



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

VODÍKOVÝ AUTOBUS

THE HYDROGEN BUS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Petr Kopecký

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student:	Petr Kopecký
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
Akademický rok:	2019/20

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

Vodíkový autobus

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vodíkový pohon je považován za perspektivní zejména pro využití v nákladní a hromadné dopravě tedy i pro pohon autobusů. Je třeba, ale mít přehled, co vše zahrnuje vodíková infrastruktura od výroby vodíku, přes transport až po využití pro pohon v autobusech.

Cíle bakalářské práce:

Přehled současného stavu poznání ve vývoji palivových článků, metod ukládání vodíkového paliva. Zpracovat výhody a nevýhody vodíkového pohonu včetně otázek bezpečnosti provozu. Zpracovat přehled ekonomiky provozování vodíkových autobusů. Zpracovat přehled jednotlivých komponent celého vodíkového pohonu a vodíkové infrastruktury.

Diskuse zahrnující směry, kterým se bude rozvoj těchto pohonů u autobusů bude ubírat.

Seznam doporučené literatury:

VARGA, Bogdan, Calin ICLODEAN a Mariasiu FLORIN. Electric and Hybrid Buses for Urban Transport: Energy Efficiency Strategies. Switzerland: Springer, 2016. ISBN 978-3-319-41249-8.

LIPMAN, Timothy E. Fuel cells and hydrogen production. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2018. ISBN 978-1-4939-7790-1.

SCIPIONI, Antonio, MANZARDO, Alessandro, JINGZHENG, Ren. Hydrogen economy: supply chain, life cycle analysis and energy transition for sustainability. San Diego: Academic Press, an imprint of Elsevier, 2017. ISBN 978-0-12-811132-1.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá vodíkovými autobusy, jejich koncepcí, vlastnostmi, praktickým uplatněním a ekonomikou provozu. Pojednává také o bezpečnosti a vodíkové infrastruktuře, zejména o výrobě, skladování a využití vodíku, přičemž jsou zmíněny i budoucí možnosti. Různá technická řešení jsou hodnocena s ohledem na specifika autobusů. Nabízí tak všeobecný přehled problematiky vodíkových autobusů a související infrastruktury.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vodík, autobus, vodíkový autobus, vodíková mobilita, vodíková infrastruktura, výroba vodíku, skladování vodíku, vodíkový autobus s palivovými články.

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with the topic of hydrogen buses, their concept, properties, practical application and economics of operation. It also discusses safety and hydrogen infrastructure, in particular hydrogen production, storage and use, while mentioning future options. Various technical solutions are evaluated with regard to the specifics of buses. It thus offers a general overview of the topic of hydrogen buses and related infrastructure.

KEYWORDS

Hydrogen, bus, hydrogen bus, hydrogen mobility, hydrogen infrastructure, hydrogen production, hydrogen storage, fuel cell electric bus.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KOPECKÝ, Petr. *Vodíkový autobus*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124215>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 60 s. Vedoucí práce Josef Štětina.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením prof. Ing. Josefa Štětiny, Ph.D. a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 25. června 2020

.....

Petr Kopecký

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval panu profesorovi Josefu Štětinovi za odborné vedení práce, poskytnutí studijních materiálů a vstřícný přístup.

OBSAH

Úvod	11
1 Vlastnosti vodíku	12
2 Požadavky na vlastnosti autobusů	14
3 Konkurenční autobusy	15
3.1 Autobusy se spalovacím motorem na naftu	15
3.2 Autobusy se spalovacím motorem na CNG	15
3.3 Autobusy se spalovacím motorem na biopaliva	15
3.4 Autobusy na bioplyn z čistíren odpadních vod	16
3.5 Hybridní autobusy	16
3.6 Trolejbusy	16
3.7 Elektrobusy	16
3.8 Parciální trolejbusy	17
4 Vodíková infrastruktura	18
5 Výroba vodíku	20
5.1 Výroba vodíku z fosilních paliv	20
5.2 Vodík jako vedlejší produkt průmyslu	21
5.3 Výroba vodíku z biomasy	22
5.4 Elektrolýza	23
5.4.1 Standardní elektrolýza	23
5.4.2 Vysokoteplotní (parní) elektrolýza	25
5.5 Termochemické cykly	26
5.6 Shrnutí výroby vodíku	27
6 Skladování vodíku	28
6.1 Stlačený plyn	28
6.2 Kapalný vodík	29
6.3 Skladování v hydridech a další způsoby s vázaným vodíkem	29
6.4 Srovnání metod skladování vodíku	30
7 Transport vodíku	32
8 Plnicí stanice	33
9 Využití vodíku pro pohon vozidel	35
9.1 Spalovací motor	35
9.2 Palivový článek	36
10 Bezpečnost	39
11 Uspořádání komponent vodíkového autobusu	41
12 Konkrétní projekty	45
12.1 Projekt JIVE	45

12.2	Wuppertal	45
12.3	H2Bus Europe.....	46
12.4	Kalifornie	46
12.5	Asie	47
12.6	TriHyBus	47
12.7	Plány v České republice.....	48
13	Ekonomika provozu	49
13.1	Ekonomika provozu z technického pohledu	49
13.2	Finanční podpora vodíkové mobility	50
14	Další vývoj.....	52
	Závěr	54
	Použité informační zdroje	55
	Seznam použitých zkratk a symbolů	60

ÚVOD

Vodík je sice nejmenší prvek, ale možnosti jeho využití malé nejsou. Protože je důležitou součástí různých paliv, není využívání samo o sobě nic nového. Různá paliva měla v historii lidstva zásadní význam. V poslední době jsou hledány možnosti, jak jinak zásobovat lidstvo energií, protože konvenční metody vedly k výrazné produkci skleníkových plynů a různých zdraví škodlivých látek.

Dalším důvodem pro hledání alternativních řešení je omezení závislosti na fosilních palivech. V kontextu dopravy se jedná především o ropu. Odhady jejích zásob i doby, po jakou tyto zásoby při stále rostoucí spotřebě vystačí, se velmi různí. Například se předpokládá, že by k vyčerpání zásob ropy mohlo dojít kolem roku 2050 [9]. Zásoby všech využívaných fosilních paliv lze, vzhledem k rychlosti lidské spotřeby a rychlosti přirozené tvorby těchto paliv, považovat za konečné.

Ač bylo vyčerpání fosilních paliv a ekologické důsledky jejich spalování na ovzduší zařazeny mezi limitující faktory rozvoje lidstva již v 70. letech minulého století [12], stále je to někdy vnímáno jako vzdálený problém. S fosilními palivy se však pojí také politické zájmy. Z celosvětových příkladů jmenujme komplikované dění na Blízkém východě, ve střední Evropě se zase diskutuje o závislosti na zemním plynu z Ruska.

Proto jsou hledány cesty, jak spotřebu fosilních paliv se všemi popsány negativními důsledky snížit. Problémy s čistotou ovzduší jsou patrné obzvláště ve městech, a proto je velká pozornost věnována právě městské hromadné dopravě, jejíž součástí jsou i autobusy. Ty se pro svou univerzálnost uplatňují ale i mimo města.

Mezi alternativními pohony nelze nezmínit elektromobilitu, která sice v období počátků automobilismu prohrála souboj se spalovacími motory, ale v poslední době opět zažívá velký rozvoj. Detailní posuzování všech jejích vlastností by bylo nad rámec této práce, ale je nutno uvést, že ani elektromobilita není zcela bez problémů. Právě proto má smysl se zabývat i dalšími možnostmi, mezi něž patří i vodík.

Podobně jako elektrobus může být i vodíkový autobus poháněn elektromotorem. Liší se však zdroj elektrické energie, která pochází z vodíkového palivového článku. Palivové články pro vozidla se dnes velmi vyvíjí, i když používání vodíku k pohonu vozidel či strojů není úplnou novinkou. Ve světě je provozován například velký počet vysokozdvížných vozíků na vodík [49].

Vodíková mobilita je hodnocena jako perspektivní možnost i pro hromadnou dopravu osob a konkrétně vodíkové autobusy jsou již v pravidelném provozu. Stále však jde spíše o výjimečné projekty a problematika všeobecně není příliš známá. Tato bakalářská práce proto pojednává o vodíkových autobusech a jejich vlastnostech, ale i o související infrastruktuře, tedy o tom, jak se vodík vyrábí a co vše je součástí řetězce umožňujícího provoz vodíkového autobusu. Technická řešení vodíkového pohonu a infrastruktury jsou hodnocena s přihlédnutím ke specifikům autobusů a možnostem jejich praktického uplatnění v provozu. Bude uveden i výhled budoucího vývoje a v závěru shrnuty vlastnosti a uplatnění vodíkových autobusů.

1 VLASTNOSTI VODÍKU

V technické praxi je jako vodík běžně nazývána molekulární forma vodíku. V běžných podmínkách se jedná o plyn, který je bez barvy, zápachu a chuti. Při teplotě 0 °C a tlaku 101,325 kPa má hustotu 0,0899 kg.m⁻³ a je tak nelehčí známou látkou [9].

Atom vodíku H je velmi reaktivní, v přírodě se prakticky nevyskytuje a tvoří molekuly H₂. Velmi reaktivní je i molekulární forma, a proto se s vodíkem setkáváme v různých sloučeninách. Nejčastější z nich je voda ve třech skupenstvích. Z chemického hlediska je vodík silné redukční činidlo. To je důležité, protože díky tomu vznikají hydridy, dvouprvkové sloučeniny vodíku a jiného prvku, které jsou jednou z možností skladování vodíku.

Následující vlastnosti jsou významné kvůli svému negativnímu vlivu na bezpečnost používání vodíku.

- Je obtížně zjištělný, protože nemá barvu, zápach, chuť.
- Je velmi hořlavý, což závisí na koncentraci, jejíž rozsah je široký (4 až 75 %, zatímco u benzínu je to 1 až 7,6 %) [11].
- Energie, kterou je potřeba dodat, aby došlo k zapálení, je zhruba desetkrát menší než u metanu nebo benzínu [9], tedy velmi malá.
- Hoří špatně viditelným plamenem.
- Vysoká rychlost plamene [9].
- Pokud je stlačený, je v širokém rozsahu koncentrací výbušný. V nestlačeném stavu není výbušný, stejně jako jiná paliva [9].

Vodík snadno (snáze než ostatní plynná paliva) difunduje vzduchem [9], díky čemuž se snadno šíří z místa úniku do okolí. To lze podle okolností považovat za výhodu i nevýhodu. Ve volném venkovním prostoru je to výhoda, protože v případě úniku se vodík snáze rozptýlí.

Vodík má však velkou difuzivitu obecně, což způsobuje problémy s uskladněním. U některých materiálů dochází k tzv. vodíkové křehkosti.

Teplota plamene (vodíku se vzduchem) je vyšší než u metanu, ale nižší než u benzínu [9]. Nejde tedy o vlastnost, která by vodík znevýhodňovala oproti konvenčním palivům.

Při hoření vodíku se uvolňuje velké množství tepla, mluvíme o velkém spalném teple. Pro srovnání při dokonalém spálení jedné hmotnostní jednotky vodíku se uvolní zhruba třikrát více tepla než při spálení jedné hmotnostní jednotky benzínu [11]. Tato vlastnost by byla sama o sobě výhodná, ale pro skladování je zásadní i zmíněná malá hustota. Hustota energie vodíku při tlaku 700 bar a teplotě 15 °C je 4,5 MJ.m⁻³, u kapalného vodíku je to 8,5 MJ.m⁻³, zatímco u benzínu a nafty je to zhruba 31 MJ.m⁻³ [9]. Pro dosažení prakticky použitelného objemu se vodík často stlačuje a nádrže konstruované pro vysoký tlak (řádově stovky barů) mají nezanedbatelnou hmotnost.

