i jeho produkce. Následující část se věnuje nejběžnějším současným typům výroby průmyslového vodíku. [4]

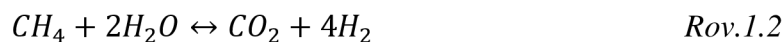


Obr.1.1 Výroba vodíku v současnosti [7]

1.2.1 Parní reformace

Výroba vodíku z fosilních paliv probíhá především parní reformací. Teplo při tomto typu výroby pochází z přímého spalování zemního plynu (metanu) nebo lehčí uhlíkové frakce. Jedná se o nejpoužívanější a nejlevnější způsob výroby vodíku, který se na celkové světové produkci podílí asi 40 %. Technologie je komerčně dostupná a lze ji použít od menších decentralizovaných produkcí (jednotky tun H_2 za hodinu), až po velké továrny na výrobu amoniaku (100 tun H_2 za hodinu). [4]

Základ parního reformování je popsán rovnicemi 1.1 a 1.2. Metan reaguje s vodní párou za vzniku oxidu uhelnatého, oxidu uhličitého a vodíku. Děje se tak v pecích na niklových katalyzátorech při teplotě 700–1100 °C a tlaku 3–5 MPa. Surovina (zemní plyn) musí být odsířená, aby nedošlo k nežádoucím reakcím s katalyzátorem. Podíl vodní páry musí být vyšší, než podíl suroviny, čímž se zabrání usazování uhlíku na katalyzátoru. [8, 9]

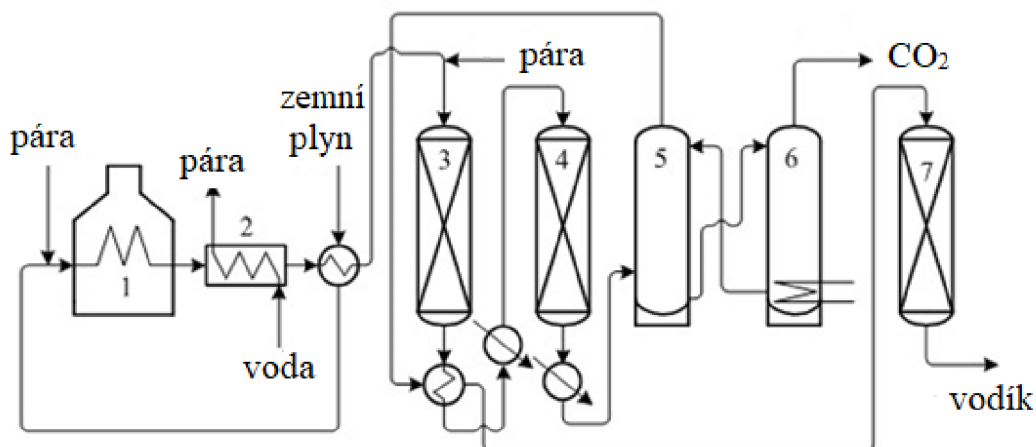


Ve druhé fázi produkty reakce (cca 750 °C) putují do kotle a dále do výměníku, kde se ochladí na 360°C. V konvertorech reaguje CO s vodní parou za vzniku CO_2 a dalšího vodíku. [8]



U této reakce rozlišujeme dva stupně, tzv. vysokoteplotní a nízkoteplotní. V prvním stupni se teplota produktů zvýší na cca 500 °C (exotermní reakce), a tím se snižuje rovnovážný výtěžek CO_2 a H_2 . Z tohoto důvodu se produkty chladí a vedou do nízkoteplotního konvertoru. Zde se užívá vysoce aktivního měděného katalyzátoru a při nižší

teplotě (180-230 °C) dojde ke snížení koncentrace CO. V absorberu se plyn vyčistí od oxidu uhličitého. [8]



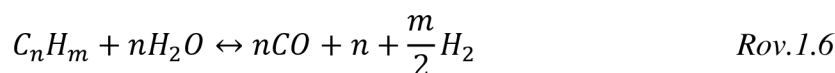
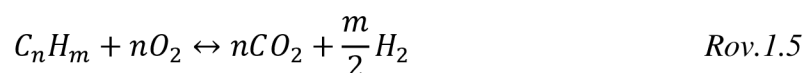
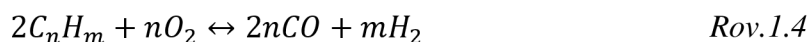
Obr.1.2 Schéma parního reformování zemního plynu (1 - pec, 2 - kotel, 3 - vysokoteplotní konvertor CO, 4 - nízkoteplotní konvertor CO, 5 - absorbér CO₂, 6 - desorbér CO₂, 7 - metanizér) [8]

Účinnost tohoto procesu vychází z poměru páry a uhlíku ve směsi a pohybuje se kolem 80 %. Jeho velkou nevýhodou je vysoká produkce oxidu uhličitého, kdy na každý 1 kg H₂ připadá zhruba 7,05 kg CO₂. Toto je hlavní překážka parního reformingu při hledání ekologických cest výroby elementárního vodíku. [7]

1.2.2 Parciální oxidace

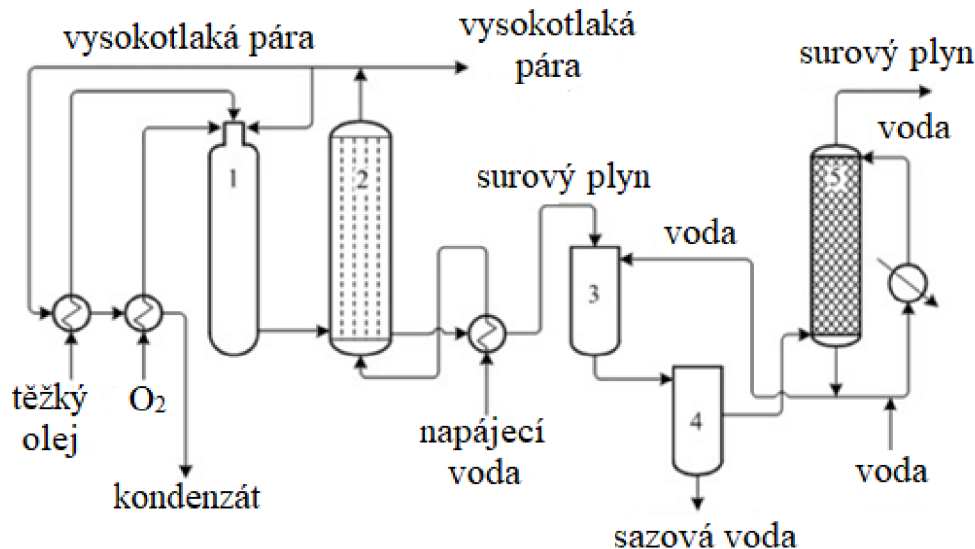
Proces parciální oxidace využívá jako surovinu plynné a kapalné frakce z různých procesů zpracování ropy. V největším objemu jsou to těžké ropné frakce, jako například vakuové zbytky, zbytky z termického a katalytického štěpení, které jsou jinak na trhu těžce využitelné. [10]

Rovnice 1.4, 1.5 a 1.6 popisují zplyňování suroviny (obecně značené C_nH_m) kyslíkem nebo vodní parou při teplotách 1300–1500 °C a tlacích 3–8 MPa. [10]



Zplyňování vodní parou vede ke vzniku většího množství vodíku, navíc se, na rozdíl od zplyňování kyslíkem, jedná o endotermní reakci, při které se teplota produktů sníží na požadovanou úroveň 1350 °C. [10]

První fáze parciální oxidace probíhá ve zplyňovacím reaktoru (generátoru), kde se předehřátý těžký olej rozprašuje do proudu předehřáté směsi kyslíku a vodní páry. Vzniklý plyn je veden do kotle na výrobu vodní páry. Vyrobena vysokotlaká (12 MPa) vodní pára se částečně použije na parciální oxidaci (asi 20 %), zbytek lze pak využít k jiným účelům. [10]



Obr.1.3 Parciální oxidace těžkých ropných olejů (1 – generátor, 2 – kotel na výrobu páry, 3 – chladič, 4 – separátor, 5 – pračka) [10]

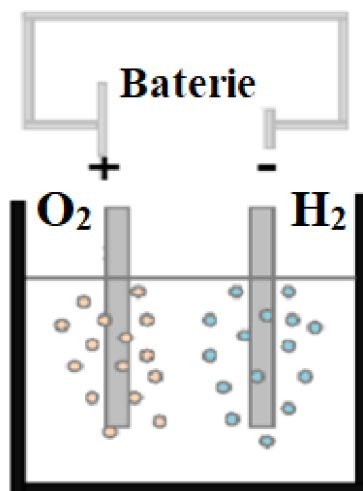
Nežádoucím produktem parciální oxidace jsou saze. Část se jich odstraní v chladiči, kam generátorový plyn putuje z kotle, zbytek následně ve vodní pračce. Ze surového generátorového plynu se vypere kyanovodík a sulfan. K odstranění CO a CO₂ se stejně jako u výroby vodíku parní reformací využívá metanizace. [10]

1.2.3 Elektrolýza

Při elektrolýze se pomocí stejnosměrného proudu štěpí chemická vazba mezi kyslíkem a vodíkem. Na katodě dochází k redukci a vzniku vodíku, který je jímán a skladován. K výrobě vodíku touto cestou je potřeba pouze elektrická energie a její nejnižší náklad je dán volnou entalpií rovnice 1.4. Elektrolýza se podílí na světové výrobě vodíku asi 4 %. [7, 11]



Ideální napětí je 1,229 V, kvůli ireverzibilitě v reakčním mechanismu a nutnosti dodání části tepla ve formě elektrické energie, je ale reálná hodnota o několik desetín vyšší. [7]

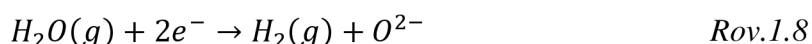


Obr.1.4 Elektrolýza vody [12]

Výroba elektrolýzou je vhodná pro lokace s levnou elektrickou energií a dostatkem vody. Naopak cena elektřiny možnost elektrolýzy pro jiná místa ve větším měřítku prakticky vylučuje. Nespornou výhodou tohoto procesu je vysoká čistota vodíkového plynu, který již není nutné dodatečně čistit. Účinnost procesu je mezi 80 a 92 %, nicméně do celkové účinnosti je třeba také zahrnout výrobu elektrické energie, která elektrolýzu pohání. Při užití konvenčních zdrojů elektrické energie je pak celková účinnost v rozmezí 25 až 35 %. [7, 13]

1.2.4 Vysokoteplotní elektrolýza

Vysokoteplotní elektrolýza je reverzní reakcí k reakcím v palivových člancích s pevnými oxidy. Část energie potřebné k výrobě vodíku touto cestou je dodána formou tepla. Na katodě je disociován vodík podle rovnice 1.8. [4]

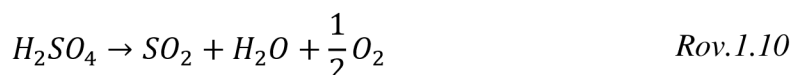
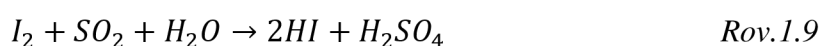


Při růstu vstupní teploty páry se snižuje spotřeba elektrické energie, a tím se zvyšuje celková účinnost výrobního procesu. Navíc se odstraní problémy s korozí tím, že v oběhu cirkuluje pouze kyslík, vodík a vodní pára. Zajímavá je kombinace vysokoteplotní elektrolýzy a využití elektrické energie vyrobené v jaderných elektrárnách, jelikož se tím eliminuje znečištění životního prostředí, neboť nedochází k žádnému spalování. Metoda vysokoteplotní elektrolýzy je ale stále spíše rozvojová. [4, 7]

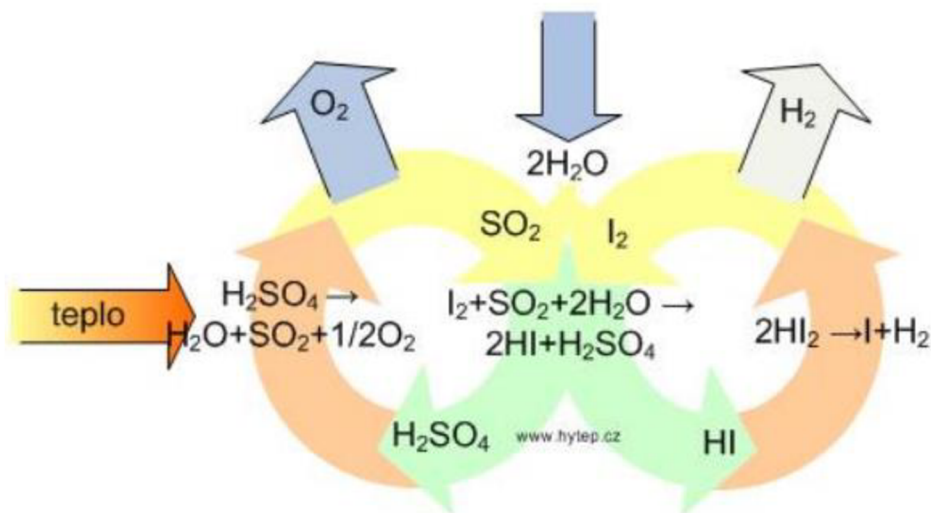
1.2.5 Termochemické štěpení vody

Principem technologie je štěpení vody na kyslík a vodík. Proces se uskutečňuje sérií chemických reakcí, které jsou iniciovány teplem. Tento způsob výroby má několik výhod; není potřeba membrána pro oddělení vodíku od kyslíku, nízká spotřeba elektrické energie a látky, které se reakce účastní je možné recyklovat a vracet zpět do procesu. Existují také hybridní termochemické cykly, které na vstupu využívají jak energii tepelnou, tak elektrickou. [13, 14]

Jedním ze způsobů termochemického štěpení vody je S-I cyklus. Jak již bylo řečeno, vstupními surovinami jsou pouze vysokopotenciální teplo a voda. Na výstupu je kyslík, vodík a nízkopotenciální teplo. Reakce se účastní také jód a oxid siřičitý. [7, 11]



Počátečním stupněm cyklu je reakce vody s jódem a SO_2 za vzniku kyselin sírové a jodovodíkové. Následuje endotermický rozklad kyseliny sírové, což je fáze, která spotřebuje nejvíce tepla (je nutné dosáhnout teplot 800-1000 °C). Rozklad kyseliny jodovodíkové a produkce vodíku již tak energeticky náročné nejsou. Vodík a kyslík jsou produkty štěpení, oxid siřičitý a jód jsou navraceny, zrecyklovány a opět se účastní reakce s vodou. [7, 11]



Obr.1.5 Thermochemický S-I cyklus [7]

Účinnost výrobního cyklu je 40-52 %, přičemž s rostoucí teplotou je možné účinnost ještě zvyšovat. Hodnoty jsou vyšší než u elektrolýzy, jelikož thermochemický cyklus nespotřebovává tak značné množství elektrické energie. Nevýhodou tohoto způsobu produkce vodíku jsou vysoké požadavky na tepelnou energii. Jako jedny z variant se nabízí jaderná energie, koncentrované sluneční záření nebo spalování biomasy. Další nevýhodou je agresivita kyselin jodovodíkové a sírové, což zvyšuje požadavky na odolnost materiálů zařízení. [11, 14]

1.2.6 Výroba vodíku z biomasy

Biomasa coby surovina k produkci vodíku, je považována za velmi efektivní a schopnou existence v dlouhodobém horizontu. Dochází ke zužitkování biologického odpadu, který jinak končí na skládkách. Biologický odpad a materiál je navíc oproti fosilním palivům mnohem vyváženěji přístupný v různých oblastech světa. Kritici tohoto zdroje poukazují na vysokou cenu výroby a zpochybňují také dostupnost biomasy. Přestože vodík vyrobený touto cestou zřejmě nikdy sám nepokryje veškerou poptávku společnosti, mohlo by se jednat o zajímavou alternativu, a to zejména ve světě bez fosilních paliv. [4]

Vodík se dá z biomasy získávat biologickou a thermochemickou cestou. Hlavní rozdíl spočívá v teplotě. Biologicky se proces realizuje za okolních nebo lehce zvýšených teplot, při thermochemické cestě je teplota v řádech stovek stupňů Celsia. V případě masové výroby vodíku z biomasy je právě thermochemická cesta poněkud atraktivnější, jelikož lze využít různých zdrojů energie a navíc výrobu integrovat do již existujících zařízení pracujících s fosilními palivy. [4]

Mezi hlavní thermochemické procesy výroby vodíku z biomasy patří parní reformování, dekarbonizace vodíku pomocí slunečního záření a katalytické parní reformování bioetanolu a bioplynu. Všechny zmíněné procesy pracují s tzv. suchou biomasou, která v podstatě představuje směs uhlovodíků. Oproti tomu biomasa s velkým obsahem vody je pro klasické thermochemické procesy nevhodná a k jejímu zpracování se využívá biotechnologických postupů. Zde rozlišujeme dva procesy: vodíkovou fermentaci, která funguje bez přítomnosti světla a fotobiologickou produkci vodíku. Pro zvýšení účinnosti se mohou oba procesy snadno kombinovat. [15]

1.3 Skladování a transport

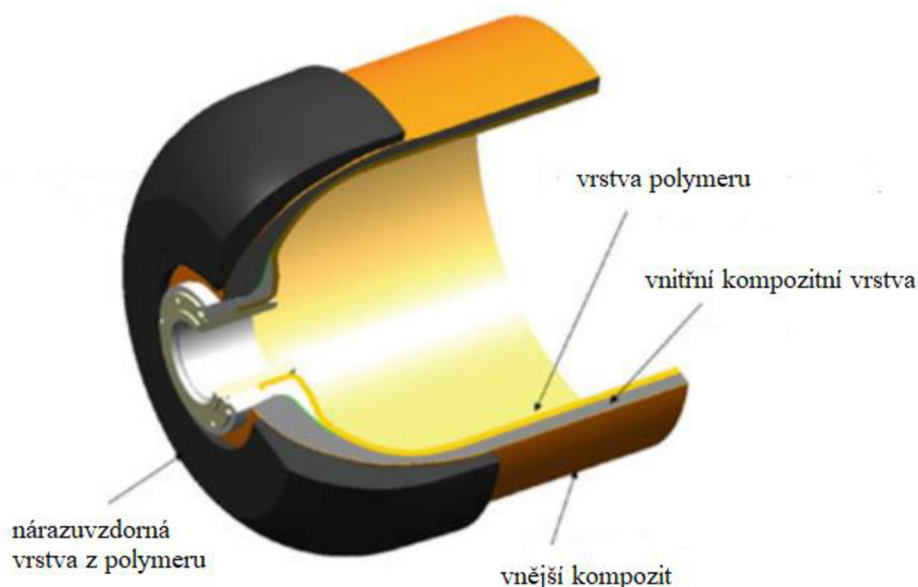
V cestě za vodíkovou budoucností nestojí jen problematická a nákladná výroba, ale také jeho bezpečné a efektivní skladování. Velkou komplikací jsou vlastnosti vodíku, přesněji hustota a bod varu, které řešení značně ztěžují. Skladování vodíku v plynném a kapalném skupenství jsou metody zažitá a existují názory, že se v tomto směru technologie již nemají kam posouvat. V současnosti se objevují nové způsoby skladování vodíku v pevném skupenství, například v hydridech kovů. [16]

Tab.1.2 Energetické hustoty pro různé formy skladování vodíku [2]

Forma	Energetická hustota		Hustota
	kJ/kg	MJ/m ³	kg/m ³
Plynný vodík (0,1 MPa)	120 000	10	0,090
Plynný vodík (20 MPa)	120 000	1 900	15,9
Plynný vodík (30 MPa)	120 000	2 700	22,5
Kapalný vodík	120 000	8 700	71,9
Vodík v hydridech kovů	2 000-9 000	5 000-15 000	-

1.3.1 Skladování vodíku v plynném skupenství

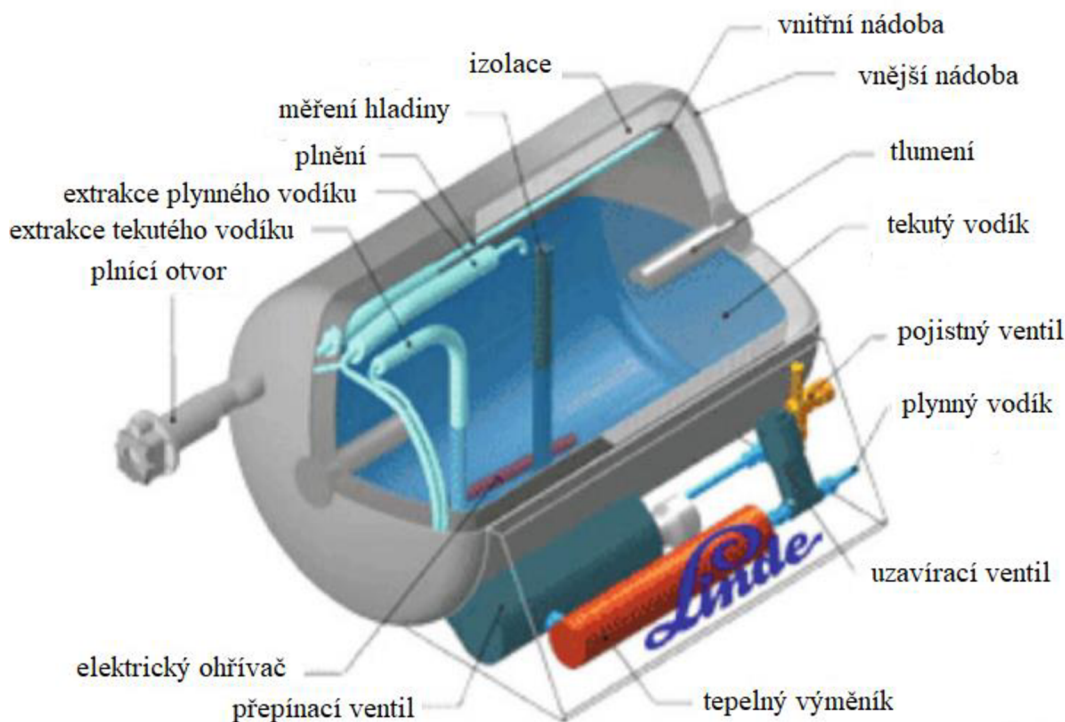
Plynný vodík za normálních podmínek zabírá obrovský objem. Jeden kilogram vodíku zaujme prostor 11 m³. Ke skladování se tudíž používají tlakové lahve o maximální tlaku 20 MPa, v případě moderních kompozitových tlakových lahví až 80 MPa. Při skladování vodíku v tlakových lahvích je dáván důraz na bezpečnost, především v zalidněných oblastech. Proto jsou lahve třívrstvé, kdy ta vnější musí obstát proti mechanickému a koroznímu poškození. Ke stlačení se používají standardní pístové kompresory. Tento proces je značně energeticky náročný. Ke stlačení vodíku na 35 MPa je potřeba až 30 % energie ukryté v palivu. [16, 17]



Obr.1.6 Vysokotlaká kompozitová lahev [18]

1.3.2 Skladování vodíku v kapalném skupenství

Zkapalňování vodíku je energeticky velmi náročný proces, a to díky nízké teplotě varu. Vodík je skladován při teplotě 21,2 K v kryogenních nádržích s přetlakovým ventilem. Výhodou je, že lze vodík z nádrže čerpat v kapalném stavu (spalovací motory), ale také ve stavu plynném (palivové články). Toto skladování s sebou přináší nemalé ztráty vlivem přestupu tepla a odpařování vodíku. Odpařená část paliva se musí upouštět skrze ventil, aby nedošlo k poškození nádrže. V některých aplikacích je tento vodík jímán a stlačován do tlakových lahví, pro běžně používané nádrže však tato ztráta činí až 3 % z obsahu paliva na den. Samotným zkapalněním vodíku se spotřebuje množství energie ekvivalentní 40 % energie v palivu. [15, 17]

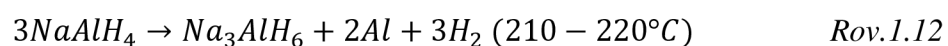


Obr. 1.7 Kryogenní nádrž na vodík [18]

1.3.3 Alternativní způsoby skladování vodíku

Mnoho kovů a slitin reaguje s vodíkem za vzniku hydridů. Některé z těchto hydridů mají větší objemovou kapacitu, než nabízí skladování vodíku v tekuté formě. Zároveň nevyžadují nádrže složitých tvarů a technologií, což je zajímavé zejména pro mobilní aplikace. K absorpci a následnému skladování vodíku dochází za nízkých tlaků, což zvyšuje bezpečnost celé technologie. Nevýhodou je, že jak proces hydrogenace, tak dehydrogenace jsou chemické reakce, které vyžadují přerušování vazeb. Vodík často okupuje v kovu intersticiální mezery, čehož výsledkem je, že pro uvolnění vodíku je potřeba vysokých teplot (120-300 °C). Tento fakt naopak vytváří překážku pro užití v mobilních aplikacích. [1, 19]

Další možností je využití komplexních hydridů. Ty mají oproti hydridům kovů větší objemovou hustotu vodíku a jsou lehčí. Spojení v těchto sloučeninách probíhá pomocí iontové nebo kovalentní vazby, tedy silná spojení vyžadující vysokou disociační energii. Jeden z příkladů uvádí rovnice 1.12. [1, 18]



1.3.4 Transport vodíku

Podobně jako u skladování vodíku je efektivní a cenově přijatelný transport dalším klíčovým krokem k cestě za větším energetickým využíváním vodíku. V zásadě se nabízí tři možnosti. Transport plynného vodíku potrubím, případně kamionovou dopravou, jako to dnes vidíme u zemního plynu. Transport kryogenních nádrží plněných kapalným vodíkem. A nakonec přesun produktů ze zpracování biomasy, jako etanol nebo metanol a výroba vodíku přímo v místě použití. Využití potrubní sítě se jeví jako nejvýhodnější pro větší vzdálenosti, nicméně se nedá tímto způsobem pokrýt veškerá poptávka na trhu. Způsob, který zvolíme, bude tedy opět záležet na daných podmínkách a situaci. [4]

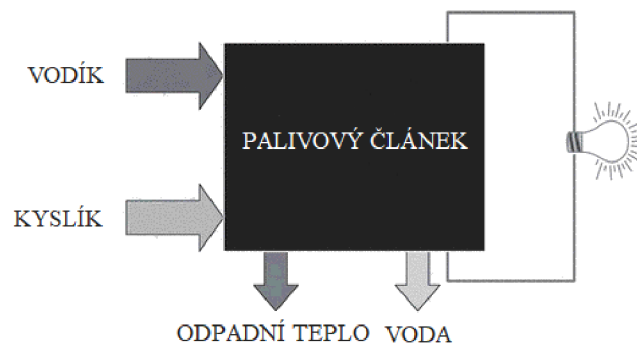
1.4 Využití vodíku jako nosiče energie

Hlavní potenciál využití vodíku je pravděpodobně v dopravě. Jednak je snaha nalézt alternativu k fosilním palivům z důvodu jejich docházejících světových zdrojů, ale také stále větší důraz na ekologii a tendence snižovat uhlíkovou stopu. Vodík, na rozdíl od tradičních paliv, jako plyn, ropa, uhlí, neprodukuje žádné emise, pomineme-li jeho výrobu, což bylo již dříve zmíněno. Spalováním vodíku ani využitím palivového článku tedy nevzniká znečištění, produktem je pouze voda v kapalném a plynném stavu. Využití vodíku se neomezuje pouze na dopravní odvětví, velký potenciál má pro záložní zdroje elektrické energie, kogenerační jednotky a zdroje elektrické energie pro mobilní zařízení, jako notebook nebo mobilní telefon. Zájemem vodíkového hospodářství je tedy i nalézt alternativu k bateriím pro menší mobilní aplikace.

Spalovací motor na vodík se testuje již více než 30 let a mnohá měření ukazují, že je konkurenceschopnou náhradou za fosilní paliva. Účinnost takového spalovacího motoru je 25-30 %, zatímco u palivových článků, kterým se věnuje následující kapitola, 35-45 %, v závislosti na typu aplikace a zatížení. [21]

2 Palivový článek

Palivový článek je zařízení, které přeměňuje chemickou energii paliva přímo na energii elektrickou. Při získávání elektrické energie z paliv běžným způsobem, tj. spalováním, má celý proces několik kroků. Spálením paliva se vytvoří teplo, toto teplo se využije k přeměně vody ve vodní páru, pára pohání turbínu, která roztáčí generátor, a ten přemění mechanickou energii na elektrickou. U palivového článku se vše děje v jednom jednoduchém kroku, bez nutnosti zapojit jakékoliv pohyblivé součásti do systému. Toto samo o sobě představuje z hlediska konstrukčního řešení, poruchovosti a životnosti velkou výhodu. Typickými reaktanty pro palivový článek jsou vodík a kyslík, ale ani jeden z nich nemusí být dodáván v čisté formě. Vodík může být součástí směsi plynů, nebo ve formě uhlovodíku, okolní vzduch pak zajišťuje dostatek kyslíku pro funkčnost celého procesu. [22]



Obr.2.1 Palivový článek [22]

2.1 Historie

První palivový článek sestrojil velšský vědec Sir William Grove v roce 1839. Byl schopen produkce elektrické energie spojením vodíku s kyslíkem a dostal označení „plynná napěťová baterie“. Ovšem přes občasné pokusy se nepodařilo v následujících sto letech sestrojít žádné praktické zařízení. Fyzikální chemik W. F. Oswald popsal palivový článek teoreticky, včetně jeho srovnání se spalovacím motorem. Uvědomil si totiž, že ten má účinnost omezenou teoretickou hodnotou Carnotova cyklu a produkuje obrovské znečištění. Palivový článek naproti tomu produkuje elektrickou energii přímo, má vyšší účinnost, je tichý a bezemisní. Byl přesvědčen, že v budoucnu budou mít palivové články nezastupitelnou roli. [22]



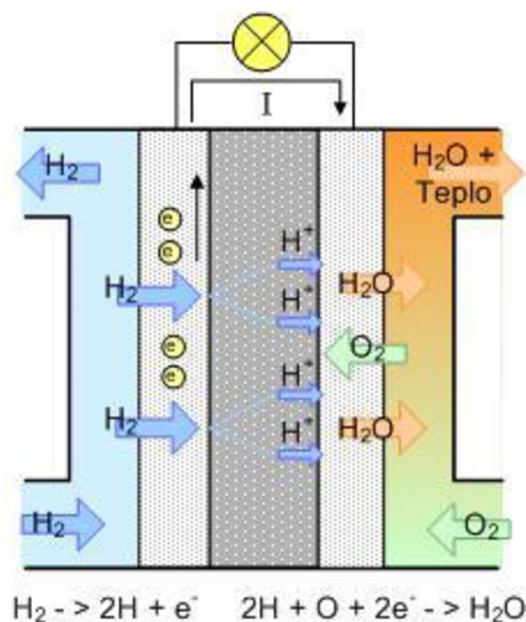
Obr.2.2 První osobní automobil s PEM palivovým článkem z roku 1993 [22]

Praktické aplikace palivového článku se začaly množit až s rozvojem amerického vesmírného programu. Firma General Electric vyvinula palivový článek využívající polymerní membránu pro program Gemini¹ a při misích Apollo, kdy byl použit jako zdroj elektrické energie pro navigaci a komunikaci. Přestože se palivový článek uchytil velmi dobře pro aplikaci ve vesmírných lodích, s výjimkou menšího nákladního automobilu, vyrobeného firmou General Motors v polovině šedesátých let, se velký rozvoj v jejich uplatnění na Zemi nekonal až do devadesátých let. V roce 1989 byl sestrojen palivový článek PEM (případně PEMFC), což je označení, které se užívá pro palivový článek s polymerní membránou plnící funkci pevného elektrolytu. V roce 1993 byl představen první autobus firmy Ballard Power Systems a první osobní automobil s PEMFC firmy Perry Energy Systems. Koncem století měla většina amerických automobilek svůj prototyp automobilu na vodíkový pohon. [22, 23]

2.2 Princip

Smyslem palivového článku je výroba elektrické energie oksylováním paliva. Tím je nejčastěji vodík, případně methanol nebo jiný karbohydrát. Oksylovadlem je čistý kyslík nebo kyslík jako součást vzduchu². Palivový článek je v podstatě jako baterie s elektrodami a elektrolytem, která spojuje palivo s kyslíkem. Při procesu dojde k produkci elektrické energie, odpadního tepla a vodní páry. [11, 25]

Princip palivového článku lze vysvětlit na příkladu článku využívajícího polymerní membránu (Obr. 2. 3). Tento typ článku je oblíbený především pro svou jednoduchost a možné uplatnění, s vyšší či nižší efektivitou a účinností, ve většině aplikací.