Další skupenství vodíku se vyskytují při nízkých teplotách, protože má velmi nízkou teplotu varu a tání. Při normálním tlaku se vodík zkapalní při teplotě - 252,8 °C a následně tuhne při - 259,2 °C [10]. Kritická teplota je - 239,96 °C [10]. Nad touto teplotou nemůže být plyn zkapalněn ani při dalším zvyšování tlaku a jde tedy o významné fyzikální omezení. Kritický tlak (tlak potřebný pro zkapalnění plynu při kritické teplotě) je 1315 kPa [10]. Při zkapalňování vodíku nebude problém dosažení tlaku, nýbrž dosažení správné teploty.

Měrná tepelná kapacita vodíku je obecně vysoká. Plynný vodík při teplotě 25 °C má měrnou tepelnou kapacitu $14,3 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ [9]. Tento údaj naznačuje, že zkapalňování vodíku bude energeticky náročné, jelikož je k tomu potřeba změna teploty.

2 POŽADAVKY NA VLASTNOSTI AUTOBUSŮ

Aby bylo možné hodnotit různá technická řešení týkající se vodíkových autobusů, budou nejprve shrnuty požadavky, které jsou na autobusy kladeny. Konkrétní požadavky, mnohdy velmi podrobné, si stanovuje dle svých preferencí každý dopravce individuálně. Zde budou uvedeny pouze ty obecné, které lze považovat za všeobecně platné a kterými má smysl se zabývat při hodnocení vodíkového pohonu. Budou tedy záměrně vynechány například požadavky na informační systém, stanoviště řidiče, barevné provedení karoserie, sedadla pro cestující, osvětlení a další.

- a) Kapacita vozidla. Je různá dle potřeb dopravce, ale měla by být přiměřená vzhledem k dalším parametrům (zejména b, c, l).
- b) Obratnost. Důležitá zejména v městském provozu. Závisí spíše na konstrukci podvozku (délka, šířka, výška, počet říditelných náprav, rozvor náprav, kloub) než na technologii pohonu.
- c) Dostatečná dynamika. Důležitá zejména v městském provozu s častými rozjezdy. Závisí na výkonu pohonné soustavy a hmotnosti vozidla.
- d) Nízká podlaha. Stává se standardem v městské hromadné dopravě a rozšiřuje se i do příměstské dopravy, kde se mnohdy používají částečně nízkopodlažní autobusy. Umožňuje snadnější a rychlejší nástup a výstup cestujících a je zásadní pro hendikepované cestující. Představuje komplikaci při konstrukci autobusu, neboť umístění komponent na střeche zvyšuje těžiště. Při výběru metody skladování vodíku je proto důležitější hmotnost nádrže než její vnější objem.
- e) Klimatizace a topení. Závisí na klimatických podmínkách. Jde o stále častější prvky komfortu pro řidiče i cestující, které zvyšují nároky na výkon pohonného systému.
- f) Bezpečnost.
- g) Životnost. Musí odpovídat velkému nájezdu kilometrů v pravidelném provozu, u městského autobusu navíc při neplynulé jízdě.
- h) Co nejnižší lokální emise. Důležité zejména v městském provozu, kde dochází k hromadění emisí z husté dopravy.
- i) Nízké globální emise
- j) Tichý provoz. Důležité zejména v městském provozu.
- k) Dostatečný dojezd na jedno natankování. Požadavek lze u neměnných linek obejít například dobíjením na konečné zastávce, ale přináší to další investiční náklady.
- l) Ekonomicky příznivý provoz. Je ovlivněn spotřebou paliva a jeho cenou a servisními náklady.
- m) Pořizovací cena.

Kromě výše uvedeného stojí za zmínku ještě jeden požadavek související s pohonným systémem autobusu. Jde o provoz v případě katastrofy. Například Dopravní podnik města Brna je zavázán mít připraveno 100 autobusů za účelem evakuace obyvatelstva v případě mimořádné události v jaderné elektrárně Dukovany, a kvůli rychlému a snadnému tankování preferuje autobusy s diesellovým motorem spotřebovávajícím naftu [26]. Tento požadavek by mohl splnit i vodíkový autobus, který navíc v případě lokální produkce vodíku z obnovitelných zdrojů přináší ještě výhodu v podobě dlouhodobé soběstačnosti. Vodík jako náhradní zdroj energie se ve světě již používá ve stacionárních aplikacích [40].

3 KONKURENČNÍ AUTOBUSY

Pro srovnání budou v této kapitole představena další technická řešení pohonu autobusů. Kolejová doprava do tohoto srovnání záměrně není zahrnuta, protože vyžaduje nákladnou výstavbu trati, nedisponuje možností snadno měnit trasy jako u autobusů a vyplatí se při hustším provozu. Neměla by tedy tvořit přímou konkurenci autobusům, ale tyto druhy veřejné dopravy by měly vytvářet propojenou síť, což se v praxi většinou děje.

3.1 AUTOBUSY SE SPALOVACÍM MOTOREM NA NAFTU

Autobusy s diesellovým spalovacím motorem na naftu jsou osvědčené po dlouhá léta a neustále se zlepšují. Mají velký dojezd, dostatečný výkon, rychle a snadno se tankují, jsou spolehlivé a technologie je dobře zvládnutá. Jejich budoucí uplatnění je však omezeno nedostatky, které lze zmenšit, což se neustále děje, ale nelze je zcela odstranit. Jde o emise, relativně nižší účinnost a závislost na fosilních palivech, jejichž budoucí nedostatek může zvýšit provozní náklady a nakonec provoz zcela znemožnit. Již dnes je proto pomalu nahrazují jiné autobusy.

3.2 AUTOBUSY SE SPALOVACÍM MOTOREM NA CNG

Konstrukce autobusů na stlačený zemní plyn (CNG) je velmi podobná naftovým. Hlavní rozdíl je ve skladování paliva – zemní plyn je uložen v tlakových lahvích umístěných na střeše autobusu. Spalovací motor je upravený pro provoz na CNG.

Ve srovnání s naftou jsou výhody nižší cena paliva (kvůli rozdílnému zdanění), menší hluk a emise škodlivin. Energetická účinnost se oproti autobusům na naftu jeví jako horší [28]. Nevýhody jsou vyšší cena autobusu a potřeba plnicí stanice, kterých není mnoho, i když distribuční síť zemního plynu existuje. Vyšší cena je kompenzována možnostmi získání výrazných dotací na nákup autobusů na CNG jakožto ekologičtějších [15]. Všeobecně je problémem závislost na fosilním palivu, hluk a nezanedbatelné emise.

3.3 AUTOBUSY SE SPALOVACÍM MOTOREM NA BIOPALIVA

Biopaliva vzniklá ze zemědělských plodin se již dnes přidávají do nafty. Kvůli snaze o eliminaci závislosti na fosilních palivech je uvažováno o jejich větším využití. Ekologický smysl však závisí na způsobu pěstování plodin a energetické náročnosti celého procesu. Jsou také vedeny diskuze o tom, jak velkou zemědělskou plochu lze k tomuto účelu při rostoucí spotřebě potravin využít.

Autobusy s motorem spalujícím čistě či většinou biopaliva se zatím neuplatnily. Kromě uvedeného sporu o smysl takového provozu jsou nevýhody jako u jiného spalovacího motoru, tedy lokální emise, hluk a omezená účinnost. Tento způsob pohonu se proto nejeví jako perspektivní všeobecné řešení.

3.4 AUTOBUSY NA BIOPLYN Z ČISTÍREN ODPADNÍCH VOD

Autobusy se spalovacím motorem určeným k provozu na CNG lze používat také pro provoz na upravený bioplyn. Bioplyn vzniklý z kalu vznikajícího v čistírně odpadních vod se upravuje pomocí membránové separace, čímž se zbaví oxidu uhličitého, kyslíku, vodní páry a sulfanu [46]. Bioplyn pak obsahuje především metan a také vodík [39].

Prvním takovým projektem v České republice je v roce 2018 zahájený zkušební provoz autobusu na bioplyn v Brně. Je odhadováno, že by tak bylo možné provozovat asi 50 autobusů městské hromadné dopravy [46]. V roce 2017 však měl Dopravní podnik města Brna, a.s. celkem 322 autobusů [18].

Výhody tohoto systému spočívají ve využití odpadů a také ve využívání lokálního zdroje energie a tím pádem i větší soběstačnosti. Rozsah produkce je však omezený. Na příkladu brněnského projektu bylo ukázáno, že nemusí být dostatečný pro provoz všech autobusů MHD. Tento systém lze proto považovat spíše za doplňkové než za univerzální řešení. Nevýhodou jsou také nenulové lokální emise a hluk.

3.5 HYBRIDNÍ AUTOBUSY

Hybridními autobusy jsou zde myšlena vozidla se spalovacím motorem a elektromotorem, které spolupracují. Jejich konstrukce může být různá, všeobecně mají oproti konvenčním autobusům nižší spotřebu paliva, ale vyšší pořizovací náklady [3], [29]. Jejich celkové náklady na životní cyklus jsou hodnoceny příznivě a mohou konkurovat konvenčním autobusům [28]. Umožňují emise (lokální i globální) i závislost na fosilních palivech snížit, nikoliv však odstranit. Proto jsou považovány za dobrou aktuální možnost, ale ne za dlouhodobé řešení do budoucna.

3.6 TROLEJBUSY

Trolejbusy jsou poháněny elektromotorem a elektrická energie je přiváděna trolejovým vedením. Právě s trolejovým vedením jsou spojeny hlavní nevýhody: náklady na výstavbu, nemožnost snadné změny trasy. Výhody jsou menší hlučnost, dobrá dynamika, delší životnost, nulové lokální emise [15]. Globální emise závisí na způsobu výroby elektrické energie. Obecně jsou trolejbusy vhodné pro neměnné velmi frekventované linky, kde se vyplatí výstavba trolejového vedení. Proto by trolejbusová síť měla být podobně jako kolejová doprava navázaná na síť autobusových linek.

3.7 ELEKTROBUSY

Elektrobusy představují největší konkurenci vodíkových autobusů. Jsou poháněny elektromotorem, kterému je dodávána elektrická energie z akumulátorů. Nejsou vázány na trolejové vedení, mají nulové lokální emise, malou hlučnost, dobrou dynamiku, nemají vibrace od motoru. Účinnost elektromotoru je velká (přes 90 %) [3]. Podle způsobu výroby elektřiny nemusí být elektrobusy závislé na fosilních palivech a globální emise mohou být velmi různé. Ve srovnání se spalovacími motory tedy mohou být globální emise skleníkových

plynů podobné ale i výrazně nižší, nebo dokonce nulové [28]. Nevýhody jsou vysoká nákupní cena (ve srovnání s konvenčními autobusy), hmotnost a relativně kratší dojezd [3], což je vše závislé hlavně na akumulátorech. Ty prochází v poslední době poměrně rychlým vývojem přinášejícím výrazná zlepšení. Stálou nevýhodou zůstane neměnnost hmotnosti akumulátorů v závislosti na míře nabití, tedy že i téměř vybité vozidlo má stejnou hmotnost jako nabitě.