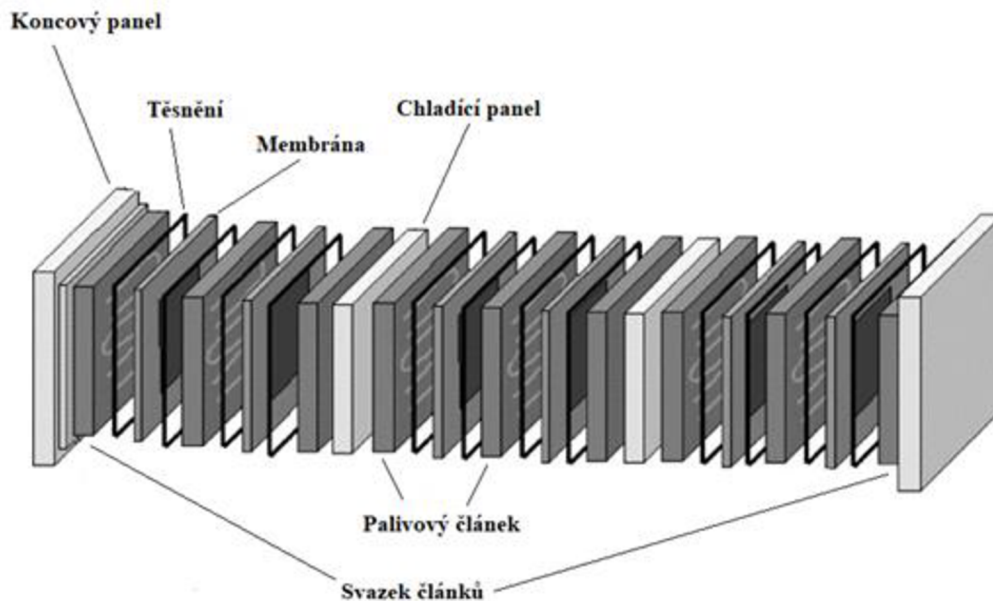
Obr.2.3 Palivový článek s polymerní membránou [25]

Nejpodstatnější součástí palivového článku PEM je elektrolyt tvořený polymerní membránou s velmi specifickými vlastnostmi, vloženou mezi dvě pórovité, elektricky vodivé elektrody. Membrána je neprostupná plynům a zároveň vede protony. Ve styku membrány a

¹ Gemini byl druhý pilotovaný projekt americké NASA, realizovaný v letech 1965 a 1966. Následoval po programu Mercury a připravil půdu pro projekt Apollo, který zahrnoval mise na Měsíc. Během letů došlo k významnému posunu v oblasti pilotování raket a prvním vystoupení astronautů do otevřeného vesmíru. [24]

² Kyslík ve své čisté formě značně zvyšuje účinnost celého systému oproti využití okolního vzduchu obsahujícího množství dalších prvků. [11]

elektrody se nachází katalyzátor, většinou tvořený vzácným prvkem (platina). Na katalyzátoru dochází k elektrochemickým reakcím. Vodík se přivádí na zápornou elektrodu (anoda), kde probíhá jeho disociace na protony a elektrony. Protony putují přes membránu směrem ke kladné elektrodě (katoda), záporné elektrony membrána nepropustí a jsou nuceny putovat směrem ke katodě externím okruhem, kde konají práci a vyrábí tak elektrickou energii. Na druhou stranu membrány je přiváděno okysličovadlo, které reaguje s vodíkem za vzniku vodní páry. Ta je spolu s přebytečným kyslíkem vyvedena ven ze systému. Každý článek je schopen produkovat napětí asi 1 V, z toho důvodu se články spojují do svazků. [22, 25]



Obr.2.4 Svazek palivových článků [26]

2.3 Výhody palivového článku

Některé přednosti palivových článků jsou stále spíše hudbou budoucnosti, zatímco jiné jsou dosažitelné již nyní. Jednou z hlavních výhod palivového článku je nulová produkce emisí. Jedinými produkty reakce uvnitř článku, kromě elektrické energie, jsou nespotřebovaný vzduch (kyslík) a voda (vodní pára). I pokud zvažíme fakt, že vodík je nutné vyrábět za produkce určitého množství emisí, stále dostáváme hodnoty nižší než při standardních způsobech přeměn energie. Tento fakt je zajímavý nejen pro automobilový a dopravní průmysl, ale také například pro vnitřní aplikace a ponorky. [22, 27]

Celé zařízení je velmi jednoduché. Skládá se z opakujících se prvků a neobsahuje žádné pohyblivé součásti. Toto je příslib možnosti produkce při nákladech srovnatelných nebo dokonce nižších, než mají běžně používané technologie. Nízká cena je ale další z výhod, na které se zatím čeká. V dnešní době je cena stále ještě vysoká, zejména díky drahým polymerům a vzácným prvkům (katalyzátor). Toto je problém, který má většina začínajících technologií a vyřeší ho pravděpodobně až velkoobjemová produkce. Jsme svědky paradoxní situace, kdy vysoké ceny způsobuje nízká produkce, se kterou nikdo nechce začít právě kvůli vysokým cenám. [22, 28]

Palivový článek nabízí účinnost vyšší, než lze dosáhnout s klasickým spalovacím motorem nebo elektrárnou. Technologie palivového článku je tedy atraktivní nejen pro automobilový průmysl, ale rovněž pro decentralizovanou produkci elektrické energie.

Ovšem jsou zde i jiné nové technologie nabízející vyšší účinnosti. Sluší se zmínit hybridní elektrická vozidla nebo elektrárny s kombinovanými pracovními cykly. [22]

Jak již bylo řečeno, palivový článek funguje bez přítomnosti pohyblivých součástí. Toto je vždy velkou předností, jelikož pohyblivé součásti jsou zpravidla náchylné na poškození, opotřebení a jejich množství výrazně snižuje životnost zařízení. Výdrže, která dostačuje potřebám automobilového průmyslu, dosahují palivové články už dnes, nicméně pro potřeby stacionárních zdrojů elektrické energie je třeba dalšího vývoje³. Výhodou je i nízká hlučnost systému, která rovněž souvisí s absencí pohyblivých součástí. [22, 27]

Další výhodou je nízká hmotnost a velikost. Palivový článek, který by dokázal nahradit spalovací motor automobilu příliš prostoru neušetří, nicméně u mnoha mobilních aplikací lze dosáhnout rozměrů menší, než mají dnes používané baterie. [22]

2.4 Typy palivových článků

Kategorizace palivových článků je odvislá od typu elektrolytu, který se v nich používá, a také podle teploty, při které pracují. Některé články pracují s polymerní membránou nebo tuhými oxidy, a mají tedy pevný elektrolyt. Jiné s kyselinou, hydroxidem, nebo roztavenými uhlíčitany. Nízkoteplotní palivové články mají operační teploty kolem 100 °C, vysokoteplotní se mohou dostat až k 1000 °C. Stejně jako u výroby a skladování vodíku i zde závisí volba na požadavcích a potřebách dané aplikace.

2.4.1 Palivový článek polymer – elektrolyt (PEMFC)

Jak bylo zmíněno, označení PEMFC se užívá pro palivové články, kde funkci elektrolytu plní polymerní membrána, někdy také nazývaná proton propustná membrána. Jedná se o nízkoteplotní palivové články, obvykle pracující při teplotě pod 80 °C. S tímto typem článku bylo původně počítáno pro vesmírné lety, ovšem membrána nebyla dostatečně stabilní, proto se NASA rozhodlo použít článek alkalický. [27]

Dnes se jako membrána využívá polymer kyseliny sulfonové, která je výborným vodičem protonů. Jako katalyzátor se používá nikl, jelikož je s ním dosahováno lepších výsledků než s katalyzátorem z drahých kovů. Pro celý systém je klíčové zacházení s vodou. Membrána musí být trvale zvlhčována, aby byla zaručena dostatečná vodivost protonů. Toto se obvykle provádí saturací vstupních plynů vodní parou. Plyn se prožene vodou o teplotě o něco vyšší (5-10 °C), než je operační teplota článku. Zároveň musí být voda článku produkována rychleji než se stačí vypařovat, proto musí být operační teplota menší než 120 °C. Jelikož je za těchto teplot CO jedovatý pro katalyzátory, použité palivo musí být velmi čisté s jeho minimálním nebo nulovým obsahem. [11, 27]

Můžeme se také občas setkat s označením DMFC, což je klasický PEMFC, využívající jako palivo methanol místo vodíku. Methanol je méně náročný na zacházení, transport a skladování než vodík, a je to další z variant pro budoucí pohon automobilů. Technologie využívající methanol je stále příliš málo rozvinutá, aby mohla být v autech použita. Nabízí se dvě cesty pro využití methanolu. Jednou z nich je jeho přímá oxidace a použití v DMFC, nebo jeho konverze na technický vodík, který by byl poté palivem pro PEMFC. Hodnoty vycházející z testů přímé oxidace nejsou zatím příliš příznivé pro masivnější

³ U automobilu je požadovaná životnost 3 000-5 000 hodin. Pro stacionární zdroje elektrické energie je požadovaná životnost palivového článku mnohonásobně vyšší. Je nezbytné dosahovat hodnot vyšších než 40 000-80 000 hodin. [22]

používání, navíc prvotní konverze vyžaduje další technologické zázemí. I tak zůstává tato technologie příslibem do budoucna. [23]

2.4.2 Alkalický palivový článek (AFC)

Elektrolytem je v tomto případě KOH. Pro vysokoteplotní činnost (250 °C) je potřeba koncentrovaný (85 %) a pro činnost při nižších teplotách (menší než 120 °C) stačí méně koncentrovaný elektrolyt (35-50 %). U tohoto typu nehrozí díky alkalickému elektrolytu problémy s korozí, je tedy možné použití množství různých materiálů pro katalyzátor. Většinou se jedná o nikl, stříbro nebo kovové oxidy. Ze stejného důvodu mohou být nikl nebo kovové slitiny použity také jako konstrukční materiál palivového článku. Nevýhodou představuje citlivost na oxid uhličitý, který při reakci s hydroxidem draselným nepříznivě změní elektrolyt. Právě tento typ palivového článku byl použit jako zdroj elektrické energie při výše zmíněných vesmírných misích Apollo. [11, 23]

2.4.3 Palivový článek s kyselinou fosforečnou (PAFC)

Elektrolyt palivového článku, jak už název napovídá, tvoří 100% kyselina fosforečná. Jedná se o nízkoteplotní systém, pracující v rozmezí 150-220 °C. Vyšší teplota způsobí větší efektivitu systému, jelikož roste schopnost kyseliny vést ionty a chrání platinový katalyzátor anody před CO. Větší rozmezí pracovních teplot oproti jiným kyselinám je dáno větší relativní stabilitou kyseliny fosforečné. Vysoká koncentrace kyseliny minimalizuje tlak vodní páry a usnadňuje tak vodní management v článku. Membrána je tvořena kyselým karbidem křemíku a katalyzátory elektrod jsou pokovovány platinou. [22, 28]

2.4.4 Palivový článek s roztavenými uhličitany (MCFC)

Na rozdíl od předchozích typů, MCFC pracují za vysokých teplot (přes 600 °C). Vysokoteplotní palivové články mají oproti nízkoteplotním několik výhod. Pomocí reakčního tepla lze generovat více elektrické energie a tím zvýšit účinnost systému. Umožňuje použití technického vodíku s vysokým obsahem CO a dalších nečistot. Navíc lze pracovat s CO, zemním plynem a dalšími fosilními palivy, kdy dojde k jejich konverzi přímo uvnitř palivového článku. Vysoká teplota zajistí aktivitu Ni (anoda) a CO (katoda), které podporují reakci. Není tudíž zapotřebí platinového katalyzátoru. [23, 27]

Elektrolytem je obvykle kombinace zásaditého (Li, Na, K) uhličitanu, který je obsažen v keramické matici LiAlO_2 . Při tak vysoké provozní teplotě dojde k roztavení uhličitanu, což poskytuje iontům vysokou vodivost. [22]

Provoz při tak vysokých teplotách ovšem přináší řadu problémů spojených s limity chemické a mechanické stability materiálů, které jsou v zařízení použity. Tento fakt je nutné brát při konstrukci na vědomí. [23]

2.4.5 Palivový článek s tuhými oxidy (ITSOFC)

Operační teplota palivového článku s tuhými oxidy je o něco vyšší, než u článku s roztavenými uhličitany (600-800 °C). Jsou použity keramické komponenty pro elektrody a elektrolyt, nevadí tedy přítomnost uhlovodíků a CO v palivu a karbon se na keramických součástkách neusazuje. Nedochozí tím k pohybu elektrolytu a velmi se snižují problémy s korozí. Od teploty 650 °C lze využívat parní reformace uvnitř článku. Nevýhodou je pokles kinetiky a vodivosti iontů, jež podporuje pevný elektrolyt, se snižující se teplotou. [11]

2.4.6 Palivový článek s tuhými oxidy – trubkový (TSOFC)

Pracovní teplota je v tomto případě až 1000 °C, což značně zlepšuje vodivost kyslíkových iontů. Elektrolytem je pevný, neporézní oxid kovu, nejčastěji Y_2O_3 – stabilizovaný ZrO_2 . U článků pracujících za nízkých teplot jsou nosiče náboje

protonové nebo hydroxylové ionty. Zde funkci zajišťují uhličitanové a kyslíkové ionty. Jelikož je teplota článku redukována, lze vyrobit katalyzátor z antikorozi oceli, a stejně jako u MCFC ušetřit za drahý kov. [11, 27]

Pevný elektrolyt omezí problémy s korozi, zároveň zajistí nepropustnost plynu při přechodu z jedné elektrody na druhou. Absence kapaliny uvnitř článku rovněž odstraní problém s pohybem elektrolytu a zatopením elektrod. Stejně jako u MCFC může docházet k reformaci paliva přímo uvnitř článku. Chod článku produkuje odpadní teplo, které lze použít k ohřevu vstupujícího vzduchu, a ještě zvýšit efektivitu procesu. [11]

Systémy s palivovými články SOFC jsou vyvíjeny s velkým rozsahem výkonu, od zařízení v řádu jednotek wattů, až po několikamegawattové elektrárny. V automobilovém průmyslu jsou vyvíjeny palivové jednotky SOFC jako doplněk spalovacího motoru. Například jako zdroj energie při vypnutém motoru, zdroj elektrické energie pro chladící vozy, případně u elektromobilů pro zvýšení dojezdu. Palivové články s tuhými oxidy jsou rovněž zvažovány pro budoucí použití v letecké dopravě. Mohly by snížit spotřebu paliva, hluk a emise. [29]

3 Použití palivových článků

Palivové články jsou pro budoucnost velmi zajímavé. S ohledem na účinnost, redukci znečištění ovzduší, zachování zdrojů, nebo prostě jen vhodnost použití pro danou aplikaci, se nabízí nepřeberné množství potenciálního využití. Své uplatnění naleznou palivové články jako nouzové záložní zdroje energie nebo náhrada baterií v mobilních systémech. Velký potenciál nabízí zastoupení role fosilních paliv v dopravě, ať už automobilové, lodní nebo letecké. Palivový článek zde může sloužit jako doplňkový zdroj energie nebo rovnou jako pohon celého systému.

3.1 Stacionární zdroje energie

Hlavní výhodou palivových článků, pokud jde o stacionární aplikace, je vysoká účinnost. Teoretické uplatnění zde najdou jak vysokoteplotní, tak nízkoteplotní články. Nízkoteplotní články mají zpravidla krátký čas spuštění, zatímco vysokoteplotní články (SOFC, MCFC) mohou generovat teplo, které se dá využít pro tepelný cyklus, nebo případně zařadit palivový článek do cyklu kombinovaného. Pozitivní je i fakt, že tyto dva typy článků nejsou omezeny použitím vodíku. [27]

PAFC, PEMFC nebo SOFC v kombinaci s tepelným cyklem by mohl splňovat všechny požadavky pro energetické potřeby rodinného domu nebo skupiny domů. PAFC nabízí krátký čas spuštění, což je v případě menších zdrojů energie ještě vyhledávanějším atributem, a je schopen vyprodukovat dostatečné množství páry pro lokální parní reformaci. Pomocí odpadního tepla z palivových článků jsme schopni například zajistit ohřev vody pro domácnost. [27]

Delší najížděcí čas, který není příliš žádoucí pro potřeby malých distribučních energetických sítí, není překážkou u menších elektráren (nad 250 kW). V tomto odvětví mohou nalézt uplatnění SOFC a MCFC systémy. Pracují za vysokých teplot a produkují velké množství odpadního tepla, jež lze dále spotřebovávat. Nabízí se možnost přímého ohřevu nebo další produkce elektrické energie skrze parní motory. Nespornou výhodou pro potřeby výroby elektrické energie ve větším množství je vyšší účinnost vysokoteplotních článků a možnost vyhnout se reformaci při využití jiného druhu paliva. [27]

3.2 Přenosné aplikace

V tomto smyslu se mluví hlavně o nahrazení baterií v malých přenosných přístrojích s výkonem podstatně menším než 100 W nebo o přenosných generátorech s výkonem až 1 kW. U mobilních aplikací je, samozřejmě spolu s velikostí a vahou, hlavní výhodou délka provozu bez nutnosti dobíjení. Nabízí se využití pro dobíjecí stanice, počítače, elektrické nářadí, vysílací a komunikační zařízení nebo bezdrátové meteorologické přístroje. U mobilních aplikací však představuje problém palivo. Vodík díky svým vlastnostem, které byly již výše zmíněny, není pro spousta z těchto aplikací vhodný. Často se tedy lze setkat s použitím methanolu, buď prostřednictvím DMFC, nebo jeho transformací na technický vodík skrze malý zabudovaný reformátor. [22]

Velké potenciální odbytiště pro přenosné aplikace využívající vodík představuje armáda. Zde pro ně lze najít uplatnění ve formě generátorů elektrické energie nebo přímo poháněných přístrojů vojenské techniky. V jejich prospěch mluví hlavně nízká hlučnost, vysoká energetická hustota a nízká hmotnost ve srovnání se současným vybavením využívajícím baterie. [30]

3.3 Záložní zdroje energie

Díky své vysoké energetické hustotě, skladnosti a schopnosti provozu v nepříznivých podmínkách představují palivové články alternativu k běžně používaným bateriím především v telekomunikačním sektoru. Hlavním požadavkem pro zdroje záložní energie je vysoká spolehlivost, spíše než dlouhá životnost. Toto odvětví se tedy stalo jedním ze zásadních uživatelů palivových článků. Vedle telekomunikací je velká poptávka také v nemocnicích, bankovních a jiných finančních institucích, datových centrech a vládních organizacích, kde je nutný nepřetržitý provoz, a to při výpadku dodávky elektrického proudu. [22, 30]

3.4 Autobusy, užitková a další vozidla

Vodíkové technologie lze aplikovat na různé druhy pozemních vozidel. Může se jednat o autobusy, nákladní automobily, motocykly, elektrokola a pracovní vozidla pro manipulaci s materiálem. Poslední zmíněné aplikace slaví již dnes mnoho úspěchů. Pro využití ve velkých uzavřených skladových prostorách (například vysokozdvizné vozíky) se zdá být vodíkový pohon jako dělaný. Použití spalovacího motoru je vzhledem k zavřeným prostorám značně nevhodné. Oproti běžně používaným bateriím pak nabízí výhody rychlejšího tankování, délky provozu na jedno natankování a menší náročnost na údržbu. Velké množství těchto vozidel musí pracovat v podchlazeném až mrazivém prostředí, s čímž se palivové články vyrovnávají rovněž lépe než bateriové systémy. [30]

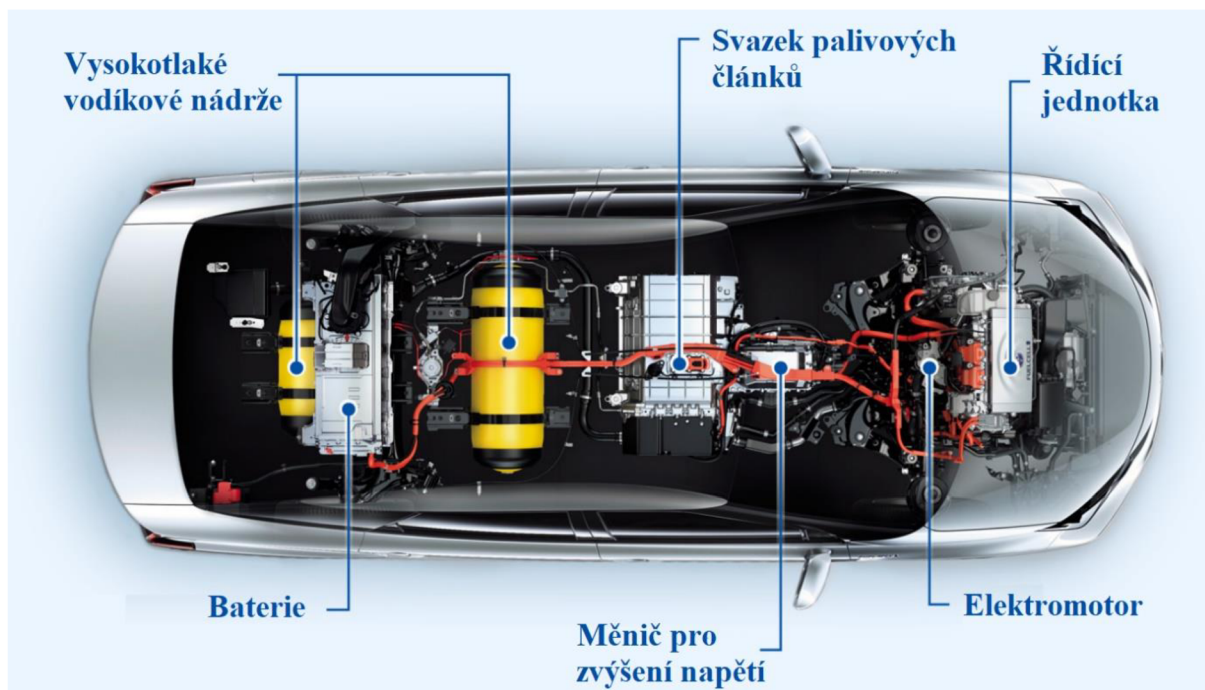
Městská autobusová doprava je dalším velmi perspektivním odvětvím, kde by se vodíkové technologie mohly rozvíjet. Mnoho z předních světových výrobců již přišlo s vodíkovým modelem na trh a v celé řadě světových měst (Londýn, Vancouver, Hamburk) byly úspěšně zařazeny do provozu. Popisem aplikace palivového článku do městského autobusu se zabývají poslední dvě kapitoly této práce.