Distribuční síť elektrické energie existuje, je však potřeba budovat nabíjecí stanice a případně také upravovat přenosovou soustavu na nové zatížení na nových místech. Základem pro provoz elektrobuse jsou nabíjecí stanice v zázemí dopravní společnosti. Pokud dojezd elektrobuse nestačí na celý provozní den, může se jeho provoz rozdělit na kratší úseky, mezi něž se vloží přestávka na nabíjení ve vozovně. Po nezanedbatelnou dobu nabíjení a cesty do vozovny ale autobus v provozu chybí a nejde tedy o perspektivní řešení. Další možnost je budování vhodně dimenzovaných nabíjecích stanic na konečných nebo i jiných stanicích autobusových linek. Připojení k nim může být rychlé a snadné pomocí speciálních zařízení, například pantografu. Budování těchto nabíjecích stanic však přináší další investiční náklady.

Pro autobusy dálkové přepravy je nutný dostatečný dojezd nebo dostatečně rychlé nabíjení dostupné na mnoha místech, což zatím představuje výrazný problém.

Komplikované je také zajištění tepelného komfortu cestujících. Elektrické topení i klimatizace využijí část elektrické energie z akumulátorů, čímž se zkracuje dojezd. O jak velký nebo malý problém jde záleží na tom, v jakém klimatu je elektrobuse provozován. Nezávislé naftové topení není vzhledem k v úvodu uvedené motivaci pro hledání alternativních způsobů pohonu (emise, závislost na fosilních palivech) považováno za plně uspokojivé řešení.

Nákupní cena elektrobuse je sice poměrně vysoká, ale provozní náklady jsou považovány za příznivé. Celkové náklady jejich životního cyklu mohou být podle některých propočtů o pouhých 5 % vyšší než u naftových autobusů [3].

3.8 PARCIÁLNÍ TROLEJBUSY

Parciální, nebo též hybridní, trolejbusy kombinují vlastnosti trolejbusu a elektrobuse. Jde o trolejbus vybavený akumulátory, které mu umožňují jízdu i mimo trolejové vedení, přičemž vzdálenost, kterou takto ujede, závisí na kapacitě akumulátorů. Parciální trolejbus musí jet část trasy pod trolejovým vedením, akumulátory se přitom nabíjí. Oproti konvenčním autobusům je tedy nevýhoda v omezeném akčním rádiu od trolejového vedení.

Obzvláště výhodné je zařazení parciálních trolejbusů do existující trolejbusové sítě. Eliminuje se tak nevýhoda elektrobuse v podobě problematického nabíjení, a přitom je možné obsluhovat i méně frekventované zastávky, na které by jinak jezdily autobusy navazující na trolejbusovou linku. Snáze se také řeší výluky během oprav trolejového vedení. Oproti trolejbusům jsou nevýhody vyšší hmotnost a hlavně pořizovací cena.

4 VODÍKOVÁ INFRASTRUKTURA

Pojem vodíková infrastruktura zahrnuje v kontextu této práce vše, co je potřeba k provozu vozidla na vodíkový pohon. Protože jednotlivé prvky infrastruktury budou podrobně popsány v samostatných kapitolách, je tato kapitola zaměřena na vodíkovou infrastrukturu jako celek.

Prvky vodíkové infrastruktury jsou:

- a) Výroba vodíku
- b) Skladování ve výrobním závodě
- c) Doprava vodíku na místo spotřeby
- d) Skladování v místě spotřeby
- e) Plnicí stanice (plnění do nádrží vozidla)
- f) Skladování ve vozidle
- g) Přeměna vodíku na energii k pohonu vozidla

Místem spotřeby je v kontextu vodíkové mobility rozuměna plnicí stanice pro vozidla.

Jedním z velkých problémů, jehož úspěšné vyřešení zásadně ovlivňuje smysluplnost celé vodíkové mobility, je výroba vodíku. Jde jednak o vstupní suroviny pro výrobu vodíku a pak také o účinnost využití těchto zdrojů.

U dalších prvků infrastruktury bude důležitá jejich účinnost. Tedy energetická náročnost a množství přepraveného nebo uchovaného vodíku, případně množství energie získané z vodíku v poslední fázi. Jelikož jsou jednotlivé prvky vodíkové infrastruktury řazeny za sebou, platí, že pokud je kterýkoli z nich špatný, výrazně se zhoršuje i celý řetězec jako celek. Proto je potřeba všem prvkům věnovat náležitou pozornost. Protože je však technický pokrok v jednotlivých oborech různě daleko, jeví se některé prvky jako větší nebo menší problém při budování vodíkové infrastruktury.

Řetězec zařízení, kterými vodík projde od výroby až po energetické využití, je možné zkrátit, pokud je plnicí stanice umístěna přímo v místě výroby. Vynechají se tím body c) a d). Toto řešení je snáze realizovatelné u zcela nově budovaných dopravních systémů. To, zda je možné postavit zařízení na výrobu vodíku v místě blízkém provozu autobusů, závisí na místních podmínkách a na zvolené technologii výroby vodíku (té je věnována samostatná kapitola).

Pokud je pevně dáno místo spotřeby a místo výroby vodíku a tato místa jsou od sebe vzdálená, je nutno rozhodnout, zda je lepší, aby autobusy zajížděly k plnicí stanici, nebo dovážet vodík do plnicí stanice postavené v zázemí dopravního systému. Při tomto rozhodnutí bude vhodné brát v potaz následující faktory:

- a) Vzdálenost, kterou musí autobusy urazit k plnicí stanici
- b) Počet vozidel v systému
- c) Náklady na výstavbu vlastní plnicí stanice

Například pro dopravní podnik velkého města, který bude provozovat větší počet vodíkových autobusů a má možnost odebírat vodík pouze od vzdáleného výrobce, bude výhodnější vybudovat vlastní plnicí stanici ve svém areálu a akceptovat také náklady na dopravu vodíku. Naopak pro menší společnost, která zajišťuje dopravní obslužnost v řídko osídleném regionu několika kusy autobusů, může být výhodnější těmito autobusy zajíždět k plnicí stanici

vybudované v blízkém výrobním podniku. Stavba vlastní plnicí stanice by byla z důvodu blízkosti výrobce a malého vytížení této stanice nerentabilní. Oba uvedené příklady jsou zjednodušené a vycházejí z předpokladu, že výrobce má veřejnou plnicí stanici nebo je ochoten ji vybudovat. V reálných případech budou hrát roli také aktuální finanční možnosti provozovatele autobusů. Tedy zda je schopen jednorázové větší investice nutné pro výstavbu plnicí stanice, nebo zda preferuje zvýšené provozní náklady v důsledku většího nájezdu kilometrů, spotřeby paliva, pracovního času řidičů a nemožnosti použít autobus, který je v danou chvíli na cestě k plnicí stanici, pro plnění zakázek.

Popsaný problém je podobný situaci v historii, kdy vznikaly nové autobusové dopravní systémy. Rozdíl je ten, že v současnosti zatím není vodíková technologie příliš rozšířená, zatímco v době rozvoje autobusů se spalovacím motorem už byly rozšířené osobní automobily využívající stejnou technologii. Pokud by systém s vodíkovými autobusy vznikal nyní, bude se kvůli němu muset vybudovat plnicí stanice a nabízí se proto možnost, aby to bylo přímo v areálu pro údržbu a parkování autobusů. Ovšem pokud se dopravní prostředky s vodíkovým pohonem rozšíří, bude častěji nastávat situace, kdy bude pro provozovatele autobusů jednodušší využít veřejnou plnicí stanici než budovat vlastní. To je ale zatím jen výhled do budoucna.

V současné době je všeobecně (ve světě) množství plnicích stanic nedostačující pro větší rozšíření vodíkových autobusů i osobních automobilů. Jelikož autobusy obvykle provozují hlavně velké společnosti, může se jejich provoz rozšířit dříve. Linkové autobusy jednoho provozovatele jezdí většinou po podobných trasách v omezeném prostoru, tedy například v jednom městě a jeho okolí. Proto nejsou závislé na velké síti plnicích stanic, ale stačí jim jedna. Horší je situace pro provozovatele zájezdové dopravy. Ti se nemohou stát prvními průkopníky vodíkového pohonu a musejí počkat na vybudování větší sítě plnicích stanic.

S rozšířením vodíkové infrastruktury je podobný problém jako s elektromobilitou. Nikdo není ochoten stavět plnicí stanice pro neexistující vozidla a nikdo není ochoten vyrábět a kupovat vozidla, která není kde natankovat. Tento začarovaný kruh lze rozbít díky několika možnostem:

- a) Budování infrastruktury je podpořeno státem
- b) Výrobci vozidel vyvíjejí vozidla, protože počítají, že časem budou mít uplatnění a nechtějí být pozadu za konkurencí
- c) Nákup vozidel je státem zvýhodněn oproti konvenčním vozidlům

Elektromobilita je v současnosti o krok dál. Elektrických vozidel je již provozováno více než těch vodíkových, vyrábí je mnoho automobilek a síť dobíjecích stanic se rychle rozrůstá. Výhoda je také v tom, že výroba a distribuce elektřiny již existuje. Tato výhoda ale není tak velká, jak se na první pohled může zdát. Pro větší rozšíření elektromobilů je potřeba zvýšit výrobní kapacity elektráren, a to kvůli současnému zájmu využívat k tomu moderní obnovitelné zdroje znamená i řešit komplikovaný problém ukládání elektrické energie.

Vodíková infrastruktura je oproti tomu zatím méně rozšířená. Jak již bylo uvedeno, v případě linkových autobusů je to menší problém než u osobních automobilů či zájezdových autobusů. Z toho vyplývá, že vodíkové autobusy v linkové dopravě by mohly nastartovat rozvoj vodíkové mobility. Ale jen za předpokladu, že plnicí stanice a výrobní vodíku pro ně zbudované budou přístupné i ostatním provozovatelům vodíkových vozidel.

5 VÝROBA VODÍKU

Vodík lze vyrábět několika způsoby, které se liší svými vlastnostmi a také smysluplností pro vodíkovou mobilitu jako celek. U jednotlivých způsobů je vhodné vyhodnotit následující aspekty:

- a) Vstupní suroviny (například voda, fosilní paliva) a jejich dostupnost
- b) Potřebné technologické vybavení
- c) Energetická náročnost procesu, účinnost
- d) Vedlejší produkty (například CO₂) a jejich množství
- e) Čistota vyrobeného vodíku

V současnosti se většina (asi 95 %) vodíku, který se v průmyslu vyrobí, spotřebuje v tom samém závodě [10]. Obvykle se používá pro výrobu různých chemických látek, a ne jako nosič energie [5]. Není zavedeno nějaké rozsáhlé vodíkové hospodářství, jako je tomu třeba u zemního plynu. Proto bude pro rozšíření vodíkové mobility nutno zajistit výrobu vodíku často v nových zařízeních. To lze vnímat jako komplikaci, neboť stavba nových zařízení je finančně i časově náročná, ale přináší to i výhodu v podobě méně omezeného výběru způsobu výroby vodíku. V případě rozšiřování stávajících výrobních kapacit tato možnost není.

5.1 VÝROBA VODÍKU Z FOSILNÍCH PALIV

Z fosilních paliv pochází většina světové produkce vodíku. V roce 2007 to bylo 96 %, z toho polovina ze zemního plynu [1]. Vstupní suroviny jsou zemní plyn, ropa nebo uhlí. Vedlejší produkty jsou oxidy uhlíku (CO a CO₂) [10]. Z toho, jaké jsou vstupní suroviny a vedlejší produkty, je patrné, že výroba vodíku z fosilních paliv není vhodným způsobem pro zásobování vodíkové mobility. Tímto způsobem by se nevyřešila závislost na problematických fosilních palivech, ani se dostatečně nesnížily globální emise skleníkových plynů.