3.5 Osobní automobily

Využití palivových článků v silniční dopravě má do budoucna velký potenciál. Nabízí účinnost systému až o 30 % vyšší než mají klasické spalovací motory, navíc neprodukují žádné skleníkové plyny a škodlivé emise. Počet aut v provozu se neustále zvyšuje a velká řada měst pocítuje problémy s tím spojené. Snaha o postupný nástup ekologicky čistých vozidel je vidět po celém světě. Zatímco některé automobilky soustředí pozornost k elektromobilům, jiné, zejména ty asijské, pracují na vývoji vodíkových vozidel a elektromobily považují za pouhý mezikrok. [30]

Momentálně dosahují nejlepších výsledků modely jež jsou kombinací obou konceptů, jak vodíkového, tak bateriového. Vodík může nabídnout mimo jiné rychlejší tankování, delší dojezdy, vyšší účinnost nebo nižší hmotnost. S pomocí baterií lze kompenzovat kratší reakční čas systému nebo nízkou efektivitu při malých rychlostech. Pořizovací ceny vodíkových automobilů i elektromobilů, které jsou již dnes na trhu jsou podstatně vyšší ve srovnání se spalovacími motory, což je hlavní důvod jejich nízkých prodejů. Na druhou stranu lze vidět v některých městech (Oslo, Londýn), že pro čistě městské potřeby přepravy je především elektromobil velmi oblíbenou variantou. [30]

Obrázek 3. 1 ukazuje vnitřní schéma automobilu Toyota Mirai, jež je jedním z modelů, které jsou v současnosti sériově vyráběny. Kromě Toyoty mají ve svém portfoliu vodíkový automobil také Hyundai nebo Honda. Do roku 2020 plánují produkci i Mercedes a Kia.



Obr.3.1 Toyota Mirai – vnitřní architektura [31]

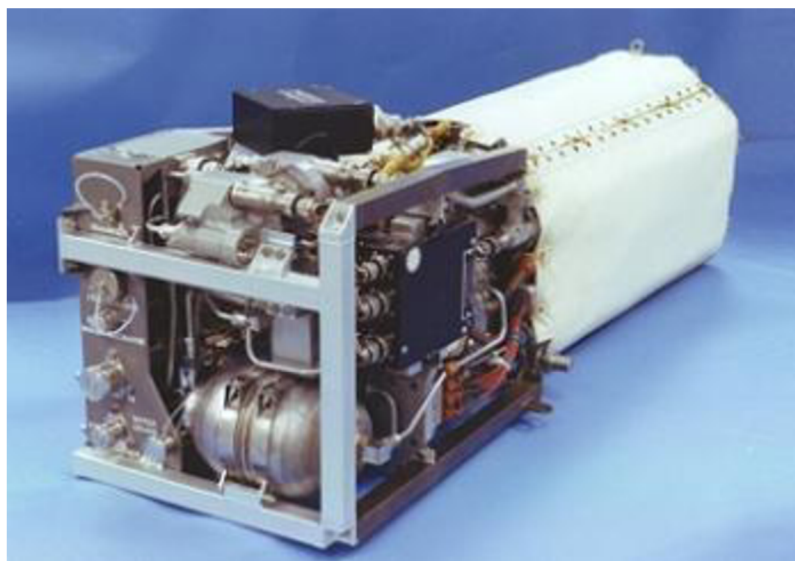
Pohoný systém osobního automobilu využívajícího palivový článek se příliš neliší od systému, který využívají vodíkové autobusy. Celý koncept bude popsán v další části této práce.

3.6 Letectví

Pohon využívající palivový článek je opravdu zajímavý napříč všemi průmyslovými odvětvími. V letectví se jedná především o menší bezpilotní letouny (UAV⁴), které se používají pro sledování, mapování a rekognoskaci terénu. Poptávka po tomto typu vzdušných strojů vzrůstá a s tím i snaha nalézt efektivnější a spolehlivější systém jejich pohonu. Výhoda oproti spalovacím motorům spočívá ve statickém provozu. Absence pohyblivých částí spolu s malou tepelnou stopou je příznivější pro operace v utajení. Nad bateriemi pak vodík vítězí nižší hmotností a energetickou hustotou. Palivové články, pro tyto potřeby převážně PEMFC a také SOFC, na rozdíl od spalovacích motorů navíc neztrácejí na účinnosti při použití v malém měřítku. [2, 30]

Součástí letectví jsou rovněž kosmické lety. Používání palivových článků ve vesmírných raketách v šedesátých letech bylo již zmíněno. Na následující straně (Obr. 3. 2) lze vidět AFC použitý jako zdroj elektrické energie pro potřeby kosmonautů při vesmírných misích programu Apollo. V posledních patnácti letech se NASA k užívání palivových článků opět vrací. Velmi atraktivní jsou palivové články pro kosmické lety mimo jiné proto, že jejich vedlejším produktem je voda, která, spolu se vzduchem a potravinami, je pro kosmonauty ve vesmíru klíčová. [30]

⁴ Zkratka UAV pochází z anglického termínu „unmanned aerial vehicle“.



Obr.3.2 Alkalický palivový článek pro mise Apollo [32]

Palivové články (AFC) byly použity také v raketoplánech. Každý měl tři jednotky palivových článků, kdy jednu tvořil svazek s 96 články a jako elektrolyt byl použit hydroxid draselný. Voda, která vznikla kondenzací páry z reakce, sloužila buď jako chladicí médium nebo přímo pro spotřebu posádky. Každá jednotka vážila asi 120 kilogramů a měnila se po 2 000 hodinách provozu. [33]

3.7 Lodní doprava

Z hlediska lodní dopravy jde především o využití palivových článků ve formě přídatných zdrojů energie. Potenciál nicméně představuje i vodíkový pohon, a to pro ponorky, užitková plavidla (trajekty, nákladní lodě), výletní jachty, čluny a podvodní plavidla. Tento typ pohonu nabízí obvyklé výhody v podobě nízkých nebo nulových emisí, vysoké účinnosti a absence pohyblivých součástí. Na druhou stranu je stále potřeba pracovat a vylepšovat problémy se spolehlivostí, životností a tolerancí palivových jednotek vůči slanému mořskému vzduchu. [30]

Nejlepšími kandidáty pro pohon plavidel jsou v současné době články PEMFC, MCFC a SOFC. Na konci minulé dekády vyvinulo Německo první dopravní loď s hybridním pohonem, který kromě baterií využíval také PEMFC. Loď vykazovala dvojnásobnou účinnost ve srovnání s čistě dieselovým pohonem. O rok později sestrojili svou vlastní vodíkem poháněnou loď také Rakušané. Systém využívá energii ze solárních panelů pro elektrolýzu vody, a její produkt, vodík, posílá do palivového článku. Výsledky studií ukazují, že reformace tradičních paliv přímo na palubě a následné využití vodíku je příznivé pro komerční lodní přepravy. [30]

Lodní doprava je na mnoha místech naprosto klíčová. Na západním pobřeží Norska představuje jeden z hlavních způsobů spojení napříč rozlehlými fjordy. Již několik let se experimentuje s loděmi na elektrický pohon, ovšem teprve palivové články by mohly vyřešit problém s malými dojezdy. V současnosti se realizuje ambiciózní projekt ve Floroe, jehož cílem je vývoj třicetimetřového rychlostního trajektu, který by měl být uveden do provozu v roce 2021. Toto by představovalo výraznou pomoc v oblasti, kde se lodní doprava podílí na znečištění ovzduší pětapadesát procenty. [34]



Obr.3.3 Projekt expresního trajektu s vodíkovým pohonem v norském Floroe [34]

Námořní doprava rovněž nabízí možnosti armádního využití. Vývoj ponorek využívajících PEMFC vedený Německem pro potřeby německé a italské armády přinesl velmi zajímavé výsledky. Ponorky využívají hybridní pohon, který se skládá z palivového článku, diesellového generátoru a baterií. Mezi hlavní přednosti těchto ponorek patří délka ponoru bez nutnosti doplnění paliva. Německé ponorky jsou schopny s využitím zásob kyslíku a vodíku zůstat pod hladinou až několik týdnů, zatímco čistě diesellový pohon dovoluje maximálně dva dny bez doplnění paliva. Jelikož palivový článek využívá čistý kyslík a ne vzduch, jeho účinnost dosahuje až 70 %. V neposlední řadě mají tyto ponorky jen nepatrnou hlučnost, magnetickou a tepelnou stopu v porovnání s ponorkami diesellovými a nukleárními. Všechny tyto faktory značně ztěžují jejich identifikaci a hodí se tedy pro různé armádní mise. [30]

4 Autobus na vodíkový pohon

Doposud jsme se zabývali obecnými informacemi o vodíku, jakožto potenciálním nástupci fosilních paliv v budoucnosti. Nejslibnější je kombinace vodíku a technologie palivového článku, o níž byla řeč v předchozí části. Nyní se zaměříme na aplikaci vodíkového pohonu ve formě palivového článku pro motorizovanou dopravu, a to konkrétně její využití v oblasti městské hromadné přepravy osob.

Vodíkové technologie pro dopravu mají stále mnoho nevyřešených problémů a nedostatků, se kterými se musí výrobci vypořádat. Přestože již dnes existují automobilky, které experimentují s vodíkovým pohonem, na masovou produkci a užívání vozidel s palivovým článkem si bude muset lidstvo ještě pár let počkat. V České republice se například teprve chystá stavba první komerční vodíkové čerpací stanice.

Autobusy hromadné dopravy s vodíkovým pohonem nejsou dnes schopné ekonomicky soupeřit s tradičními typy pohonů, především díky nerozvinutosti vodíkových technologií. Rozdíl je ještě patrnější než u osobních automobilů, díky vysokým požadavkům na odolnost a spolehlivost. Vývoj některých společností (Daimler, Toyota, Ballard) ovšem přispívá k postupnému snižování nákladů na tuto technologii. [30]

Hlavním rozdílem oproti osobním automobilům je skladování paliva a jeho doplňování. Autobusy se pohybují na předem stanovených trasách o daných vzdálenostech a opakovaně se vrací do centrálního depa, což nevyžaduje budování rozsáhlé sítě čerpacích stanic. Skladování paliva na palubě vozidla je rovněž jednodušší. V neposlední řadě je potřeba opět zmínit dopad na životní prostředí. Mnoho velkých měst se dnes potýká s vysokým stupněm znečištění. Mnohdy, převážně v evropských metropolích, vidíme snahu dostat osobní automobily pryč z centra a podpořit užívání prostředků hromadné dopravy, případně i jízdních kol. Autobus, využívající jako své palivo vodík, by mohl podstatně napomoci zlepšení smogové situace a čistého ovzduší. [22]

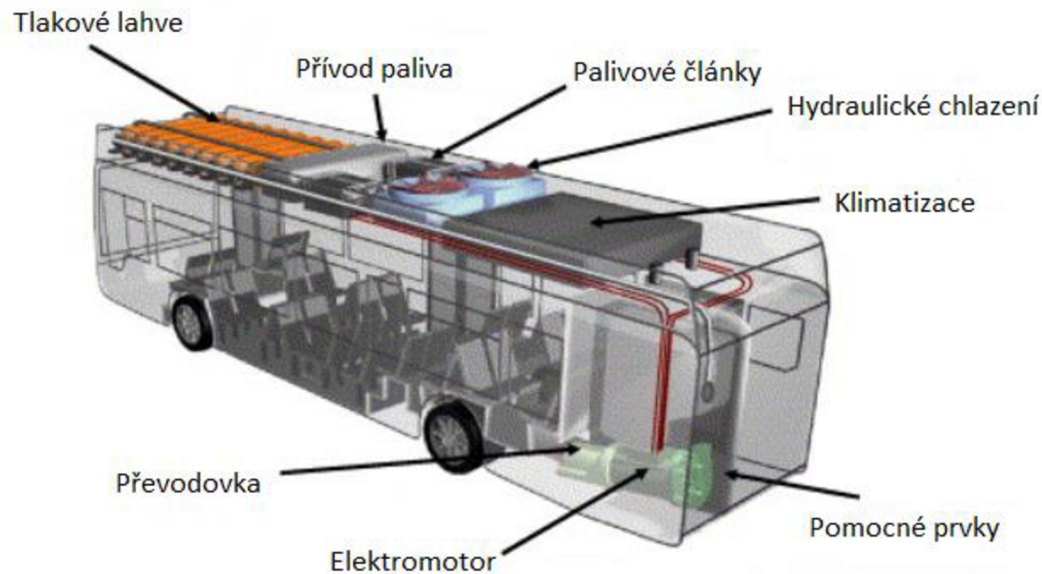
4.1 Pohon

Palivový článek je často srovnáván s klasickými bateriemi. Byť mohou být obě technologie použity v obdobných aplikacích a mají řadu společného, je mezi nimi také jeden zásadní rozdíl. Zatímco baterie je zdroj energie, palivový článek je pouhý prostředek přeměny energie a potřebuje neustálý přísun nějakého nosiče energie pro vlastní pohon. [35]

Nejvýhodnější je spojení palivového článku, baterií a ultrakapacitorů⁵. Velikost a váha baterií a palivových článků se zvyšuje s rostoucím výkonem. Navíc mají dlouhý čas náběhu, nízký výkon při malých rychlostech a pomalý reakční čas při požadavku na okamžité zvýšení dodávky výkonu v momentě zrychlení. Použití superkapacitorů je zatím jediný způsob, jak tyto nevýhody odbourat. [35]

Vozidlo využívající palivový článek se skládá z několika základních komponentů. Jedná se o systém palivových článků, elektromotor s řídicí jednotkou, baterie, hlavní řídicí jednotku a řídicí jednotku, která se stará o spojení palivového článku a baterií. Hlavní řídicí jednotka kontroluje celkový výkon systému a přesun energie mezi článkem, bateriemi a hnacím ústrojím na základě pokynů řidiče skrze ovládací systém. Řídicí jednotka porovnává výkon palivového článku s aktuální potřebou vozidla a přizpůsobí pohon dané situaci. Napájení vozidla pomocí článků bez externího zdroje energie vyžaduje vlastní elektrický okruh uvnitř vozidla. [35]

⁵ Ultrakapacitory, někdy také superkapacitory, jsou kondenzátory s velmi vysokou kapacitou.



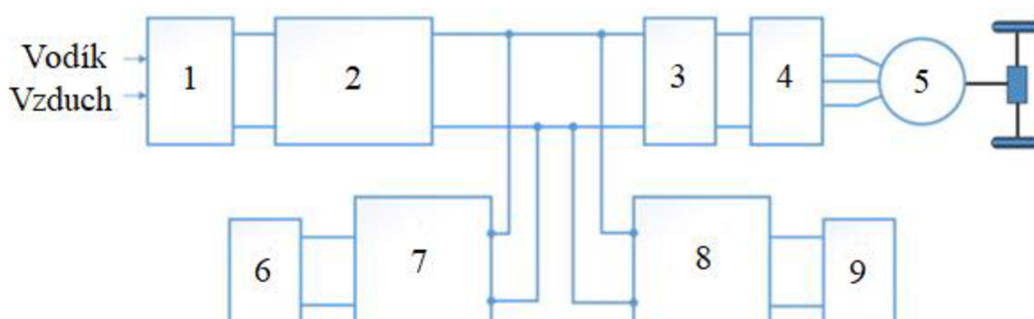
Obr.4.1 Mercedes-Benz Fuel Cell Citaro [36]

Obrázek 4. 1 ukazuje starší variantu vodíkového autobusu Mercedes-Benz Fuel Cell Citaro od německé automobilky Daimler.