Podle některých studií je takové využívání primární energie méně účinné a celková produkce oxidu uhličitého by byla větší [50]. Celková spotřeba energie zahrnující celý výrobní a distribuční proces může být u vodíku vyráběného ze zemního plynu 3,5krát větší než u benzínu a celkové emise skleníkových plynů 7,9krát větší [4], přičemž hodnoty jsou vztaženy na jednotku energie a nezahrnují proces využití paliva, při němž u benzínu vznikají další skleníkové plyny. Podle jiných údajů může provoz automobilu s palivovým článkem na vodík vyrobený parní reformací zemního plynu ušetřit skoro 40 % emisí skleníkových plynů oproti konvenčnímu vozu [28]. Každopádně ale nejde o perspektivní možnost. Výhoda této koncepce je v eliminaci či alespoň značném snížení (podle způsobu využití vodíku ve vozidle) lokálních emisí škodlivých látek, což je důležité zejména ve městech.

Problém s emisemi CO₂ lze zmírnit jeho zachytáváním a dalším použitím. Technologií, která pomocí kryogenního procesu zachytává 60 až 90 % vznikajícího CO₂ a dále jej čistí pro další využití v průmyslu, se zabývá společnost Air Liquide. Její první instalovaná jednotka (instalována ve Francii) má roční kapacitu 100 000 tun CO₂ [17]. Ekonomická stránka tohoto procesu však není autorovi známa.

Při parní reformaci zemního plynu dochází k reakci uhlovodíků s vodní párou za teploty 700 až 1000 °C, čímž vzniká vodík a oxid uhelnatý. Oxid uhelnatý se částečně využije ještě další

reakcí s vodní párou při teplotě okolo 350 °C a s katalyzátorem [10]. To je popsáno v následujících rovnicích.



Plyn se dále ochladí a v nízkoteplotním konvertoru se snižuje obsah oxidu uhelnatého. V kapalinovém absorbéru se pak absorbuje oxid uhličitý. Zbylý oxid uhelnatý a uhličitý je třeba odstranit, což se provede metanizací. Čistota výsledného vodíku může okolo 98 % [10]. Tyto procesy pro čištění vodíku lze nahradit jedním procesem zvaným pressure swing absorption, při němž se využívají molekulární síta a dosáhne se čistoty vodíku až 99,9 % [10]. Při parní reformaci vzniká na 1 kg vyrobeného vodíku 7,05 kg oxidu uhličitého [50]. Účinnost procesu lze ovlivnit poměrem reaktantů a běžně se pohybuje kolem 80 % [50].

Podobným způsobem lze vodík vyrábět také z uhlí, případně z koksu. Reaktanty úvodní reakce jsou uhlík a voda v podobě vodní páry za vysoké teploty [10], jak je vidět v rovnici:



Ve všech případech je nutno vstupní suroviny zbavit síry, pokud ji obsahují (typicky uhlí), protože síra poškozuje katalyzátor [10].

Další (v současnosti také často využívaný) způsob výroby vodíku z uhlovodíků je parciální oxidace. Obecně se jedná o exotermické reakce, při kterých dochází k oxidaci uhlovodíků s kyslíkem za vzniku oxidu uhelnatého a vodíku. Mohou vznikat také saze. Vstupní surovinou jsou některé ropné frakce. Existuje více variant procesu a může se jednat o proces katalytický i nekatalytický [12].

5.2 VODÍK JAKO VEDLEJŠÍ PRODUKT PRŮMYSLU

V některých průmyslových provozech vzniká vodík jako vedlejší produkt. Jeho výroba tedy není primárním účelem probíhajícího procesu. Pokud to není zároveň spojeno s jiným průmyslovým provozem, který vodík spotřebovává, bylo by možné tento vodík využívat jako palivo pro vodíkové autobusy provozované v okolí.

Na Ostravsku se chystá výroba vodíku z koksárenského plynu [27]. Koks se vyrábí z černého uhlí pyrolýzou při vysoké teplotě a bez přístupu vzduchu a mezi vedlejší produkty patří mimo jiné koksárenský plyn [45]. Teploty, kterou tento proces vyžaduje, se dosahuje spalováním vyčištěného koksárenského plynu [45]. V koksárenském plynu je vodík zastoupen 39 až 65 % objemu, další velkou část tvoří methan [23]. Tento vodík je možné od ostatních plynů oddělit a použít k pohonu autobusů.

Dalším procesem, při němž jako vedlejší produkt vzniká vodík, je elektrolýza solanky, tedy roztoku chloridu sodného ve vodě. Vyrábí se tak chlor a hydroxid sodný [10]. Množství vodíku vzniklého při tomto procesu je značné a lze jej ovlivnit koncentrací chloridu sodného ve vodě. Pro představu například ve Velké Británii se ročně vyrobí zhruba 10^6 tun chloru, což odpovídá 28 000 tunám vodíku [10].

5.3 VÝROBA VODÍKU Z BIOMASY

Vodík lze vyrábět také z biomasy. Výhody a nevýhody tohoto způsobu výroby závisí mimo jiné na výběru vstupní suroviny a na tom, jak tato surovina vzniká. Některé suroviny jsou spojeny s podobnými otázkami, jaké se řeší v souvislosti s biopalivy první generace. Hojně diskutován bývá smysl výroby biopaliv z plodin, které lze využívat jako potraviny a krmiva, a také celková ekologická bilance takového systému. Jelikož není účelem této práce tuto komplexní problematiku posoudit, lze pouze doporučit zaměřit se při tvorbě nové vodíkové infrastruktury na méně kontroverzní plodiny. Velmi vhodnou vstupní surovinou je odpadní biomasa. Vzniká jí velké množství a zdaleka ne všechna je využita.

Obecně velkou výhodou biomasy je to, že se jedná o obnovitelný zdroj. Biomasa má navíc minimální obsah síry, díky čemuž jsou emise oxidu siřičitého zanedbatelné [32] a také nehrozí poškození katalyzátorů používaných v některých chemických procesech.

Možným zdrojem je také splašková voda, jejíž využití umožňuje relativně levnou výrobu vodíku [1]. Při čištění splaškové vody totiž vzniká čistírenský kal, který je dále zpracováván methanizací (rozkládají jej bez přístupu vzduchu mikroorganismy) [39]. Tento zdroj by mohl tvořit část produkce vodíku, ale v případě větší spotřeby nebude sám o sobě dostatečný. Pro ilustraci možností v lokálním měřítku může sloužit projekt autobusů na bioplyn v Brně, který byl stručně popsán v kapitole 3.4. Množství vodíku ale bude menší, protože hlavní složkou bioplynu je methan [39].

Parní reformace biomasy se skládá z pyrolýzy, při které vznikají plyny (methan, vodík, oxid uhelnatý), a z další fáze, při níž se ze zbylých pevných složek biomasy pomocí vodní páry stane vodík a oxid uhelnatý [51]. Proces je podobný parní reformaci zemního plynu, která byla popsána v kapitole 5.1.

Za nižší teploty probíhá katalytická parní reformace bioplynu. Plyn vzniklý z biomasy, který obsahuje methan, reaguje s vodní parou za přítomnosti katalyzátoru, kterým je obvykle nikl [51]. Podobným způsobem lze zpracovávat také bioethanol. Následně je pak potřeba vzniklý vodík ještě různými způsoby čistit.

Pro biologické procesy může být vstupní surovinou i biomasa s vysokým obsahem vody, zatímco u předešlých termochemických procesů byla ekonomicky využitelná jen biomasa suchá [51]. V biologických procesech je zásadní působení mikroorganismů (obvykle anaerobní bakterie či řasy), které žijí ve vodním prostředí, za normálního tlaku a teploty [32]. Jelikož je těchto procesů celá řada a jejich detailní popis by byl nad rámec této práce, budou stručně shrnuty jejich podstatné vlastnosti. Biologické procesy jsou energeticky méně náročné než termochemické a jsou z ekologického hlediska přijatelné [32]. Přímá biofotolýza vyžaduje velkou plochu a světlo a pro svou velmi nízkou účinnost je neperspektivní. Vhodnější je tmavá anaerobní fermentace s účinností srovnatelnou s konvenčními metodami (60 – 80 %) [32].

Nejperspektivnější biologický proces je metoda BEAMR (bioelektrochemicky podporované mikrobiální reaktory) využívající elektrochemické hydrogenace k přímé přeměně biologicky rozložitelného materiálu na vodík a dosahující vysoké účinnosti teoreticky až 92 % [32]. Jde vlastně o upravený mikrobiální palivový článek, k jehož fungování je potřeba dodat malé elektrické napětí. Vzniká v něm velmi čistý vodík (i přes 99,5 %) [32], což je velká výhoda oproti metodám vyžadujícím čištění produktu.

5.4 ELEKTROLÝZA

Při elektrolýze vody v elektrolyzátoru se při průchodu stejnosměrného elektrického proudu rozkládají molekuly vody na molekuly vodíku a kyslíku [5]. Produkty základní chemické reakce (viz rovnice níže) jsou tedy čistý vodík a čistý kyslík.



Vodík se tvoří na katodě, kyslík na anodě [5]. Takto vyrobený vodík je velmi čistý a většinou jej není potřeba dále upravovat [50], což je velká výhoda elektrolýzy.

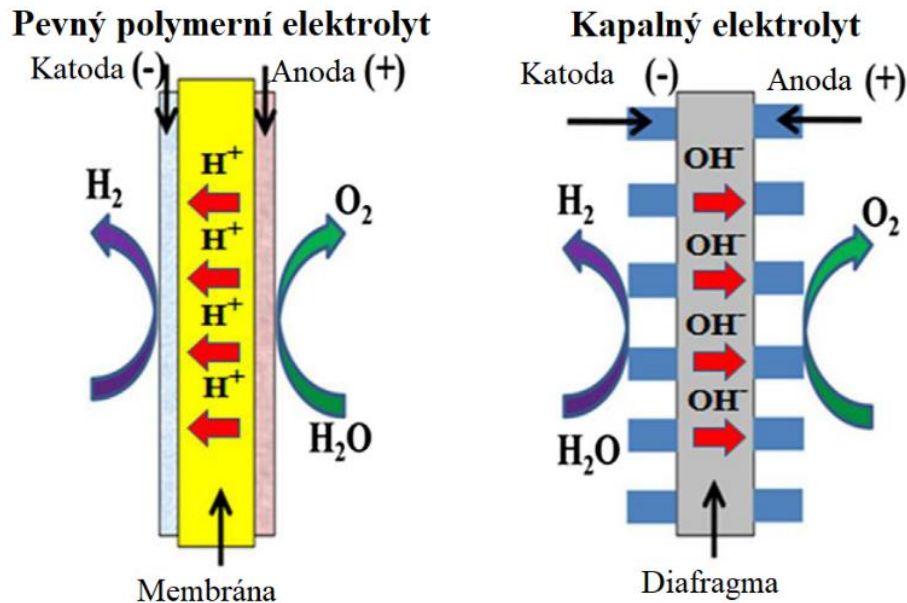
5.4.1 STANDARDNÍ ELEKTROLÝZA

Samotný proces elektrolýzy má účinnost zhruba 80 až 92 % [50]. Běžné komerční elektrolyzéry mají účinnost kolem 70 % [1]. Hlavním problémem je ale výroba elektřiny, kterou je elektrolyzátor napájen. Podle toho, jaké zdroje elektrické energie jsou k dispozici, může být elektrolýza ve srovnání s jinými způsoby výroby vodíku dobrým i špatným řešením. Při použití konvenčních zdrojů bude celková účinnost výroby vodíku asi 25 až 35 % [50], podle jiných zdrojů jen 20 % [1]. Konkrétní hodnota se v různých částech světa liší podle používaných elektráren.

Elektrolýza se tak ekonomicky a ekologicky vyplatí pouze pokud je k dispozici levný a obnovitelný zdroj elektrické energie. Dobrou možností by bylo využití elektrolýzy pro spotřebovávání elektrické energie v době jejího přebytku v síti [50]. Tento stav nastává s rozšiřováním alternativních obnovitelných zdrojů elektrické energie stále častěji a dosud nebyl uspokojivě vyřešen. Metod pro uchovávání elektrické energie je několik a zatím se žádná pro tento účel jednoznačně neprosadila. Výroba vodíku by mohla velmi přispět k řešení tohoto problému. Podmínkou však je, aby provoz dostatečně pružně reagoval na stav elektrické sítě. Z principu je ekonomičtější, aby drahé zařízení, kterým elektrolyzátor je, pracovalo neustále. Velké výkyvy v ceně elektřiny by však mohly být dostatečnou motivací pro přizpůsobování provozu potřebám elektrické sítě. Aby se nemusel regulovat výkon každé jednotky, je možné některé jednotky vypínat a zapínat [12].

Další výhodou elektrolýzy je nevelká náročnost na místní přírodní podmínky. V místě musí být zdroj vody. Díky tomu je možné umístit zařízení tam, kde to pro snadnou regulaci elektrické sítě dává smysl, nebo je také možné vytvořit malé lokální zařízení v místě spotřeby vodíku, což by ušetřilo náklady spojené s jeho transportem. Elektrolýzu lze provádět s výkonem jednoho elektrolyzátoru od jednotek kW do 2 000 kW [5], díky čemuž jsou oba uvedené případy (velká jednotka, malé lokální zařízení) realizovatelné.

Při alkalické elektrolýze je jako kapalný elektrolyt nejčastěji použit roztok hydroxidu draselného (KOH), obvykle v koncentraci 20 až 30 % [7]. Elektrody od sebe odděluje pórovitá diafragma, jejíž umístění je vidět na Obr. 1 vpravo. Tím se brání kontaktu vznikajícího vodíku a kyslíku [7]. Elektrody jsou ocelové nebo poniklované, případně z legované oceli s obsahem niklu [12].



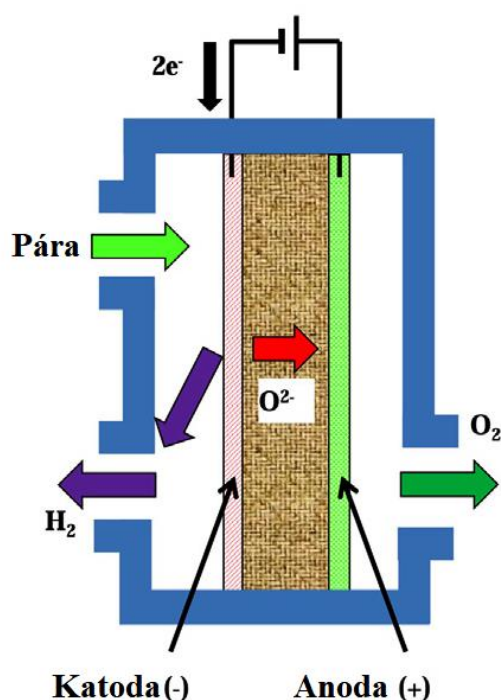
Obr. 1 Principy fungování elektrolyzérů [7]

Druhou variantou standardní elektrolýzy je elektrolýza s pevným polymerním elektrolytem. Jelikož zde dochází k výměně protonů přes membránu, užívá se zkratka PEM (proton exchange membrane). Jak je znázorněno na Obr. 1 vlevo, kladné ionty vodíku prochází membránou na katodu, kde dojde k rekombinaci s elektrony a vytvoří se plynný vodík, zatímco na anodě se produkuje kyslík [7]. Nevýhodou této technologie je cena membrány a cena ušlechtilých kovů používaných na elektrody a plnicí funkci katalyzátoru reakce [5]. Pro tento účel se hodí hlavně platina a iridium [5]. Jejich použití je drahé a kvůli omezeným zásobám do budoucna zásadně omezuje masové rozšíření PEM elektrolyzérů a palivových článků [30]. Proto se snížení jejich množství či úplné náhradě věnuje řada výzkumů.

Jednou ze zkoumaných alternativ je fosfid kobaltu. Tato technologie byla úspěšně vyzkoušena v komerčním PEM elektrolyzérů s plochou elektrod 86 cm² za zvýšeného tlaku a teploty po dobu větší než 1700 hodin a vykazala o 12 až 18 % menší výkon oproti standardnímu řešení s platinou, ovšem s mnohem menšími náklady na materiál [14]. Pro průmyslové použití a výrobu bude ještě potřeba další vývoj. Další alternativou je technologie, kterou vyvíjí tým profesora Vladimíra Matolína na Karlově univerzitě. Ta sice jako katalyzátor na anodě využívá platinu a iridium, ale ve velmi malém množství, a to díky tomu, že se magnetronovým naprašováním vytvoří velmi tenká vrstva platiny a iridia na podpůrném materiálu na bázi karbidu titanu [30].

5.4.2 VYSOKOTEPLTNÍ (PARNÍ) ELEKTROLÝZA

Vysokoteplotní elektrolýza, zvaná též parní, je od standardní odlišná tím, že dodávaná energie je jednak elektrická, jednak tepelná. Do elektrolyzátoru vstupuje vodní pára a vystupuje z něj vodík a kyslík, jak je vidět na Obr. 2. Jde o děj opačný vůči ději v palivovém článku s pevnými oxidy [7]. Díky dodané tepelné energii je spotřeba elektrické energie menší než u standardní elektrolýzy, a i celková účinnost je větší – až 45 % [50]. Platí, že když je teplota vstupující páry vyšší, je spotřeba elektrické energie nižší [9]. Další výhodou spočívá v tom, že jsou menší problémy s korozí, neboť se v elektrolyzátoru nevyskytují jiné látky než voda, kyslík a vodík [50].



Obr. 2 Princip fungování vysokoteplotního elektrolyzátoru [7]

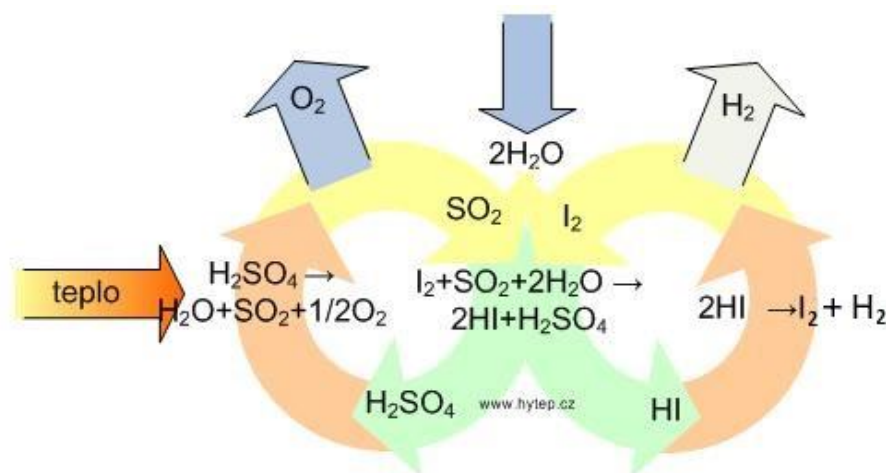
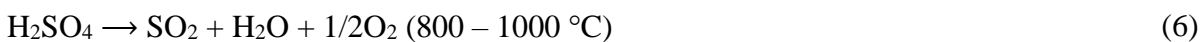
Vysokoteplotní elektrolýzu je nutné spojit s vhodným zdrojem tepla pro ohřev vody a její přeměnu na páru, což může být jaderná elektrárna [5]. Elektrický ohřev vody pro tvorbu páry by nedával ekonomický smysl, jelikož by měl menší celkovou účinnost. Vysokoteplotní elektrolýza tedy na rozdíl od standardní nemůže řešit přebytek elektrické energie v síti způsobem, který byl již popsán v této kapitole. Pokud by ale byla spojena s jadernou elektrárnou, která většinou nemůže dostatečně pružně reagovat, dala by se energie jaderné elektrárny využívat více či méně podle toho, jak to situace v síti vyžaduje. Aby ale nedocházelo k příliš nevhodnému provozu vysokoteplotní elektrolýzy, jednalo by se pouze o mírné zvyšování a snižování výkonu, ne o úplné odstavení. Toto řešení proto nemá potenciál problém vyřešit, ale může alespoň mírně pomoci.

5.5 TERMOCHEMICKÉ CYKLY

Přímý rozklad vody na vodík a kyslík je kvůli potřebě teplot značně překračující 1000 °C i dnes nevyřešený problém, pročež byla věnována pozornost výzkumu termochemických cyklů, v nichž se rozklad vody rozdělí do několika stupňů a sníží se tak požadavky na teplotu [12].

Termochemické cykly jsou iniciovány teplem a vstupní surovina je voda. V případě uzavřených cyklů se další zúčastněné chemické látky používají neustále opakovaně. Výstupní produkty jsou vodík a kyslík. [50]

Díky využití výpočetní techniky bylo objeveno kolem 10 000 termochemických cyklů rozkladu vody [10]. Jako příklad bude uveden siřičito-jodový termochemický cyklus, který je jedním z nejslibnějších. První krok je reakce vody s jódem a oxidem siřičitým, přičemž vzniká teplo. Vzniklá kyselina sírová se v dalším kroku rozkládá, což vyžaduje velké množství tepla. Méně tepla pak vyžaduje rozklad kyseliny jodovodíkové na jod a vodík [50]. Uvedené chemické reakce jsou popsány následujícími rovnicemi [50] a celý cyklus je přehledně znázorněn na Obr. 3.



Obr. 3 Siřičito-jodový termochemický cyklus [50]

Účinnost celého výrobního cyklu vodíku se pohybuje od 40 do 52 %, přičemž při vyšší teplotě je účinnost vyšší – například při 950 °C je účinnost 50 %. Výhoda oproti elektrolýze je, že nedochází ke ztrátám při výrobě elektrické energie [50]. Cyklus je však závislý na vhodném zdroji vysokopotenciálního tepla a náročná je i konstrukce zařízení, které musí být chemicky odolné vůči použitým kyselinám [9].

Vedle termochemických cyklů existují ještě hybridní termochemické cykly, které kombinují termochemické reakce a elektrolýzu. Výrobní náklady na takové zařízení jsou vysoké, ale reakce probíhají a nižší teploty a také je snazší dosáhnout vyšší čistoty vodíku [50]. Hybridních cyklů je mnoho a jejich účinnost je různá, ale obvykle nevynikají účinností nad termochemickými cykly. Oproti elektrolýze je spotřeba elektrické energie výrazně nižší [50].