4.1.1 Architektura pohonného systému

Jak už bylo zmíněno, je nutné zařazení sekundárního zdroje energie do systému. Palivové články samotné se totiž špatně přizpůsobují změnám požadavků na výkon a nejsou schopny využívat rekuperaci. Při běžném stavu je motor poháněn palivovým článkem. Při nutnosti zvýšení výkonu, zpravidla pro zrychlení nebo jízdu do kopce, je elektromotor poháněn současně bateriemi i palivovým článkem. Samotný palivový článek není příliš efektivní při malém odběru výkonu, proto v takovém případě jeho činnost ustane a pohon je zajišťován pouze bateriemi. Při brzdění dochází k rekuperaci energie, podobně jako je tomu u tramvají nebo elektrických lokomotiv. Motor současně brzdí kola vozidla a funguje jako generátor. [35]

Palivový článek je zdrojem stejnosměrného napětí, což je rovněž vyžadováno pro dobíjení baterií. Pro pohon elektromotoru je nutná konverze na střídavé napětí. Je nutné do systému rovněž zabudovat další měniče napětí pro přídatné systémy, jako jsou klimatizace, palivové a olejové čerpadlo nebo posilovač řízení. [35]



Obr.4.2 Konfigurace vozidla s vodíkovým pohonem (1- palivový článek, 2 – měnič napětí palivového článku, 3 – přídatné systémy, 4 – konverze stejnosměrného napětí na střídavé, 5 – elektromotor, 6 – baterie, 7 – měnič napětí baterie, 8 – měnič napětí superkapacitoru, 9 – superkapacitor) [35]

Obrázek 4. 2 ukazuje vnitřní konfiguraci vozidla využívajícího systém palivových článků, baterie a superkapacitory.

Baterie jsou ve vozidle preferovány pro svou vysokou energetickou hustotu a spolehlivost. Superkapacitory mají o něco větší hustotu výkonu, jelikož uchovávají elektrický náboj na speciálně navržených elektrodách a mají nižší vnitřní odpor. Rovněž mají oproti bateriím vyšší účinnost, životnost a rychlejší nabíjení. [35]

4.2 Skladování paliva ve vozidle

Autobusy skladují plyný vodík stlačený na maximum 350 barů v kompozitových tlakových lahvích, které lze uložit na střeše. Jelikož u autobusu není prostor tak velkým problémem jako u osobního automobilu, není potřeba stlačování na 700 barů. Plyný vodík je podstatně lehčí než vzduch, tudíž je skladování na střeše rovněž považováno za velmi bezpečnou variantu. [22, 30]

Experimentuje se také se skladováním vodíku v kovech. Například hořčík dokáže pojmout 7,6 hm.% vodíku. Samotný hořčík, byť levný a lehký, není pro svou chabou kinetiku příliš vhodný. Pro skladování vodíku za pokojových teplot je možné využití hořčíkovo-niklových povlaků na uhlíku. Tato technologie by mohla najít uplatnění právě v automobilovém průmyslu. [35]

4.3 Čerpací stanice

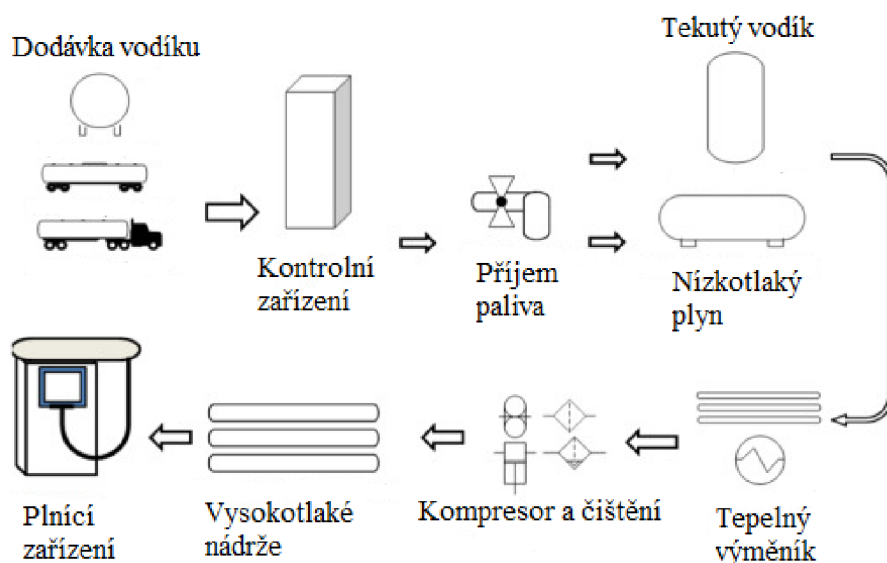
Jednou z nejdůležitějších součástí infrastruktury na podporu vodíkových vozidel jsou právě čerpací stanice. Ať už jde o pohon palivových článků, nebo spalovací motory pracující na vodík, nemůže být vodíkový pohon bez dostatečně rozvinuté čerpací sítě maximálně využíván. Její vybudování musí přijít zároveň se zvýšením provozu vodíkových vozidel, jelikož investice do rozsáhlé infrastruktury nelze provádět bez adekvátní poptávky ze strany spotřebitelů paliva. [37, 38]

Existují dva typy vodíkových čerpacích stanic. V jednom případě je vodík vyroben jinde a poté dopraven na stanici. Druhá cesta je produkce přímo na místě. V praxi se setkáme i s kombinací obou možností. Ve chvíli, kdy je vodík k dispozici je postup stejný jako v běžných čerpacích stanicích. Dochází ke skladování ve velkých nádržích, přesunu do plnicího zařízení a konečně k tankování do vozidla. U stlačeného plynného vodíku vypadá plnicí zařízení obdobně jako pro LPG, včetně systému připojení k vozidlu. [37]

4.3.1 Stanice s dodávkou vodíku

Součástí je obecně šest hlavních prvků:

- Příjímací port, přes který putuje stlačený plyný vodík nebo tekutý vodík z potrubního systému nebo přepravníku.
- Kontrolní zařízení, které sleduje transfer a skladování vodíku, včetně ventilů a čerpadel. Rovněž dohlíží na bezpečnost celého procesu.
- Tepelný výměník pro ohřev vodíku (přeměna na plyn) před stlačením. Distribuční systém potrubí, ventilů apod.
- Kompresor pro stlačení vodíku na 350 nebo 700 barů.
- Zásobník tekutého vodíku. Vysokotlaké a nízkotlaké (po přeměně z kapalného stavu) zásobníky plynného vodíku.
- Plnicí zařízení pro tankování paliva do vozidel pomocí vysokotlakých trysek. [37]



Obr.4.3 Jednotlivé prvky čerpací stanice s externí dodávkou vodíku [37]

4.3.2 Stanice s vlastní produkcí

Zdrojů pro výrobu vodíku může být několik. Existují příklady využívající vodu, fosilní paliva nebo biomasu. Volba metody pak závisí především na zdroji energie. Někdy se může jednat o obnovitelné zdroje (větrné nebo solární), jindy fosilní paliva. Dvě nejpoužívanější metody výroby vodíku jsou vodní elektrolýza a parní reformace methanu. [37]

4.3.3 Čerpací stanice ve světě

Podle každoročního vyhodnocení webu H2stations.org⁶ bylo na konci roku 2017 v Evropě 139 vodíkových čerpacích stanic, 118 v Asii, 68 v Severní Americe a po jedné v Austrálii a Jižní Americe. Největší počet stanic se nachází v Japonsku (91), vztaženo na počet obyvatel pak vede Dánsko. [39, 40]

V Evropě je na tom nejlépe Německo (56). Právě zde se plánuje nárůst na 100 stanic do roku 2019. Přibližně 28 % z evropských vodíkových stanic využívá zdroje s nulovými emisemi. Tyto stanice se nacházejí v sedmi ze sedmnácti evropských zemí, které mají vybudovanou alespoň jednu vodíkovou stanici. [37, 39]

V Německu se také nacházejí dvě největší evropské vodíkové čerpací stanice: Sachsendamm a menší Total-BVG H₂ (obě Berlín). Právě menší z nich byla otevřena v roce 2002 a využívá dvou metod produkce vodíku: dodávka tekutého vodíku a jeho výroba na místě pomocí PEM elektrolýzérů. V roce 2007 bylo přidáno reformační zařízení, které je schopno vyprodukovat dostatek vodíku pro sedm autobusů. Stanice je využívána pro autobusovou dopravu, jak pro motory s vnitřním spalováním, tak pro autobusy s palivovým článkem. [37]

4.4 TriHyBus

Vozidlo vzniklo jako součást projektu vodíkových technologií pro palivové články, transport a energetické využití, pod patronací Ústavu pro jaderný výzkum v Řeži. Dodnes bylo jediným projektem tohoto typu v České republice a zároveň jediným vodíkovým autobusem, který kdy byl v ČR v běžném provozu. Cílem tohoto projektu byla podpora

⁶ Internetová stránka patří společnostem Ludwig-Bölkow-Systemtechnik a TÜV SÜD.

využívání vodíku pro dopravu, dodávku elektrické energie a jeho přispění k udržitelnému rozvoji v České republice. [41]

Autobus je postaven na konceptu trolejbusu Škoda Electric a využívá pohonného systému Triple-hybrid, což je kombinace palivových článků, lithium-iontových trakčních baterií a superkapacitorů. Poslední dva zdroje jsou používány také pro rekuperaci energie. Vodík je na palubě vozidla skladován při 350 barech ve čtyřech vysokotlakých kompozitových lahvích s celkovým objemem 820 l. Lahve jsou uloženy na střeše vozidla a pojmu přibližně 20 kg paliva. [42]

4.4.1 Tankování paliva

Čerpací stanice byla postavena, speciálně pro tento projekt, v Praze-Neratovicích, kde byl autobus nasazen do provozu. Vodík je zde uskladněn ve formě plynu, stlačený na 45 barů. Ze zásobníku jde do kompresní stanice a zde je ve dvou stupních stlačován do svazku tlakových lahví. Vodík je ukládán ve dvou sekcích; 300 barů a 450 barů. Před tankováním dojde ke změření tlaku v nádrži, pak se vzhledem k okolní teplotě a ohřátí plynu dopočte koncový tlak. Plnění je ukončeno při dosažení požadovaného koncového tlaku. Kompresor je poháněn hydraulicky a chlazen olejem, samotná kompresní stanice je z bezpečnostních důvodů umístěna v betonovém kontejneru. [42]



Obr.4.4 TriHyBus [42]

4.4.2 Technické parametry

- 12 m dvounápravový autobus
- Elektromotor 120 kW
- Palivový článek 48 kW
- Akumulátory Li-ion 28 kWh
- Maximální rychlost omezena na 65 km/h
- Dojezd 300 km
- Spotřeba 7-8 kg H₂/km

- Maximální špičkový výkon 200 kW
- Objem paliva 820 l [41]

4.5 Toyota SORA

Nejnovějším přírůstkem do rodiny vodíkových autobusů je model SORA⁷ od japonské značky Toyota. Jedná se o první vodíkový autobus, který získal v Japonsku technické oprávnění. Autobus využívá systému palivových článků, který byl původně vyvinut pro model osobního automobilu Toyota Mirai. Vodíkový pohon zapadá do celkové strategie značky Toyota. Snaží se přispět k celkovému zlepšení životního prostředí a co nejvíce minimalizovat dopad moderní společnosti na přírodu. SORA by se měla stát hlavním dopravním prostředkem pro účastníky a návštěvníky olympijských her v roce 2020 v Tokiu. Další velmi zajímavou vlastností modelu je možnost využití pro dodávku elektrické energie⁸ v nouzových situacích, například při živelné katastrofě. [43, 44]



Obr.4.5 Toyota SORA [43]

4.5.1 Technické parametry

- Rozměry: 10,525/2,490/3,350 m
- Kapacita 78 cestujících
- Dva svazky palivových článků, každý o výkonu 114 kW
- Elektromotor o výkonu 2 x 113 kW
- Točivý moment 2 x 335 Nm
- Objem paliva 600 l [43]

⁷ Název SORA je zkratka anglických slov Sky, Ocean, River, Air (překl.: obloha, oceán, řeka, vzduch), což má symbolizovat vodní cyklus na Zemi. [43]

⁸ Autobus je schopen produkovat až 235 kWh při plné nádrži. [43]

5 Porovnání pohonných systémů městských autobusů

Důvodem, proč se zajímat o alternativní zdroje energie pro potřeby městské hromadné dopravy je snížení produkce skleníkových plynů silniční dopravou a zlepšení smogové situace a celkové kvality ovzduší. Toto není tak palčivý problém v menších městech, kde je MHD realizována pouze na několika málo linkách o nízké frekvenci spojů. Oproti tomu ve větších metropolích, jako Praha nebo Brno, způsobuje veřejná doprava zásadní podíl na tvorbě uhlíkové stopy a produkci zdraví škodlivých látek.

Ve velkých městech je doprava realizována mnoha způsoby. V evropských městech jsou nejčastějšími druhy veřejné dopravy autobusy, tramvaje, trolejbusy, v případě největších metropolí také metro a vlaky. Tato část si klade za úkol porovnat jednotlivé druhy způsobu pohonu autobusové dopravy s důrazem na ekonomické náklady spojené s pořízením a provozem, a ekologický dopad na okolí, který má jejich užívání. Tramvaje, vlaky, trolejbusy a metro lze, co se týče produkce emisí při samotném provozu, považovat za způsoby ekologicky čisté. Jejich srovnání je rovněž poněkud složitější, jelikož potřebují mnohem nákladnější infrastrukturu a nejsou vhodné pro všechny oblasti města. Stejně tak nezahrnujeme využívání taxi služeb, případně Uber, jelikož se nejedná o prostředky veřejné hromadné dopravy.

Česká republika má jedinou zkušenost s vodíkovým autobusem v rámci projektu TriHyBus. Jedná se ovšem o projekt unikátní, který nepočítá s masovou produkcí, a z toho důvodu jsou údaje o ceně, především té pořizovací, zavádějící a nevhodné pro srovnání s jinými příklady z praxe. Náklady spojené se spotřebou paliva pro TriHyBus budou na konci kapitoly zmíněny.

Údaje o emisivitě, stejně jako většina údajů ekonomických, jsou převzaty ze studií prováděných v zahraničí a slouží tedy pouze pro orientační srovnání. Je třeba si uvědomit, že se jedná o velmi rychle se rozvíjející odvětví průmyslu, které s největší pravděpodobností čeká v nejbližších letech velké množství zdokonalování a úprav. Tato skutečnost může zapříčinit, že reálná data získaná v horizontu několika let při případném zavedení na český trh a provozu v českých městech, se budou od zde představeného modelu více či méně lišit.

5.1 Ekonomické porovnání

Již bylo zmíněno, že vodíkové technologie jsou stále rozvíjeny. Ceny jednotlivých komponentů, zejména palivových článků, jsou vysoké, což značně ztěžuje jejich konkurenceschopnost na trhu. Tato část nabízí ekonomické srovnání vodíkového autobusu s autobusy využívajícími jiné typy pohonu. Zaměřuje se jak na pořizovací ceny, tak provozní náklady.

5.1.1 Pořizovací náklady

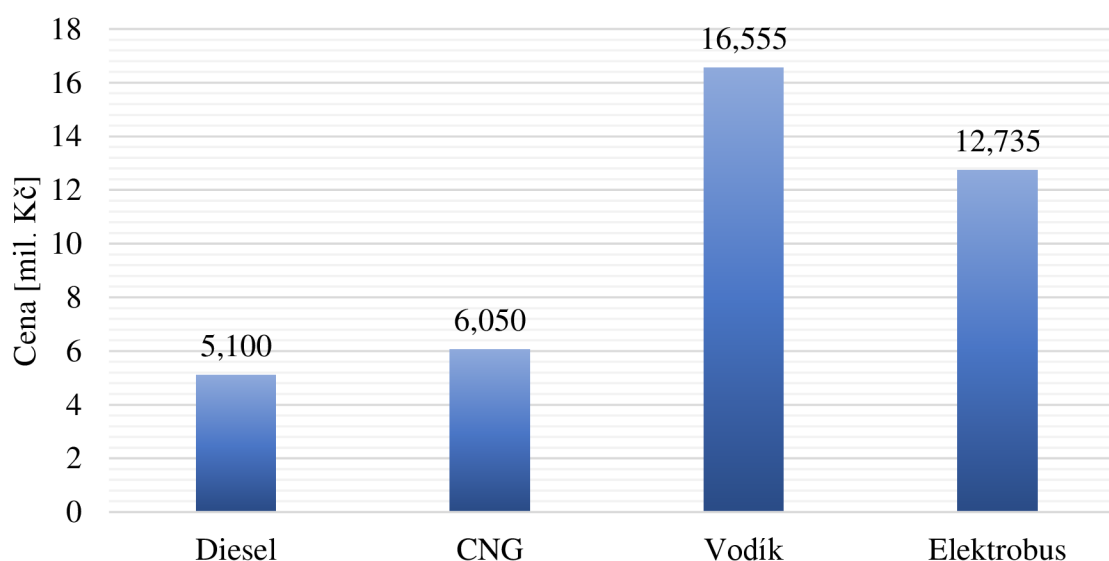
U pořizovacích cen vodíkových autobusů je možné pozorovat dlouhodobě sestupný trend. Vlivem rostoucího objemu vyprodukovaných modelů klesla cena od devadesátých let o více než 75 %. Na zvýšení poptávky mají celosvětově nezanedbatelný podíl dotace, které jednotlivé státy poskytují na rozvoj a propagaci ekologicky šetrných dopravních prostředků. [45]

Dvanáctimetrové autobusy společnosti Van Hool, které byly začleněny do provozu v Londýně v roce 2016 stály €650 000 (16 555 500 Kč⁹), z čehož byl příspěvek na dotacích €200 000 (5 094 000 Kč). Výsledná cena tedy činí €450 000 (11 461 500 Kč), přičemž cena stejného autobusu s dieselovým pohonem je zhruba €300 000 (7 641 000 Kč) a €550 000 (12 735 000 Kč) za autobus poháněný elektřinou z baterií. Společnost Ballard¹⁰ ve své předpovědi uvádí, že cena autobusu s palivovým článkem by se do roku 2020 mohla, bez započítání případných dotací, snížit pod €450 000 (11 461 500 Kč). [45]

V tabulce (5.1) můžeme vidět ceny autobusů v kategorii „městský do 13 m“ s dieselovým a CNG pohonem. Tyto ceny každoročně dle zákona zveřejňuje Ministerstvo dopravy pro kalkulaci ziskovosti dopravních podniků. Nejedná se tudíž o přesné ceny, za které je pořízen každý autobus, ale o ceny, ke kterým se chtějí dopravní podniky přiblížit, nebo nejlépe pod které se snaží při koupi nových autobusů dostat, což je ve výsledku částka ještě směrodatnější.