5.6 SHRNUÍ VÝROBY VODÍKU

S pomocí Tab. 1 je možné porovnat účinnost některých způsobů výroby vodíku, což má smysl zejména pro globální zamyšlení nad volbou vhodné metody výroby vodíku. V konkrétních regionech budou při budování vodíkové infrastruktury hrát větší roli konkrétní místní podmínky, finanční možnosti investora a také dostupnost vstupních surovin, které jsou v Tab. 1 rovněž uvedeny.

Pokud má mít vodíková mobilita výrazný ekologický přínos, je nutno vyloučit výrobu vodíku z fosilních paliv, a to z důvodů uvedených v kapitole 5.1. U technologií výroby vodíku, které vyžadují dodávání velkého množství elektrické či tepelné energie je nutno brát v potaz způsob výroby těchto energií. Jako smysluplné se jeví využití obnovitelných zdrojů energie a zároveň použití zařízení na výrobu vodíku jako prostředku pro regulaci elektrické přenosové soustavy, k čemuž se hodí zejména výroba vodíku elektrolýzou.

Tab. 1 Přehled technologií výroby vodíku a jejich účinnosti [32]

Technologie	Vstupní suroviny	Účinnost (%)
Parní reformování	Uhlovodíky	70 – 85 ^a
Parciální oxidace	Uhlovodíky	60 – 75 ^a
Zplyňování biomasy	Biomasa	35 – 50 ^a
Tmavá fermentace	Biomasa	60 – 80 ^b
Fotofermentace	Biomasa + solární energie	0,1 ^c
Mikrobiální elektrolytický článek	Biomasa + elektrická energie	78 ^d
Alkalický elektrolyzér	Voda + elektrická energie	50 – 60 ^e
PEM elektrolyzér	Voda + elektrická energie	55 – 70 ^e
Termochemické štěpení vody	Voda + teplo	NA ^f
Fotoelektrochemické štěpení vody	Voda + solární energie	12,4 ^g

a Tepelná účinnost založená na spalném teple.
b Teoretické maximum 4 mol H₂ na 1 mol glukózy.
c Přeměna solární energie na vodík organickými látkami, nezahrnuje čištění vodíku.
d Celková energetická účinnost zahrnující napětí a energii v substrátu.
e Výhřevnost vyrobeného vodíku, na kterém se podílí elektrická energie elektrolyzních článků.
f Účinnost není v původním zdroji uvedena, jiný odhad je uveden v kapitole 5.5.
g Přeměna solární energie na vodík štěpením vody, nezahrnuje čištění vodíku.

6 SKLADOVÁNÍ VODÍKU

Vodík mnohdy nelze spotřebovat plynule ihned po vyrobení a v případě jeho využití pro pohon vozidel to není možné vůbec. Proto je nutné jej skladovat, a to jak ve stacionárních úložištích, tak v nádržích ve vozidlech. Jak bylo uvedeno v kapitole 4, skladování vodíku tvoří několik článků řetězce mezi výrobou a spotřebou vodíku. Kvůli vlastnostem uvedeným v kapitole 1 je však skladování vodíku ve srovnání s jinými palivy značně problematické a jde tedy o velkou komplikaci rozvoje vodíkové mobility.

U vodíkových nádrží pro vozidla jsou důležitými parametry energetická účinnost, hmotnost, velikost (zabraný prostor), množství uloženého paliva, kompatibilita s další infrastrukturou, cena a také bezpečnost [6]. O bezpečnosti bude blíže pojednáno v kapitole 10.

6.1 STLAČENÝ PLYN

Skladování vodíku ve formě stlačeného plynu lze označit za základní způsob. Jde o dlouhodobě používanou a prověřenou metodu. Výhoda je také v tom, že při správné konstrukci nádrže umožňuje skladování vodíku i po delší dobu beze ztrát [6].

Pro statické uložení vodíku se běžně používají ocelové (z nízkouhlíkaté nebo legované oceli) bežešvé lahve o objemu do zhruba 50 litrů [35]. Ne všechny oceli jsou vhodné kvůli odolnosti vůči poškození difuzí vodíku [6]. Ocelové nádoby jsou spolehlivé, ale velmi těžké [6]. Pro skladování vodíku ve velkém měřítku v plynné podobě se uvažuje také o využití velkých podzemních prostor bývalých dolů, ale to není pro vodíkovou mobilitu zásadní.

V mobilních aplikacích se používají tlakové nádoby o objemech do zhruba 300 litrů vyrobené z kompozitních materiálů a jejich vnitřní stěna je pokryta tenkou vrstvou kovu či vhodného polymeru [35]. Hlavní výhoda kompozitních lahví je jejich nižší hmotnost [6]. Běžný tlak je 350 bar, používá se ale až 700 bar a je snaha tlak zvětšovat, aby se zmenšil objem nádob, přičemž za technologický limit je považován tlak 1000 bar [35]. V současnosti se tlak 700 bar používá u osobních automobilů, protože je důležitý co nejmenší zástavbový prostor. U autobusů je používán tlak 350 bar, protože je konstrukce nádrže a dalších zařízení levnější a zástavbový prostor není u autobusu takovou prioritou [21], [28]. Nádrže jsou obvykle umístěny na střechu a není tedy problém s nedostatkem prostoru.

Například jedna z komerčně dostupných tlakových nádob pro vozidla, která pojme 120 l vodíku při tlaku 700 bar, má hmotnost 84 kg a zabírá prostor o objemu 200 l [6].

Teoreticky je ideální tvar tlakové nádoby koule, ale protože je takový tvar velmi nepraktický, používá se válec s vypouklými podstavami, případně mírně deformovaný podobný tvar.

Při plnění vodíku do tlakových lahví je potřeba jej stlačit kompresorem. Technologie je podobná jako u zemního plynu. Při větším tlaku jsou však větší nároky na konstrukci a materiály všech zařízení, takže roste jejich cena. Energie, kterou je nutno vynaložit na stlačení vodíku na tlak 350 bar, odpovídá zhruba 30 % energie v tomto vodíku uložené [35].

Potenciál technologie jako takové je téměř vyčerpán [35]. Do budoucna lze očekávat rozšíření používání vyšších tlaků a také mírné snížení hmotnosti tlakové nádoby díky vylepšování materiálů.

Novou velmi odlišnou technologií skladování plynného vodíku jsou duté skleněné mikrokuličky, které mají průměr v řádech desítek až 200 mikrometrů. Plní se vodíkem difuzí přes stěnu za zvýšené teploty (200 °C) a tlaku a následně se z nich vodík při opětovném zvýšení teploty zase uvolňuje. Tyto kuličky (plné vodíku) by se mohly plnit do nádrže vozidla podobně jako tekutina a prázdné (bez vodíku) by se zase odčerpaly. Systém by vyžadoval speciální infrastrukturu a realizace není známa. [36]

6.2 KAPALNÝ VODÍK

Kvůli vlastnostem uvedením v kapitole 1 je skladování vodíku v kapalném skupenství nesrovnatelně náročnější než u jiných běžných paliv. Jde především o velmi nízkou teplotu varu a také nízkou kritickou teplotu, takže i při zvýšeném tlaku musí být teplota velmi nízká. Pro dosažení této teploty je další komplikace velká měrná tepelná kapacita, takže je k tomu potřeba hodně energie. Tato energie odpovídá zhruba 40 % energie uložené ve vodíku [35]. I přesto je skladování vodíku v kapalném skupenství použitelná možnost, protože tak lze dosáhnout velké hustoty energie (srovnání je v kapitole 6.4). Při využívání vodíku se pak vodík mění zase na plyn [22], k čemuž stačí teplo z okolí.

Při zkvalitňování je důležitá čistota vodíku. Všechny plyny kromě helia totiž mají vyšší teploty varu nebo tání než vodík a mohly by ztuhnout a způsobovat problémy v systému [24], [12]. V případě kyslíku je jeho co nejmenší obsah důležitý také kvůli nebezpečí exploze [12].

Nádoby jsou konstruovány jako vícevrstvé a s velmi dobrou izolační schopností [35]. To proto, že když se vodík ohřeje, stává se z něj opět plyn, čímž se zvyšuje tlak v nádrži. Aby nedošlo k roztrhnutí nádrže, musí být opatřena bezpečnostním mechanismem, který umožní únik tlaku. Tak vznikají ztráty asi 3 % obsahu za den [35], což je velká nevýhoda tohoto způsobu skladování vodíku. Jak velké jsou ztráty záleží na tom, jak dobře je nádrž izolovaná a kolik tepla se přeneso z okolí na vodík. Tyto ztráty by byly zásadní problém u některých automobilů, pokud by jimi uživatel jezdil pouze občas. U linkových autobusů o tomto řešení lze uvažovat, protože většina z nich je v provozu každý den. Unikající vodík může být jímán a stlačován do tlakových lahví [35], ale systém je pak složitější, těžší, a i tak dochází k energetické ztrátě.

6.3 SKLADOVÁNÍ V HYDRIDECH A DALŠÍ ZPŮSOBY S VÁZANÝM VODÍKEM

Vodík lze skladovat také absorbovaný v materiálech na bázi kovů zvaných hydridy. Při absorpci se uvolňuje teplo, naopak při desorpci se musí teplo dodat. Potřebná teplota se velmi liší, může být kolem 10 °C, ale i 300 °C, což už by byla nevýhoda [36]. Množství tepla uvolňovaného při tankování vodíku nebývá tak velké, aby tuto metodu znevýhodňovalo [6].

Skladování v hydridech vyžaduje výrazně méně místa než systémy s kapalným nebo plynným vodíkem, objemová hustota energie je vysoká [6]. Nevýhodou je ale větší hmotnost. Při využití sloučenin lehkých kovů (například hořčík) je hmotnost celého systému o 30 % vyšší než v případě kapalného vodíku [36]. Další nevýhody jsou malý tlak uvolňovaného vodíku a také vysoká cena hydridu [36].

Použití hydridů bylo považováno za velmi perspektivní v 80. letech 20. století [12], ale v komerční sféře se dosud nerozšířily. Možností je mnoho a jsou v různém stadiu vývoje. Za technologie s velkým potenciálem dalšího rozvoje jsou pokládány i nyní.

Novější technologií jsou nanomateriály, jejichž základem je uhlík. Jde o různé velmi porézní struktury, které mají schopnost skladovat vodík [6]. Tyto materiály jsou intenzivně zkoumány, ale zatím se prakticky nepoužívají.

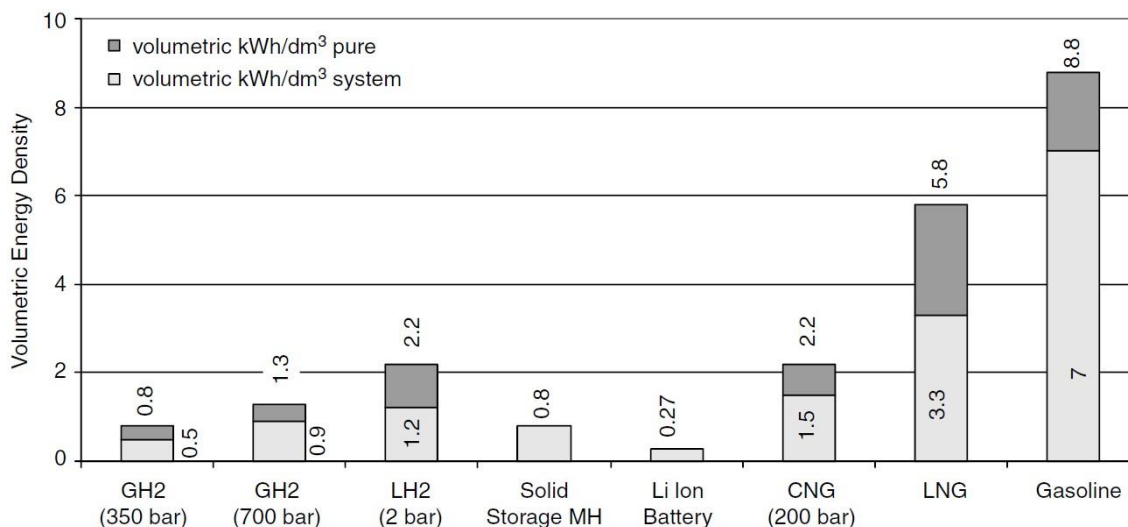
Vodík se vyskytuje také vázaný v různých primárních surovinách pro výrobu vodíku. Jeho výroba z těchto surovin je ale náročná technologicky i energeticky, jak bylo popsáno v kapitole 5, a výroba vodíku přímo ve vozidle by byla komplikovaná. Toto řešení se zvažuje spíše jako dočasné při nedostatečné vodíkové infrastruktuře [2].

6.4 SROVNÁNÍ METOD SKLADOVÁNÍ VODÍKU

Pro srovnání metod skladování vodíku je použito objemové a gravimetrické hustoty energie. Do srovnání jsou zařazena také některá další paliva a způsoby ukládání energie, které jsou použitelné pro vozidla.

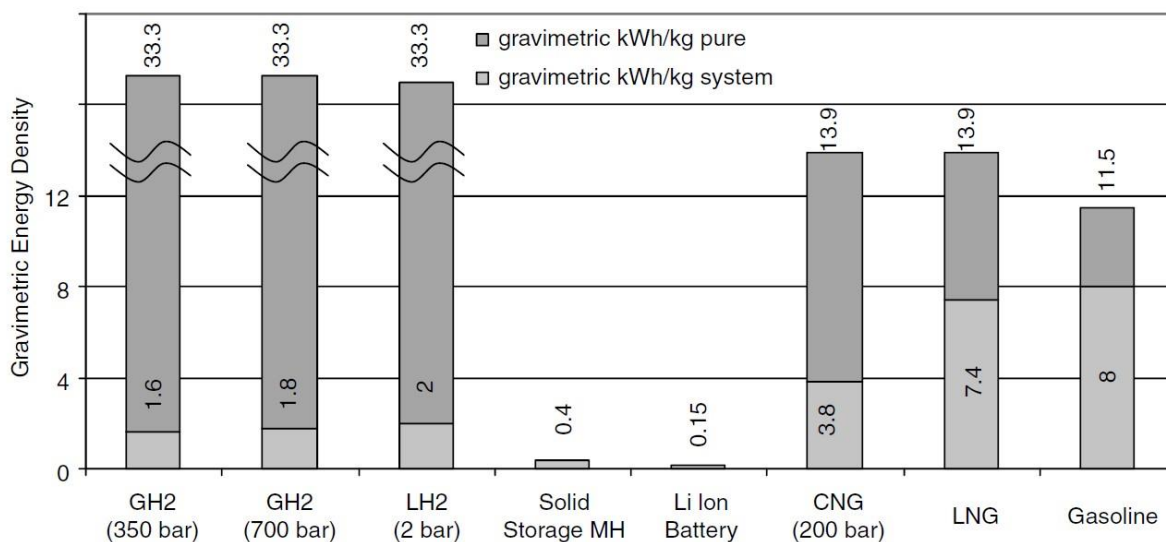
Toto srovnání je nutno vnímat s vědomím, že jde o srovnání hustot energie. To samo o sobě neoznačuje nejvhodnější technologii skladování vodíku. Jak bylo popsáno v předešlých kapitolách, jednotlivé technologie mají různé další výhody a nevýhody, jejichž závažnost se navíc může lišit podle konkrétní aplikace. Například skladování kapalného vodíku, které z tohoto srovnání vychází nejlépe ze tří hlavních metod skladování vodíku, má mimo jiné značnou nevýhodu ve ztrátách paliva v čase bez spotřeby. U uvedených dalších způsobů ukládání energie (elektrické lithium-iontové akumulátory, CNG, LNG, benzín) je nutno brát v úvahu nejen jejich další výhody a nevýhody pro konkrétní aplikace, ale také rozdílnou účinnost využití uložené energie pro pohon vozidla.

Jak je vidět na Obr. 4, nejvyšší objemovou hustotu energie má systém s kapalným vodíkem. Konvenční fosilní paliva vychází ze srovnání výrazně lépe, zatímco elektrické lithium-iontové akumulátory nejhůře.



Obr. 4 Objemová hustota energie pro různé technologie [6]

Ve srovnání gravimetrické hustoty energie na Obr. 5 jsou horší technologie s velkou hmotností, tedy skladování vodíku v hydridech a lithium-iontové elektrické akumulátory. Ostatní vodíkové systémy mají gravimetrickou hustotu energie výrazně vyšší a vzájemně podobnou, fosilní paliva zhruba třetinovou.



Obr. 5 Gravimetrická hustota energie pro různé technologie [6]

Pro autobusy se vzhledem k dříve uvedeným vlastnostem a srovnání nyní dobře hodí skladování plynného vodíku pod vysokým tlakem a také kapalný vodík. Skladování v hydridech však díky možnému dalšímu vývoji do budoucna nelze vyloučit.

7 TRANSPORT VODÍKU

Pokud se plnicí stanice nachází přímo vedle zařízení pro výrobu vodíku, transportuje se vodík jen na krátkou vzdálenost potrubím. Tím se infrastruktura zjednodušuje, jak bylo již naznačeno v kapitole 4. Někdy to ale není možné a pak je nutné vodík přepravit na delší vzdálenost mezi místem výroby a místem spotřeby.

Transport vodíku v plynném skupenství potrubím je nejefektivnější možnost [9]. Technologie je podobná jako u zemního plynu, ale kvůli vlastnostem vodíku je větší náročnost konstrukce a volby materiálů. K úniku vodíku dojde snáze než k úniku zemního plynu [12]. Materiály také musí odolávat difuzi vodíku do krystalové mřížky a tím způsobené změně vlastností zvané vodíková křehkost. Používá se často ocel s různou vnitřní povrchovou úpravou [42]. Potrubní systémy se vzhledem k vysokým nákladům na vybudování vyplatí v případě pravidelného dlouhodobého transportu většího množství vodíku po stálé trase.

Ve Spojených státech amerických existuje několik sítí pro distribuci vodíku v celkové délce asi 2600 km [24]. Jejich provoz se dlouhodobě projevuje jako bezpečný a efektivní [9]. Nejsou však příliš dlouhé (ve srovnání s distribuční sítí zemního plynu) a pracují s nevelkým konstantním tlakem [9].

V německém Porúří existuje od roku 1938 postupně rozšiřovaná distribuční síť vodíku o délce 215 km, která pracuje s tlakem 25 bar a má průměr potrubí 168 až 273 mm [42]. Spojuje několik chemických podniků, z nichž větší počet tvoří spotřebitelé vodíku [12]. Provoz je dlouhodobě rovněž hodnocen jako bezpečný [42].

Kromě uvedených příkladů existují ve světě i další různě rozsáhlé vodíkové sítě. V roce 2016 bylo ve světě více než 4500 km potrubí na vodík, přičemž většina byla provozována výrobcí vodíku [24].

Co se týče kapalného vodíku, je lepší vodík napřed zkapalnit ve velkém zařízení a poté dopravovat na místo spotřeby [12]. Při dopravě potrubím by bylo nutné vodík na delší trase dochlazovat, což dále zvýší energetické nároky.

Vodík lze transportovat také po částech v různé formě v nádržích. K tomu slouží různé technologie skladování vodíku popsané v kapitole 6, ovšem ve větším měřítku. Nádrže se umísťují na nákladní automobily, vlaky nebo lodě. Nevýhoda je v menší efektivitě [9]. Výhoda je ve velké variabilitě a možnosti dopravovat vodík na různá měnící se místa.

Pro úplnost bude uvedeno, že další možností, jak dopravit vodík k místu spotřeby, je jeho přimíchávání do distribuční sítě zemního plynu. To je možné jen do určitého procentuálního podílu vodíku v zemním plynu, který například v Německu činí 10 %, a který se stanovuje s ohledem na bezpečnost a technické možnosti součástí distribuční sítě [24]. V tom případě už se nejedná o čistě vodíkové hospodářství, ale vodík se stává součástí hospodářství zemního plynu. Lze jej tedy využívat pouze spolu se zemním plynem například pro ohřev vody a vaření v domácnostech či k pohonu vozidel na zemní plyn. V kontextu pouze vodíkové mobility, tedy vozidel poháněných pouze vodíkem, je toto řešení irelevantní.

8 PLNICÍ STANICE

Plnicí stanice slouží k plnění vodíku do nádrže vozidla, přičemž způsob plnění závisí na způsobu skladování vodíku ve vozidle. Součástí plnicí stanice je kromě samotného plnicího zařízení také zásobník vodíku.

Nejjednodušší je, když je vodík do plnicí stanice dodáván a v ní skladován ve stejné formě, v jaké je pak plněn do nádrže vozidla. Pokud tomu tak není, musí být součástí stanice odpovídající zařízení. Například pokud je vodík dodáván do plnicí stanice v plynném skupenství, ale stanice je určena pro plnění vozidel s nádržemi na kapalný vodík, musí být její součástí také zařízení pro zkapalnění vodíku. Tím se pořizovací i provozní náklady plnicí stanice značně zvyšují.

V případě, že se pracuje s plynným vodíkem, bývá tlak v zásobníku u plnicí stanice nižší než tlak v nádrži vozidla [21]. To proto, že zásobník u plnicí stanice není tak omezen prostorem a zásobník na nižší tlak je konstrukčně jednodušší a levnější. Existují dva systémy plnění plynného vodíku do nádrže vozidla, které se liší ve způsobu, jakým se dosáhne správného tlaku v nádrži [21]:

Kaskádový (overflow) plnicí systém vyžaduje, aby stanice měla dva zásobníky vodíku. Jeden je větší a je v něm nižší tlak, zatímco druhý je malý a je v něm vyšší tlak (například 450 bar je vhodná hodnota pro plnicí stanici na 350 bar). Během plnění se napřed propojí velký zásobník s nádrží vozidla, čímž se do ní dostane vodík pod nízkým tlakem. V dalším kroku se do nádrže vozidla pouští vodík z vysokotlakého zásobníku, čímž se plnění dokončí a dosáhne se žádaného tlaku v nádrži vozidla (například 350 bar). Tlak ve vysokotlakém zásobníku se doplňuje pomocí kompresoru, který se přímo neúčastní plnění [21], [24].

Booster plnicí systém využívá při plnění kompresor, který odebírá plynný vodík z nízkotlakého zásobníku a tlačí jej přímo do nádrže ve vozidle. Plnicí stanice tak má pouze jeden zásobník, případně více zásobníků se stejným tlakem [21].

Jelikož při plnění vodíku do nádrže dochází k jeho stlačování, čímž vzniká teplo. Teplota v nádrži by neměla překročit 85 °C. Protože je cílem provádět plnění zároveň rychle a bezpečně, může se vodík před plněním chladit. Pro plnění vodíku do nádrží na tlak 700 bar se vodík ochlazuje na -40 °C. Pokud je vodík do plnicí stanice dodáván a v ní skladován v kapalném formě a do vozidel se plní jako plyn, prochází procesem odpařování a není nutné jej dále chladit [24].