Tab.5.1 Ceny autobusů stanovené ministerstvem dopravy pro rok 2017 [46]

Typ Autobusu	Cena v Kč
Nízkopodlažní autobus do 13 m s dieselovým pohonem	5 100 000
Nízkopodlažní autobus do 13 m s plynovým pohonem	6 050 000



Obr.5.1 Pořizovací ceny městských autobusů s jednotlivými typy pohonu

Graf (Obr.5.1) ukazuje porovnání výše zmíněných pořizovacích cen autobusů s jednotlivými druhy pohonu. Berme na vědomí, že jelikož v České republice nejedí žádné vodíkové autobusy tradičních výrobců, ceny těchto modelů byly přepočítány ze zahraniční měny, což způsobuje jistou nepřesnost. Rovněž se nejedná o údaje ze stejného roku a stejných zdrojů. Cena dieselového autobusu v Česku je o zhruba 33 % nižší, než cena stejného typu autobusu v Británii. Pokud bychom počítali se stejným poměrem, cena vodíkového autobusu

⁹ Tato cena, stejně jako všechny ostatní ceny uvedené v zahraniční měně, byly přepočítány na kurz eura platný k 27.4.2018: €1 = 25,47 Kč.

¹⁰ Ballard je kanadská společnost, která se specializuje na vývoj palivových článků. Mimo jiné dodává technologii například belgickému výrobcí autobusů VanHool. [45]

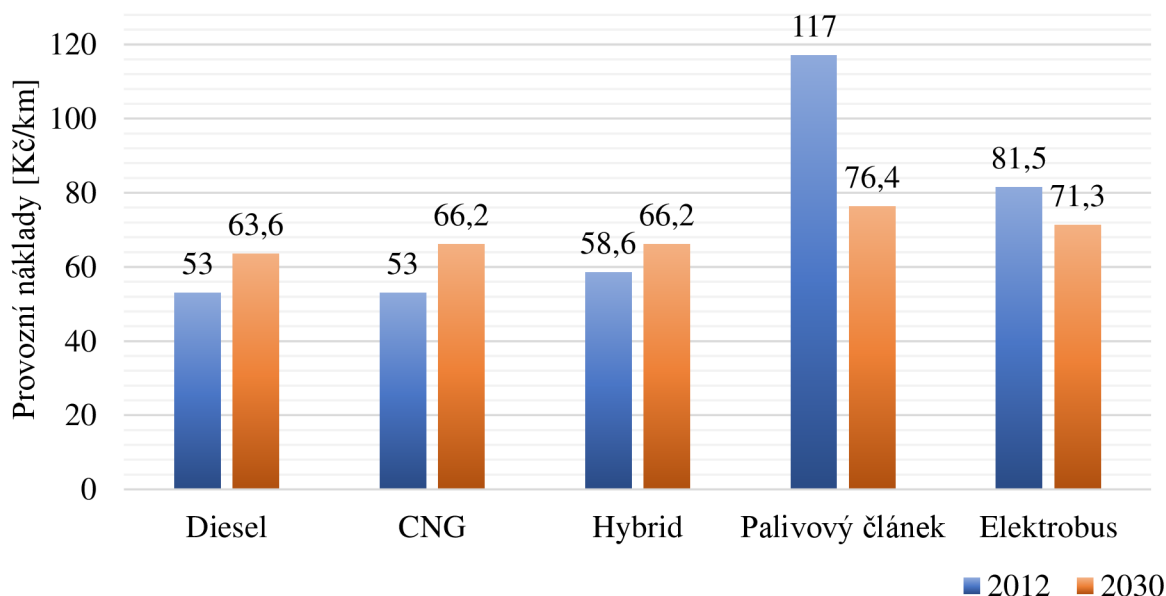
by byla v České republice 11 100 000 Kč. I v takovém případě je cena za autobus s vodíkovým pohonem více než dvojnásobná ve srovnání s klasickým naftovým a téměř dvojnásobná v porovnání s CNG. Některé zdroje uvádějí cenu vodíkového autobusu dokonce šestinásobnou v porovnání s naftovým pohonem. [48]

Nové a rozvíjející se technologie často bojují s finanční bariérou, kterou je třeba překonat pro zavedení masové produkce. Ve světě existuje řada příkladů, kdy vodíkové autobusy dostaly potřebnou důvěru a jejich začlenění do provozu proběhlo skvěle. Jedná se ale stále o města s vysokými rozpočty a ani tam by pravděpodobně nemohly projekty vzniknout bez značné finanční pomoci ve formě dotací. Pro menší města zřejmě zůstane doprava opírající se o palivové články v nejbližší budoucnosti mimo jejich finanční možnosti.

5.1.2 Provozní náklady

Ze studie, provedené v roce 2015, která srovnávala náklady na údržbu při provozu autobusů v porovnatelných podmínkách, vychází €0,40/km (10,11 Kč/km) pro vodíkový autobus a €0,30/km (7,64 Kč/km) pro dieselový. U vodíkového pohonného systému se nepočítá s žádnými většími opravami, vyjma výměny ložisek, což je způsobeno především eliminací pohyblivých součástí. Obecně se tedy předpokládá, že náklady na údržbu budou výhledově stejné nebo nižší než ty u dieselového autobusu. Předpovědi počítají s dosažením údržbové ceny dieselu (€0,30/km) do roku 2025. [45]

S vysokými účinnostmi, které palivové články nabízejí, se předpokládá, že náklady na vodík budou v budoucnu nižší, než náklady na naftu, která podléhá spotřební dani a její cena výrazně poroste spolu se snižujícími se světovými zásobami. Toto je ovšem situace, u které nevíme, jak dlouho bude trvat. Zavedení spotřební daně na nefosilní paliva se jeví jako pravděpodobný scénář v souvislosti s ústupem paliv fosilních. Již dnes se hovoří o zavedení spotřební daně na LPG. [45]

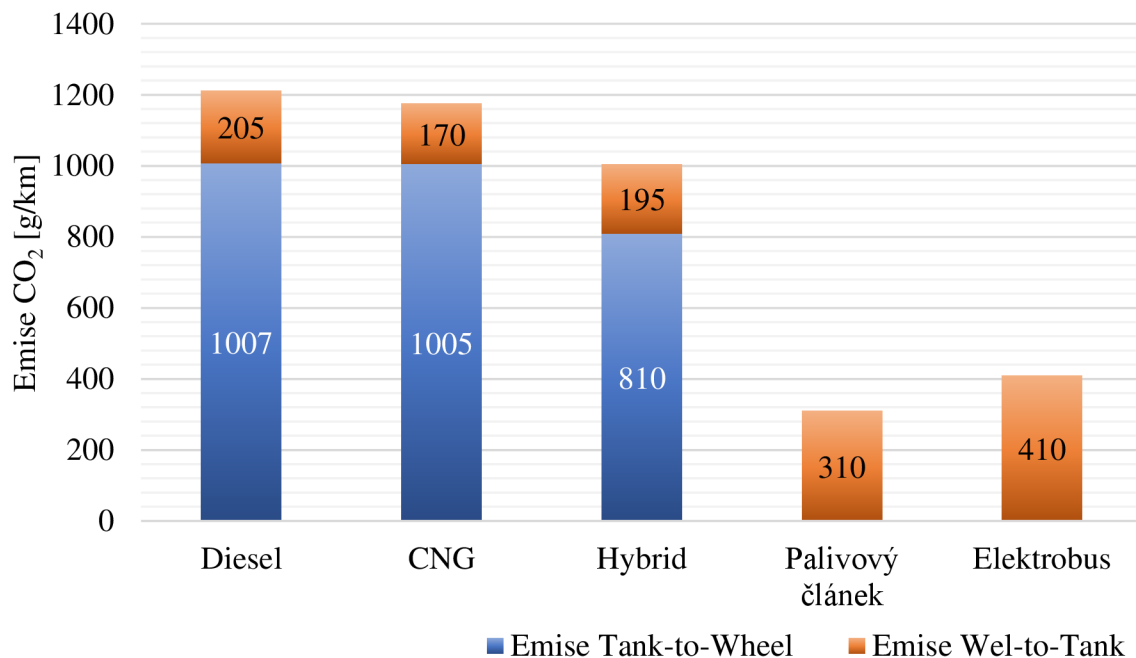


Obr.5.2 Provozní náklady autobusů podle typu pohonu [49]

Graf (Obr.5.2) vznikl na základě dat získaných v rámci studie provedené v roce 2012 Evropskou unií ve spolupráci s Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU)¹¹. Cena zahrnuje náklady na provoz, náklady na zařízení a také náklady spojené s vybudováním infrastruktury. Jsou zde ukázána data aktuální v době vzniku studie (2012) a rovněž předpověď pro rok 2030. U nákladů na provoz autobusu s palivovým článkem se předpokládá až 35% pokles. V takovém případě se rozdíl mezi vodíkem a dieselem sníží z více než dvojnásobku na zhruba jednu pětinu. U CNG pohonu by měl být rozdíl ještě menší.

5.2 Ekologický dopad

Produkce emisí CO₂ související s provozem vozidla se dají rozdělit na dvě skupiny. Jedna z nich představuje množství emisí pocházející z těžby a zpracování paliva (tzv. Wel-to-Tank), ta druhá produkci oxidu uhličitého v rámci samotného provozu (tzv. Tank-to-Wheel). Spalování fosilních paliv výrazně přispívá k tvorbě skleníkového efektu, zatímco vodík ani elektrobuses nevytvářejí při provozu žádnou uhlíkovou stopu pocházející přímo ze spotřeby paliva.



Obr.5.3 Emise CO₂ pro jednotlivé koncepty vztahované na 1 km provozu [48]

Je jasné vidět, že uhlíková stopa vytvořená palivovým článkem je několikanásobně nižší než u diesellového, CNG a hybridního pohonu. U elektrobuses představuje jistou ekologickou zátěž výroba baterií, samotná elektrická energie pak může být bezemisní při použití obnovitelných zdrojů, jako solární nebo větrná energie. Hodnota produkce CO₂ při výrobě vodíku je průměrná, s ohledem na její různé způsoby. Například při výrobě vodíku elektrolýzou v kombinaci s elektrickou energií z alternativních zdrojů se bude množství CO₂ vztahované na kilometr provozu limitně blížit nule.

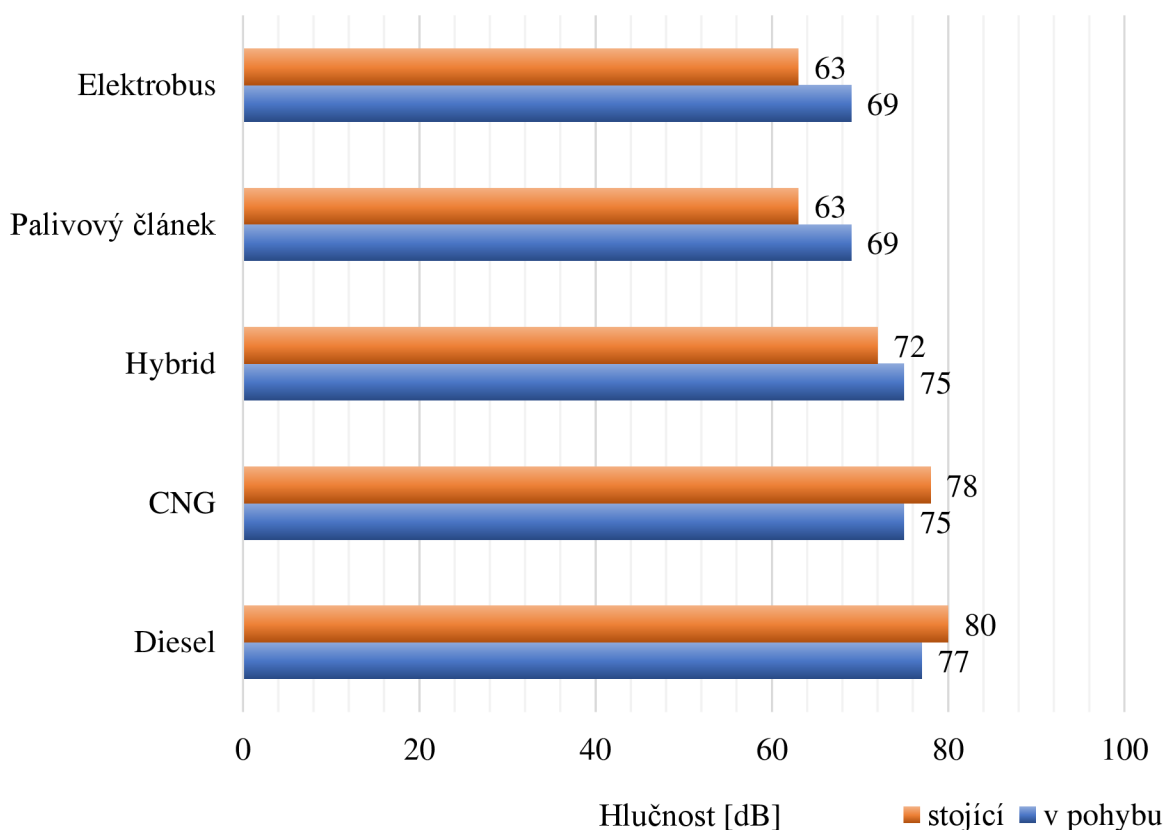
Z ekologického hlediska ovšem nelze mluvit pouze o emisích CO₂. Jak již bylo řečeno, ty sice zásadně přispívají globálnímu oteplování, ovšem samy o sobě nejsou pro člověka škodlivé. Spalováním uhlíkatých paliv dochází k produkci celé řady škodlivých

¹¹ FCH JU je evropská organizace, která finančně podporuje výzkum vodíkových technologií a palivových článků.

látek, které jsou zdraví nebezpečné. Mezi nejzásadnější patří oxid uhelnatý, vznikající nedokonalým spalováním uhlíkatých paliv, SO_2 , sloučeniny typu NO_x , amoniak a mnohé další. Jak už bylo výše zmíněno, jediným přímým produktem práce palivového článku je voda. Jeho využívání tedy přispívá ke snížení produkce všech těchto látek.

Dalším palčivým problémem je produkce prachových částic. Ty jsou jedním z nejvíce zdraví ohrožujících produktů dopravy. Nebezpečné jsou zejména ty nejmenší, které se snadno dostanou do dýchacích cest a oběhového systému lidského organismu. Bylo prokázáno, že prachové částice snižují délku dožití a zvyšují kojeneckou úmrtnost. [50] Ve městech lze jejich zvýšenou koncentraci zaznamenat například v okolí autobusových stanic. Polétavý prach je z velké části způsoben dopravou, přesněji řečeno spalováním paliv¹². Produkce prachových částic ze samotného provozu palivového článku je stejně jako v případě všech dalších zmíněných látek nulová.

Obyvatelé a životní prostředí nejsou zatěžováni pouze produkcí emisí, ale doprava je ovlivňuje také svým hlukem. Velké problémy činí především rezidentům v okolí frekventovaných tras. Následující graf ukazuje srovnání jednotlivých pohonných konceptů.



Obr.5.4 Hlučnost jednotlivých pohonných konceptů [48]

Podle očekávání jsou výsledky nejpříznivější pro vodíkový autobus a elektrobus. Oba pohání elektromotor, který se mimo jiné vyznačuje svým tichým chodem, jak ostatně již dnes můžeme pozorovat u osobních automobilů na elektrický pohon. Rozdíl mezi vodíkovým

¹² Produkce prachových částic z dopravy nepochází pouze ze spalování paliv. Určitá část je například spojena s třením pneumatik o vozovku. Tento faktor pochopitelně změnou pohonu nezmizí, množství částic je ovšem podstatně menší, než ze spalování.

a diesellovým autobusem je větší, než se na první pohled může jevit. Pokud vezmeme v úvahu výsledky mnohých studií, že dlouhodobé vystavování se hluku nad 70 dB¹³ může vést k poškození sluchu, jsou získané poznatky ještě zásadnější. [48]

5.3 Modelový příklad města Brna

Dopravní situace v Brně je podle mnohých expertů na pokraji kolapsu. Během dopravních špiček ve všední dny jsou ulice ucpané a doba jízdy se značně prodlužuje. Vysoký počet osobních automobilů má rovněž negativní vliv na ovzduší uvnitř města, a tedy i na kvalitu života jeho obyvatel. Stejně jako v jiných evropských městech je snaha osobní automobilovou dopravu minimalizovat a zvýšit podíl lidí, kteří běžně využívají pro transport veřejnou MHD.

Autobusová doprava představuje v Brně největší podíl přepravních výkonů ze všech druhů MHD, které lze ve městě využít. Vývoj v počtu ujetých kilometrů se sice v posledních třech letech mírně zvýšil, v dlouhodobém horizontu lze ovšem sledovat spíše ustálený trend. Vedení DPMB (Dopravní podnik města Brna) se snaží reagovat na současné trendy ve veřejné dopravě, což lze ilustrovat například začleněním autobusů na stlačený zemní plyn do svého vozového parku v souladu s dlouhodobým plánem na zvyšování ekologičnosti v rámci MHD.

Tabulka 5.2 ukazuje počet kilometrů najetých jednotlivými druhy MHD v Brně v letech 2014-2016. Údaje byly vybrány z výroční zprávy DPMB pro rok 2016, jakožto nejaktuálnější informace dostupné v období vzniku této bakalářské práce, tj. začátek roku 2018.

Tab.5.2 Počet kilometrů pro jednotlivé druhy MHD v Brně (2014-2016) [51]

	2016	2015	2014
tramvaje [tis. km]	14 957	14 331	14 350
trolejbusy [tis. km]	6 241	5 989	5 677
autobusy [tis. km]	17 470	17 256	17 097
celkem [tis. km]	38 668	37 576	37 124

Pro účely této práce poslouží dále pouze údaje o počtu kilometrů pro autobusovou dopravu a zbylé hodnoty jsou uvedeny pouze pro vytvoření rámcové představy o přepravních výkonech brněnské hromadné dopravy.

Zmíněná výroční zpráva uvádí, že v roce 2016 vlastnil DPMB 100 autobusů na stlačený zemní plyn, což tvořilo přibližně třetinu celého autobusového vozového parku. Počet kilometrů najetý v jednotlivých letech je souhrnný pro všechny autobusy vlastněné DPMB bez dalšího rozdělení.

5.3.1 Ekonomické hledisko

Požizovací ceny autobusů se v tomto případě srovnávají poněkud obtížněji, jelikož lze těžko očekávat, že se město rozhodne najednou obměnit celý vozový park, zvláště pokud jde o technologii výrazně dražší než zaběhnuté alternativy a celkové dlouhodobé zkušenosti ze světa jsou stále omezené. Dá se tedy očekávat, že při obměně postupně by kolísala také cena. Pro rámcovou představu lze ovšem uvést jeden příklad. V letech 2014 a 2015 nakoupilo Brno 88 nízkopodlažních dvanáctimetrových autobusů na CNG. [50] Při využití

¹³ Hodnota 63 dB zhruba odpovídá běžné konverzaci, 80 dB se již dá přirovnat k velmi hlasité hudbě z reproduktorů. [48]

pořizovacích cen uvedených v kapitole 5.1, by nákup stejného množství autobusů s palivovým článkem zvýšil náklady projektu téměř o jednu miliardu korun.

Tab.5.3 Celkové provozní náklady vozového parku v letech 2016 a 2030

	2016	2030 ¹⁴	2030 ¹⁵
tramvaje [tis. km]	925 910	1 066 953	1 090 867
trolejbusy [tis. km]	925 910	1 110 571	1 135 462
autobusy [tis. km]	2 043 990	1 281 686	1 310 412

V tabulce 5.3 je vidět porovnání celkových nákladů na provoz pro vodíkový, diesellový a CNG autobus. Pro výpočet ceny v roce 2016 byly použity hodnoty z tabulky 5.2 a grafu (Obr.5.2). Jako cena byla použita hodnota ze studie pro rok 2012, jako nejaktuálnější dohledaná hodnota, pocházející z nezávislé studie. Lze předpokládat, že pokud vezmeme v úvahu predikci sestupného trendu nákladů spojených s provozem vodíkového autobusu, mohla by reálná hodnota v roce 2016 být ještě o něco nižší. Pro výpočet nákladů v roce 2030 byla použita předpověď ceny ze stejné studie. Počet kilometrů pokrytých autobusovou dopravou v roce 2030 byl odhadnut ve dvou variantách. V prvním případě s meziročním poklesem 0,27 %, což je průměrná hodnota vycházející z údajů za posledních sedm let. Ve druhém případě s meziročním nárůstem 1,98 %, což je průměrná hodnota z údajů za poslední tři roky. V modelové situaci došlo ke snížení rozdílu provozních nákladů o 84 % v porovnání s diesellovým autobusem a o 97,5 % ve srovnání s pohonem CNG.

Je třeba vzít v úvahu, že se jedná pouze o modelovou situaci a předpověď ceny i přepravního výkonu se může v reálném případě lišit. Pro poskytnutí rámcové představy jsou ovšem výsledky dostačující. V budoucnosti nejspíš dojde ke značnému přiblížení provozních nákladů všech pohonných konceptů. Vodíkové technologie jsou pomalu na vzestupu a při uvážení, že v roce 2030 bude pravděpodobně již dávno plně rozvinuta masová výroba a využívání vodíkového pohonu, mohly by náklady na provoz, stejně jako pořizovací cena dokonce předběhnout dnes nejpoužívanější typy pohonů.

Zatímco srovnání celkových nákladů hovoří ve prospěch klasických paliv, při srovnání nákladů na spotřebu energie/paliva jsou výsledky příznivější pro vodíkový pohon. Studie provedená v roce 2013 se zaměřila na projekt TriHyBus a provedla analýzu ekonomických nákladů ve srovnání s diesellovým, CNG a dalšími autobusy operujícími na území ČR. Výsledná data ukazují, že pokud budeme měřit pouze náklady na spotřebu energie/paliva, jsou všechny sledované koncepty ekonomičtější než naftový a CNG autobus. Pokud by se podařilo dosáhnout podobných výsledků při provozu v brněnské aglomeraci, celý projekt by se stal značně atraktivnějším. [53]

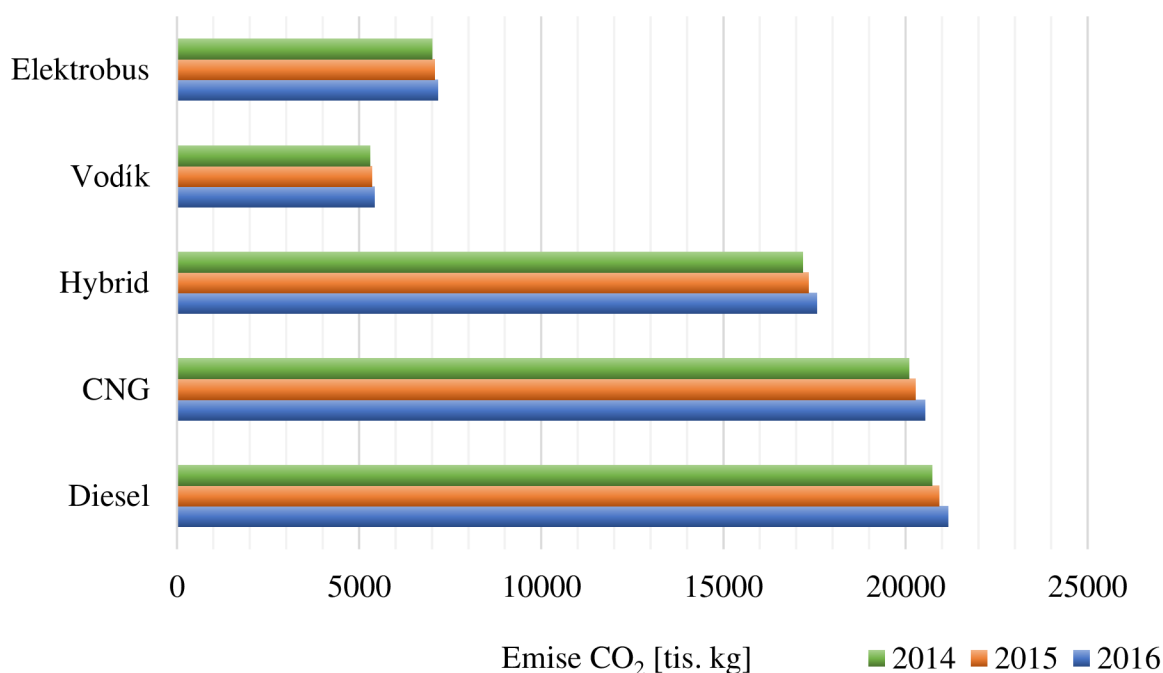
¹⁴ Počet kilometrů v roce 2030 byl vypočten na základě průměrného ročního úbytku kilometrů pokrytých autobusovou dopravou v posledních 7 letech. Hodnota byla vypočítána na základě údajů z výročních zpráv DMBP za dané roky. [51]

¹⁵ Počet kilometrů v roce 2030 byl vypočten na základě průměrného ročního příbytku kilometrů pokrytých autobusovou dopravou v posledních 3 letech. Hodnota byla vypočítána na základě údajů z výročních zpráv DMBP za dané roky. [51]

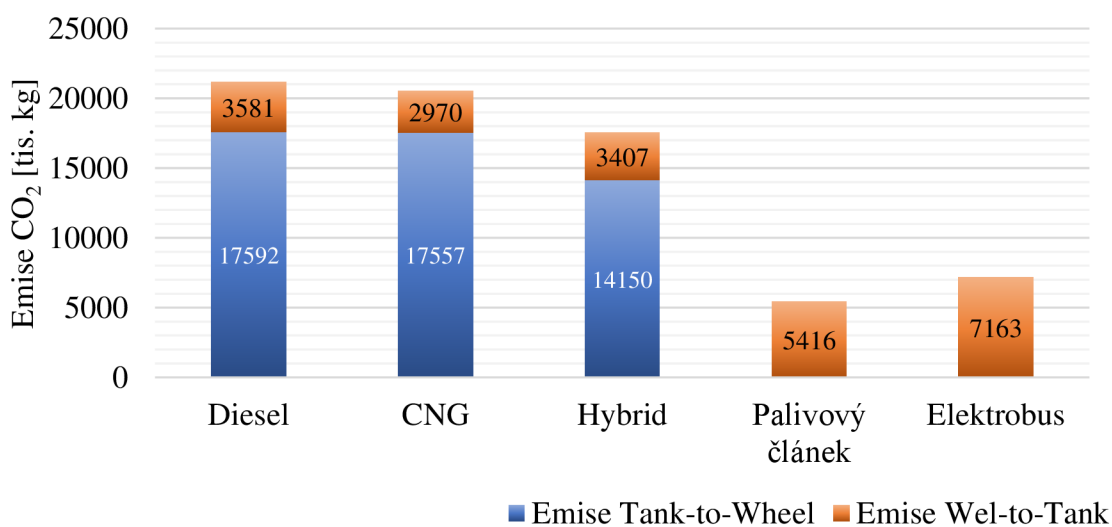
5.3.2 Ekologické hledisko

Jihomoravský kraj je značně zatížen emisemi z dopravy. Je to dáno právě silniční dopravou v Brně a jeho blízkém okolí, částečně také dálnicemi D1 a D2. Celkově se doprava podílela v roce 2016 na emisích skleníkových plynů a dalších znečišťujících látek (CO, NO_x, N₂O, atd.) zhruba 11 %, což je nejvíce po kraji Středočeském. [54]

Při porovnávání ekologičnosti jednotlivých druhů pohonů byly použity hodnoty najetých kilometrů autobusovou dopravou v Brně v letech 2014, 2015 a 2016 (Tab.5.2). Následující graf porovnává celkové vyprodukované množství CO₂ zmíněnými typy autobusů v těchto letech.



Obr.5.5 Celková produkce CO₂ pro jednotlivé pohonné koncepty



Obr.5.6 CO₂ emise pro jednotlivé pohonné koncepty modelované pro rok 2016

Obrázek 5.6 ukazuje porovnání emisí CO₂ pro jednotlivé pohonné koncepty. Jedná se o množství emisí vztažených na počet kilometrů, které pokryla autobusová doprava v Brně za rok 2016 (Tab.6.2). Z výpočtu vyplývá, že autobus na vodíkový pohon ušetří více než 15 000 tun CO₂ oproti dieselovému pohonu a CNG v rámci celého procesu. Množství CO₂ emisí vyprodukovaných vodíkovým autobusem pramení čistě z výroby paliva, jelikož při samotném provozu vodík žádné další uhlíkové emise neprodukuje.

Přes všechny snahy snižovat emise CO₂ vyplývá z dat Centra pro dopravní výzkum [55], že jejich množství vyprodukované silniční veřejnou dopravou v Jihomoravském kraji se stále zvyšuje. Výsledný rozdíl, vyplývající z výpočtů znázorněných v předchozím grafu, mezi dieselovým a vodíkovým autobusem tvoří 6,8 % všech emisí vyprodukovaných veřejnou silniční dopravou v Jihomoravském kraji v roce 2016.

Pokud jde o látky přispívající ke špatné smogové situaci a zhoršení kvality ovzduší celkově, je celý Jihomoravský kraj ovlivněn dopravou znatelně. Podle dat Českého hydrometeorologického ústavu je za Středočeským krajem na druhém místě ve znečištění ovzduší následkem dopravy. Provozování vodíkových autobusů, případně i elektrobuses, by výrazně přispělo zlepšení situace v brněnské aglomeraci, jelikož nespalují žádná paliva, a tudíž produkci zdraví škodlivých látek nepřispívají. [56]

Brno se již dnes snaží jednat ve snaze snížení produkce znečišťujících látek. Právě autobusy na CNG pohon mají v tomto směru značně příznivější výsledky, než autobusy naftové. Opravdu zásadních výsledků, jak z dat vyplývá, je ale možné docílit pouze přechodem na alternativní typy pohonu (vodík nebo elektřina) a eliminací počtu osobních automobilů v centru města.

ZÁVĚR

Výroba vodíku dnes probíhá zejména z fosilních paliv, což samo o sobě podkopává argumenty založené na ekologické nenáročnosti. Elektrolyza vody v kombinaci se spalováním biomasy, solární, vodní nebo větrnou energií představuje „zelenou“ cestu, která je teoreticky uskutečnitelná kdekoli na světě.

Kombinace vodíku a palivového článku nabízí nepřehledné množství potenciálního využití. Díky vysokým účinnostem a nízkým nárokům na údržbu již dnes nacházejí celou řadu uplatnění. Lze s nimi počítat pro menší lokální elektrárny, záložní zdroje energie, mobilní aplikace s vojenským využitím a v neposlední řadě pro dopravní průmysl.

Srovnání s jinými druhy pohonů potvrzuje, že v současné době jsou vodíkové technologie podstatně nákladnější než jeho alternativy. Důvodem je především absence masové výroby, tím pádem jsou především palivové články velmi drahou technologií. Cena za pořízení vodíkového autobusu je několikanásobně větší, než v případě naftového nebo CNG. Podle předpovědí se bude ovšem ekonomický rozdíl snižovat a vodíkové technologie budou dostupnější než dnes, v horizontu deseti let i konkurenceschopné.

Pohonný koncept palivového článku nabízí nesrovnatelné výhody z ekologického hlediska. Při vlastním provozu neprodukuje žádné skleníkové plyny ani zdraví škodlivé látky a ke svému okolí je rovněž šetrnější z hlediska hlukové zátěže. Výrazné snížení produkce skleníkových plynů není možné bez zařazení bezemisních pohonů, jako palivový článek nebo baterie. Dnes hojně využívané CNG produkují menší množství zdraví škodlivých látek a v některých případech platí za ekonomičtější variantu, Co se týče emisí CO₂ ovšem nenabízí výrazně lepší výsledky než zaběhnuté naftové motory. Jediný, kdo je v tomto smyslu schopen s vodíkovým pohonem soupeřit, jsou elektrobuses. Ty bývají ovšem kritizovány z hlediska účinnosti baterií a jejich špatného poměru váhy a kapacity.

Na modelovém příkladu města Brna lze vidět, že z ekonomického hlediska není náhrada stávajících dieselových a CNG autobusů realistická. Provozní náklady vozového parku by se zvýšily o téměř 120 % a to především kvůli pořizovací ceně, jež představuje dvojnásobek ceny dieselového nebo CNG autobusu. Z ekologického hlediska jsou výsledky srovnání více než uspokojivé. Rozdíl produkce emisí CO₂, představující 6,8 % celkové produkce v Jihomoravském kraji jistě není zanedbatelný. Pokud bychom počítali produkci čistě v rámci brněnské aglomerace, čísla by vycházela o to pozitivněji.

Pořizovací cena tedy zůstává největší překážkou, pražská zkušenost s vodíkovým autobusem ale ukázala, že spotřeba energie pro palivový článek může být ekonomičtější, než nafta. Toto záleží na ceně a efektivitě výroby vodíku. Jednou z cest by mohlo být využívání přebytků elektrické energie ze solárních panelů a větrných elektráren, které se jinak nevyužijí.

Pravděpodobně bude nějakou dobu trvat, než uvidíme v České republice vodíkové autobusy jezdit ve větším počtu. Napomoci by mohly různé dotační programy pro podporu ekologických řešení dopravní situace, které by zaplnily velkou propast mezi náklady na pořízení a provoz vodíkových autobusů a tradičního dieselového, případně CNG, pohonu. Především v menších městech představuje cenový rozdíl dnes nepřekonatelnou překážku. Na světových příkladech jako Londýn, Hamburk nebo Edinburgh je vidět, že zařazení vodíkových technologií je proveditelné, navíc s velmi pozitivními výsledky.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ZHANG, Jin Z., Jinghong. LI, Yat. LI a Yiping. ZHAO. *Hydrogen generation, storage, and utilization* [online]. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2014 [cit. 2018-05-21]. ISBN 978-1-118-14063-5. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpHGSU000V/hydrogen-generation-storage/hydrogen-generation-storage>
- [2] SØRENSEN, Bent. *Hydrogen and Fuel Cells - Emerging Technologies and Applications* [online]. 2nd ed. Elsevier, 2012 [cit. 2018-05-21]. ISBN 978-0-12-387709-3. Dostupné z: <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpHFCETAE2/hydrogen-fuel-cells-emerging/hydrogen-fuel-cells-emerging>
- [3] CARRIVEAU, Rupp a David S-K TING. *Methane and Hydrogen for Energy Storage* [online]. Institution of Engineering and Technology, 2016 [cit. 2018-05-21]. ISBN 978-1-78561-193-3. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpMHES0001/methane-hydrogen-energy/methane-hydrogen-energy>
- [4] GUPTA, Ram B. *Hydrogen fuel: production, transport, and storage*. Boca Raton: CRC Press, c2009. ISBN 978-1-4200-4575-8.
- [5] KLIKORKA, Jiří, Bohumil HÁJEK a Jiří VOTINSKÝ. *Obecná a anorganická chemie*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1985.
- [6] KOSKINEN, Perttu. *The development and microbiology of bioprocesses for the production of hydrogen and ethanol by dark fermentation*. Tampere: Tampere University of Technology, 2008. ISBN 9789521520280.
- [7] SOMOLOVÁ, Markéta a Petr DLOUHÝ. *Výroba vodíku. Česká vodíková technologická platforma* [online]. [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <http://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/vyroba-vodiku/664-vyroba-vodiku>
- [8] Výroba vodíku parním reformováním. In: *Petroleum.cz* [online]. [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <http://www.petroleum.cz/zpracovani/zpracovani-ropy-43.aspx>
- [9] MURZIN, Dmitry Yu. *Chemical Reaction Technology* [online]. De Gruyter, 2015 [cit. 2018-05-21]. ISBN 978-3-11-033643-6. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpCRT0000W/chemical-reaction-technology/chemical-reaction-technology>
- [10] Výroba vodíku parciální oxidací. In: *Petroleum.cz* [online]. [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <http://www.petroleum.cz/zpracovani/zpracovani-ropy-44.aspx>
- [11] KAMEŠ, Josef. *Vodík - alternativní palivo*. Praha: CVUT, 2008. 283 s. ISBN 978-80-254-1686-0
- [12] Electrolysis of water. *Aqua Reactor* [online]. [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <http://www.aquareactor.com/electrosys.html>

- [13] GANDÍA, Luis M., Gurutze. ARZAMEDI a Pedro M. DIÉGUEZ. *Renewable hydrogen technologies: Production, purification, storage, applications and safety* [online]. Boston: Elsevier, 2013 [cit. 2018-05-21]. ISBN 978-0-444-56352-1. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpRHTPPSA1/renewable-hydrogen-technologies/renewable-hydrogen-technologies>
- [14] DINCER, Ibrahim a Canan ACAR. Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. Elsevier, 14 September 2015, (34), 11094-11111 [cit. 2018-05-21]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.12.035>. ISSN 0360-3199. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319914034119>
- [15] DOUČEK, Aleš. Výroba vodíku z biomasy. In: *Česká vodíková technologická platforma* [online]. [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/vyroba-vodiku/666-vyroba-vodiku-z-biomasy>
- [16] JANÍK, Luděk a Petr DLOUHÝ. Transport a skladování vodíku. *Česká vodíková technologická platforma* [online]. [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <http://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/transport-a-skladovani-vodiku/618-skladovani-vodiku-i>
- [17] ZÜTTEL, Andreas. Hydrogen storage methods. *Naturwissenschaften* [online]. 2004, 91(4), 157-172 [cit. 2018-05-21]. DOI: 10.1007/s00114-004-0516-x. ISSN 0028-1042. Dostupné z: <https://sci-hub.tw/10.1007/s00114-004-0516->
- [18] AL-HALLAJ, Said a Kristofer KISZYNSKI. Hydrogen Production, Storage and Fuel Cells. *Hybrid Hydrogen Systems* [online]. London: Springer London, 2011, 2011-4-19, 31-53 [cit. 2018-05-21]. Green Energy and Technology. DOI: 10.1007/978-1-84628-467-0_3. ISBN 978-1-84628-466-3. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/978-1-84628-467-0_3
- [19] DLOUHÝ, Petr a Luděk JANÍK. Transport a skladování vodíku: Skladování vodíku II. In: *Česká vodíková technologická platforma* [online]. 2007 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/transport-a-skladovani-vodiku/620-skladovani-vodiku-ii>
- [20] DLOUHÝ, Petr a Luděk JANÍK. Vodíkové hospodářství. In: *Česká vodíková technologická platforma* [online]. 2007 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/vodikove-hospodarstvi/654-vodikove-hospodarstvi>
- [21] DLOUHÝ, Petr a Luděk JANÍK. Využití vodíku: Účinnost II. In: *Česká vodíková technologická platforma* [online]. 2007 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/vyuziti-vodiku/639-ucinnost-ii>
- [22] BARBIR, Frano. *PEM Fuel cells: Theory and practice* [online]. 2nd ed. Boston: Elsevier, 2013 [cit. 2018-05-21]. ISBN 978-0-12-387710-9. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpPEMFCTP3/pem-fuel-cells-theory/pem-fuel-cells-theory>

- [23] BAGOTŠKIĚ, V. S., A. M. SKUNDIN a Yuri M. VOLFKOVICH. *Electrochemical power sources: batteries, fuel cells, and supercapacitors* [online]. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2015 [cit. 2018-05-21]. ISBN 978-1-118-46023-8. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpEPSBFCS2/electrochemical-power/electrochemical-power>
- [24] HITT, David. What Was the Gemini Program?. In: *NASA* [online]. 2011 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov/audience/forstudents/5-8/features/nasa-knows/what-was-gemini-program-58.htm>
- [25] DLOUHÝ, Petr a Luděk. Využití vodíku: Palivové články. In: *Česká vodíková technologická platforma* [online]. 2007 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/vyuziti-vodiku/588-palivove-clanky>
- [26] MEHTA, Viral a Joyce SMITH COOPER. Review and analysis of PEM fuel cell design and manufacturing. *Journal of Power Sources* [online]. Elsevier, 2003, (1), 32-53 [cit. 2018-05-21]. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(02\)00542-6](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(02)00542-6). ISSN 0378-7753. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775302005426>
- [27] PU, Hongting. *Polymers for PEM fuel cells* [online]. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2014 [cit. 2018-05-21]. ISBN 978-1-118-32940-5. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpPPEMFC07/polymers-pem-fuel-cells/polymers-pem-fuel-cells>
- [28] CHAMBERS, Ann. *Renewable energy in nontechnical language* [online]. Tulsa, Oklahoma, USA: PennWell, c2004 [cit. 2018-05-21]. ISBN 978-1-59370-005-8. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpRENL0001/renewable-energy-in-nontechnical/renewable-energy-in-nontechnical>
- [29] KENDALL, Kevin a Michaela KENDALL. *High-Temperature Solid Oxide Fuel Cells for the 21st Century: Fundamentals, design and applications* [online]. Elsevier, 2016 [cit. 2018-05-21]. ISBN 978-0-12-410453-2. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpHTSOFFCA/high-temperature-solid/high-temperature-solid>
- [30] SHARAF, Omar Z. a Mehmet F. ORHAN. An overview of fuel cell technology: Fundamentals and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. Elsevier, 2014, (32), 810-853 [cit. 2018-05-21]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.012>. ISSN 1364-0321. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114000227>
- [31] JEREW, Benji. Toyota Mirai Coming to Japan and California. In: *The Green Optimistic* [online]. 8 February 2015 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <https://www.greenoptimistic.com/toyota-mirai-20150208/#.Wv7NikiFNPZ>

- [32] BERGIN, Chris. STS-135: ET-138 Tanking Test reveals SSME Fuel Valve issue. In: *NASASpaceflight.com* [online]. 2011 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <https://www.nasaspaceflight.com/2011/06/sts-135-et-138-tanking-test-following-weather-delay/>
- [33] Fuel Cell Power Plants. *National Aeronautics and Space Administration* [online]. [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <https://spaceflight.nasa.gov/shuttle/reference/shutref/orbiter/eps/pwrplants.html>
- [34] HUSS, Alexandra. Fuel cell use in the land of the fjords. In: *H2-international: The e-Journal on Hydrogen and Fuel Cells* [online]. 1 February 2018 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <https://www.h2-international.com/2018/02/01/fuel-cell-use-in-the-land-of-the-fjords/>
- [35] GURZ, Mehmet, Ertrugrul BALTACIOGLU, Yakup HAMES a Kemal KAYA. The meeting of hydrogen and automotive: A review. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. Elsevier, 2017, (36), 23334-23346 [cit. 2018-05-21]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.02.124>. ISSN 0360-3199. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319917306353>
- [36] HARALDSSON, K., A. FOLKESSON, M. SAXE a P. ALVFORS. A first report on the attitude towards hydrogen fuel cell buses in Stockholm. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. Elsevier, 2006, (3), 317-325 [cit. 2018-05-21]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2005.11.008>. ISSN 0360-3199. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036031990500340X>
- [37] ALAZEMI, Jasem a John ANDREWS. Automotive hydrogen fuelling stations: An international review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. Elsevier, 2015, (48), 483-499 [cit. 2018-05-21]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.085>. ISSN 1364-0321. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115002385>
- [38] Hydrogen refuelling infrastructure. *Hydrogen Mobility Europe* [online]. [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <https://h2me.eu/about/hydrogen-refuelling-infrastructure/>
- [39] Germany had the highest increase of hydrogen refuelling stations worldwide in 2017. In: *TÜV SÜD* [online]. [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <https://www.tuv-sud.com/news-media/news-archive/germany-had-the-highest-increase-of-hydrogen-refuelling-stations-worldwide-in-2017>
- [40] Hydrogen Refuelling Stations Worldwide. *Netinform: Your service portal* [online]. [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <https://www.netinform.de/H2/H2Stations/Default.aspx>
- [41] JANIK, Ludek a Ales DOUCEK. FCZ-H2 Bus: The First Fuel Cells Hydrogen Bus in New EU Countries. *Journal of Asian Electric Vehicles* [online]. June 2008, 6(1), 1083-1085 [cit. 2018-05-21]. DOI: 10.4130/jaev.6.1083. ISSN 1883-6038. Dostupné z: https://www.jstage.jst.go.jp/article/jaev/6/1/6_1_1083/_article

- [42] Autobus. *TriHyBus* [online]. [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <http://trihybus.cz/index.php/cz/autobus/5-autobus>
- [43] Toyota Launches Production Model "Sora" FC Bus. In: *Toyota: Global newsroom* [online]. 28 March 2018 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <https://newsroom.toyota.co.jp/en/corporate/21863761.html>
- [44] Toyota delivers fuel cell bus to Tokyo Metropolitan Government; more than 100 planned by 2020 Olympics. In: *Green Car Congress: Energy, technologies, issues and policies for sustainable mobility* [online]. 24 February 2017 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <http://www.greencarcongress.com/2017/02/20170224-toyota.html>
- [45] POCARD, Nicolas a Catharine REID. Fuel Cell Electric Buses: An attractive value proposition for zero-emission buses in the United Kingdom. In: *Fuel Cell Electric Buses* [online]. November 2016 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <https://www.fuelcellbuses.eu/sites/default/files/Ballard%20-%20fuel%20cell%20electric%20buses.pdf>
- [46] Ceny autobusů pro výpočet průměrného zisku. In: *Ministerstvo dopravy* [online]. [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <https://www.mdcr.cz/Dokumenty/Ministerstvo/Financni-a-ekonomiske-zalezitosti/Ceny-autobusu-pro-vypocet-primereneho-zisku>
- [47] Počet CNG autobusů se za poslední 2 roky u nás zdvojnásobil. In: *Hybrid.cz* [online]. 22 Listopad 2016 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/pocet-cng-autobusu-se-za-posledni-2-roky-u-nas-zdvojnasil>
- [48] PEJŠOVÁ, Magda. MHD, která neškodí. In: JANDOVIČ, Vilma, Irena MIKULOVÁ a Roman LIČBINSKÝ. *VI. česko-slovenská konference: Doprava, zdraví a životní prostředí* [online]. Brno: Centrum dopravního výzkumu, 2014, s. 125-132 [cit. 2018-05-21]. ISBN 978-80-86502-85-4. Dostupné z: <https://dzzp.cdv.cz/file/archiv-2014-sbornik/>
- [49] Urban buses: Alternative powertrains for Europe. In: *Fuel Cell Electric Buses* [online]. November 2012 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: https://www.fuelcellbuses.eu/sites/default/files/documents/20121029%20Urban%20buses%20C%20alternative%20powertrains%20for%20Europe%20-%20Final%20report_0_0.pdf
- [50] Polétavý prach PM10, PM2,5, PM1,0. *Čisté nebe* [online]. [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <http://www.cistenebe.cz/stav-ovzdusi-na-ostravsku/slovnicek-pojmu/13-poletavy-prach-pm10-pm25-pm10>
- [51] Výroční zprávy DPMB. In: *Dopravní podnik města Brna a.s.* [online]. [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <http://www.dpmb.cz/cs/firma-vyrocn-zpravy>
- [52] Pořízení nových nízkopodlažních autobusů pro MHD s pohonem na CNG. In: *Dopravní podnik města Brna a.s.* [online]. [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <http://dpmb.cz/cs/nove-nizkopodlazni-autobusy-cng>

- [53] SLAVÍK, Jakub. E-mobilita v MHD: Situace a vývojové trendy v elektrických autobusech pro městskou dopravu. In: *Proelektrotechniky.cz: Elektrotechnika pro odborníky* [online]. Srpen 2013 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <http://www.proelektrotechniky.cz/pdf/Studie1.pdf>
- [54] MERTL, J., T. MYŠKOVÁ, H. PERNICOVÁ, J. POKORNÝ, T. POMOCNÁ, M. ROLLEROVÁ a V. VLČKOVÁ. Zpráva o životním prostředí v Jihomoravském kraji. In: *Ministerstvo životního prostředí* [online]. 2016 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/zpravy_zivotni_prostredi_kraje_2016/\\$FILE/SOPSPZP-Jihomoravsky_kraj-20180115.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/zpravy_zivotni_prostredi_kraje_2016/$FILE/SOPSPZP-Jihomoravsky_kraj-20180115.pdf)
- [55] DOSTÁL, Ivo, Leoš PELIKÁN, Libor ŠPIČKA a Roman LIČBINSKÝ. Studie o vývoji dopravy z hlediska životního prostředí v České republice za rok 2016. In: *Ministerstvo životního prostředí* [online]. Září 2017 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/studie_vyvoj_dopravy/\\$FILE/000-Studie_2017-20180228.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/studie_vyvoj_dopravy/$FILE/000-Studie_2017-20180228.pdf)
- [56] REZZO 4 - 2015: Emise hlavních znečišťujících látek v České republice podle krajů. In: *Český hydrometeorologický ústav* [online]. [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/oez/embil/15embil/rezzo4/rezzo4_CZ.html

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Význam	
AFC	Alkalický palivový článek	
CNG	Stlačený zemní plyn	
CO	Oxid uhelnatý	
CO ₂	Oxid uhličitý	
DMFC	Palivový článek pracující s methanolem	
DPMB	Dopravní podnik města Brna	
ITSOFC	Palivový článek s tuhými oxidy	
LPG	Zkapalněný ropný plyn	
MCFC	Palivový článek s roztavenými uhličitany	
MHD	Městská hromadná doprava	
N ₂ O	Oxid dusný	
NASA	Národní úřad pro letectví a kosmonautiku (USA)	
NO _x	Oxidy dusíku	
NTP	Normální teplota a tlak (0 °C, 1 bar)	
PAFC	Palivový článek s kyselinou fosforečnou	
PEMFC	Palivový článek s polymerní membránou	
SO ₂	Oxid siřičitý	
TSOFC	Palivový článek s tuhými oxidy – trubkový	
UAV	Bezpilotní letoun	
Symbol	Veličina	Jednotka
Q	Teplo	J
S	Entropie	J · K ⁻¹
T	Termodynamická teplota	K
t	Čas	s

SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr.1.1 Výroba vodíku v současnosti [7]
- Obr.1.2 Schéma parního reformování zemního plynu [8]
- Obr.1.3 Parciální oxidace těžkých ropných olejů [10]
- Obr.1.4 Elektrolýza vody [12]
- Obr.1.5 Termochemický S-I cyklus [7]
- Obr.1.6 Vysokotlaká kompozitová lahev [18]
- Obr.1.7 Kryogenní nádrž na vodík [18]
- Obr.2.1 Palivový článek [22]
- Obr.2.2 První osobní automobil s PEM palivovým článkem z roku 1993 [22]
- Obr.2.3 Palivový článek s polymerní membránou [25]
- Obr.2.4 Svazek palivových článků [26]
- Obr.3.1 Toyota Mirai – vnitřní architektura [31]
- Obr.3.2 Alkalický palivový článek pro mise Apollo [32]
- Obr.3.3 Projekt expresního trajektu s vodíkovým pohonem v norském Floroe [34]
- Obr.4.1 Mercedes-Benz Fuel Cell Citaro [36]
- Obr.4.2 Konfigurace vozidla s vodíkovým pohonem [35]
- Obr.4.3 Jednotlivé prvky čerpací stanice s externí dodávkou vodíku [37]
- Obr.4.4 TriHyBus [42]
- Obr.4.5 Toyota SORA [43]
- Obr.5.1 Pořizovací ceny městských autobusů s jednotlivými typy pohonu
- Obr.5.2 Provozní náklady autobusů podle typu pohonu [49]
- Obr.5.3 Emise CO₂ pro jednotlivé koncepty vztahované na 1 km provozu [48]
- Obr.5.4 Hlučnost jednotlivých pohonných konceptů [48]
- Obr.5.5 Celková produkce CO₂ pro jednotlivé pohonné koncepty
- Obr.5.6 CO₂ emise pro jednotlivé pohonné koncepty modelované pro rok 2016

SEZNAM TABULEK

- Tab.1.1 Srovnání vlastností vodíku a jiných paliv [6]
- Tab.1.2 Energetické hustoty pro různé formy skladování vodíku [2]
- Tab.5.1 Ceny autobusů stanovené ministerstvem dopravy pro rok 2017 [46]
- Tab.5.2 Počet kilometrů pro jednotlivé druhy MHD v Brně (2014-2016) [51]
- Tab.5.3 Celkové provozní náklady vozového parku v letech 2016 a 2030