V souvislosti se zatím méně zavedenými způsoby skladování vodíku je otázkou, zda bude lepší plnění zásobníků přímo ve vozidle, nebo zda se lépe uplatní vyměnitelné zásobníky, které se plní mimo vozidlo. V případě autobusů či nákladních automobilů, které vyžadují výrazně větší zásobníky než osobní automobily, lze předpokládat spíše plnění ve vozidle, jelikož manipulace s velkými zásobníky by byla náročná.

V posledních několika letech bylo ve světě kolem 350 plnicích stanic, z toho asi 60 v USA [5] a asi 50 v Německu [49]. Jejich počet se postupně zvyšuje. V prosinci 2019 fungovalo v Německu už 78 plnicích stanic a dalších 27 bylo ve fázích zkušebního provozu, výstavby, schvalování či plánování, takže během roku 2020 by Německo mohlo překonat počet 100 plnicích stanic. V Jižní Koreji byl v roce 2019 počet plnicích stanic více než zdvojnásoben na 30 a státní plány počítají se 310 stanicemi v roce 2022. Vedoucí postavení v počtu plnicích

stanic v současnosti zaujímá Japonsko, kde se nachází 130 stanic, z nichž 30 přibylo v roce 2019, a slouží asi 3500 vozidlům s vodíkovým pohonem. Vytíženost plnicích stanic je různá, například v Německu je spíše nižší, zatímco v Kalifornii musejí být některé stanice upraveny, aby mohly uspokojit poptávku [40]. První vodíková plnicí stanice v ČR byla vybudována v Neratovicích v souvislosti s projektem TriHyBus (více v kapitole 12.6) [49].

Doba plnění závisí na konstrukci plnicí stanice a na množství vodíku, který je potřeba naplnit do nádrží vozidla. I u autobusů se dnes ale pohybuje i v jednotkách minut [21] a je tedy srovnatelný s tankováním konvenčních fosilních paliv.

9 VYUŽITÍ VODÍKU PRO POHON VOZIDEL

Přeměna energie uložené ve vodíku na energii pohybu vozidla se děje buď prostřednictvím spalovacího motoru, nebo palivového článku a elektromotoru.

9.1 SPALOVACÍ MOTOR

Možnosti provozovat spalovací motory na vodík byly zkoumány již ve 20. letech 20. století v souvislosti s pohonem vzducholodí [48]. V současnosti je čtyřtákní zážehový motor spalující směs vodíku se vzduchem opět předmětem zájmu kvůli hledání alternativních paliv a snižování emisí vozidel.

Spalovací motory obecně dosahují lepší účinnosti při vyšším zatížení. U zážehových motorů je účinnost nižší, ale při použití přepřehování může být relativně dobrá i při nižším zatížení. Účinnost celého pohonného systému dále roste použitím hybridního uspořádání. Spalovací motor pak může pracovat v nevhodnějším režimu a když jsou elektrické akumulátory dostatečně nabitě, motor se vypne [48]. Nevýhody jsou přirozeně vyšší cena a složitost systému.

Vodík díky velké výhřevnosti hoří stabilně i při chudé směsi. To je pozitivní, protože při chudé směsi jsou emise oxidů dusíku menší. Jelikož je ale objemová výhřevnost nízká (kvůli malé hustotě vodíku), je vhodné použít přepřehování. Vodík se pak vstříkuje přímo do válce na konci sání. Vstříkování během komprese se ukazuje jako méně vhodné kvůli zvýšeným emisím oxidů dusíku [48].

Díky velmi rychlému hoření vodíku nemusí docházet ke klepání, protože vodík často vyhoří ještě, než ke klepání dojde. Pokud k němu dojde, jsou detonace velmi silné [48].

Pro dobré chování motoru při různém zatížení je vhodné použití adaptivní regulace předstihu zážehu a proměnlivé časování ventilů (změna efektivního kompresního poměru) [48].

Použitím vhodné technologie přímého vstříkování vodíku do válce se daří předejít zášlehům do sacího potrubí, které by hrozily kvůli tomu, že pro zapálení směsi vodíku se vzduchem stačí jen velmi málo energie [48].

Výhoda využití vodíku ve spalovacím motoru je oproti palivovému článku především v nižší ceně. Účinnost zážehového motoru spalujícího vodík je oproti spalování benzínu vyšší, ale i tak je nižší oproti palivovému článku. Nevýhodou je také hluk a emise. Na rozdíl od spalování fosilních paliv nevznikají oxidy uhlíku a saze. Vznikají však oxidy dusíku, přičemž jejich množství záleží na průběhu spalování [48].

Za účelem omezení emisí je možno ošetřit spaliny následujícími způsoby [48]:

- a) Chemické reaktory s absorpcí v pasivní nebo aktivní vrstvě a periodicky proměnlivý režim motoru (střídá se chudá a bohatá směs).
- b) Přidávání přídavné látky – například močovina pro selektivní katalytickou redukci
- c) Recirkulace ochlazených spalin

Zajímavou možností je míchání vodíku s jinými vhodnými palivy, například zemním plynem (směs zvaná Hythane). Parametry motoru se tím obvykle zlepšují [48]. To ale vyžaduje buďto samostatnou infrastrukturu, tedy plnicí stanice na toto smíšené palivo, nebo skladování a mísení obou paliv přímo ve vozidle.

Za zmínku stojí také kombinace vodíkového spalovacího motoru a palivového článku. Palivový článek by mohl pracovat s konstantním zatížením. V případě potřeby většího výkonu by se spustil spalovací motor. Pro okamžité pokrytí spotřeby před spuštěním spalovacího motoru by sloužil superkapacitor [48]. Nevýhoda takového systému by byla v ceně a hmotnosti. Ovšem výsledek srovnání s hybridním vozidlem využívajícím palivový článek a elektrické akumulátory nemusí být kvůli různě velké hmotnosti akumulátorů jednoznačný.

9.2 PALIVOVÝ ČLÁNEK

Palivový článek mění chemickou energii na elektrickou podobně jako elektrické akumulátory. Chemické látky však netvoří stálou náplň, ale jsou plynule přiváděny. Dochází k elektrochemické oxidaci paliva a oxidačního činidla [8]. Princip je opačný než u elektrolyzérů.

Jde o perspektivní a v současnosti slibně se rozšiřující technologii. V roce 2019 vzrostl instalovaný elektrický výkon palivových článků ve světě meziročně o zhruba 40 %. Celé dvě třetiny tohoto přírůstku jsou však zásluhou dvou automobilek: Hyundai a Toyota [40].

Protože palivový článek produkuje elektrickou energii přímo bez mezistupňů, je účinnější než sestava spalovacího motoru a generátoru elektrické energie, kde je mezistupněm energie tepelná [19], [34]. Teoretická účinnost palivového článku je 83 %, reálně je to 46 až 60 % podle typu článku a použití [5]. S vývojem palivových článků se účinnost postupně zvyšovala.

Palivový článek se skládá z jednotlivých cel, které obsahují vždy dvě elektrody a elektrolyt. Uspořádání a počet cel závisí na kýženém napětí a výkonu [34].

Existuje více typů palivových článků. Podle provozních podmínek je lze rozdělit na nízko- a vysokoteplotní. Nízkoteplotní palivové články spotřebovávají obvykle kyslík s vodíkem nebo methanolem a využívají se většinou v mobilních aplikacích k výrobě elektrické energie. Vysokoteplotní palivové články mohou spotřebovávat také některá konvenční uhlovodíková paliva a často se používají ve stacionárních aplikacích k výrobě elektrické a tepelné energie [8], [34].

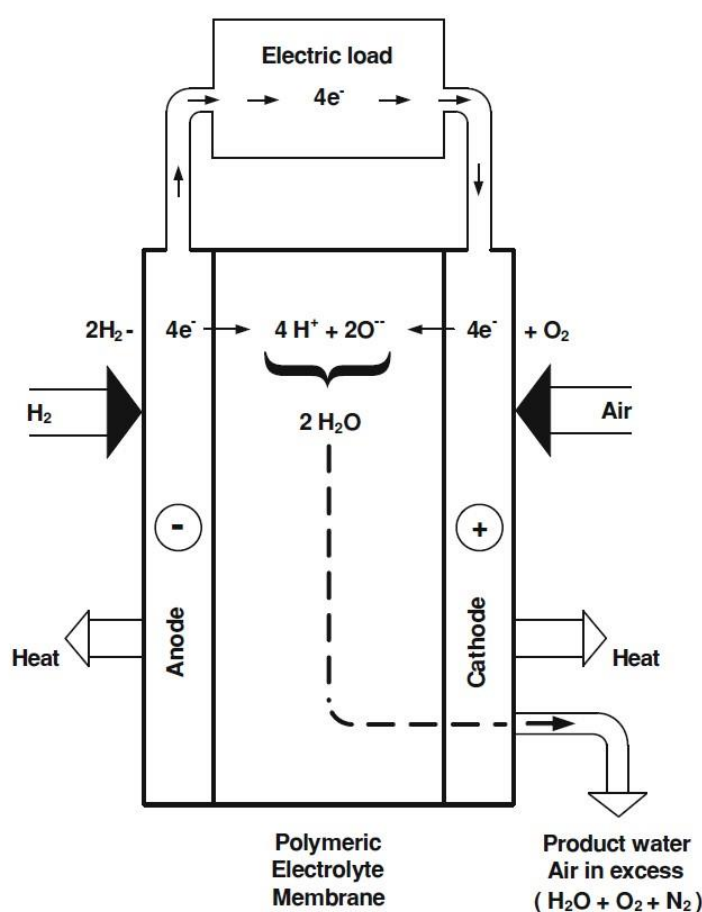
Jako nejvhodnější pro použití ve vozidlech se jeví palivový článek s polymerní elektrolytickou membránou (PEM), protože nevyžaduje vysokou teplotu, je schopen rychlého startu, má velkou účinnost, má dobrou odezvu a neobsahuje agresivní kapalný elektrolyt [2], [8]. Proto bude kapitola dále zaměřena jen na tento konkrétní typ palivového článku.

Princip funkce je znázorněn na Obr. 6. Kladné vodíkové ionty vzniklé z přiváděného vodíku na anodě procházejí do elektrolytu, respektive polymerní membrány, zatímco elektrony jdou do externího elektrického obvodu. Na katodě elektrony z externího elektrického obvodu reagují s kyslíkem (obvykle ze vzduchu) a vodíkovými ionty, čímž vzniká voda. Voda

(většinou v podobě páry) pak odchází spolu se zbylým vzduchem (hlavně dusík a nespotřebovaný kyslík) pryč z palivového článku [8], [34].

Elektrody jsou pokryté tenkou vrstvou platiny, která plní funkci katalyzátoru [34]. Jak již bylo uvedeno v kapitole 5.4.1 v souvislosti s PEM elektrolýzery (které fungují podobně, ale naopak než palivové články), omezené zásoby a cena platiny by do budoucna značně omezovaly masové rozšíření technologie, ale její potřebné množství se daří zásadně snížit a vyvíjí se i náhrady.

Při provozu vodíkového článku vzniká také teplo, a proto je potřeba článek chladit, obvykle systémem s chladicí kapalinou [5]. To je výhoda v zimě, kdy je potřeba zajistit vytápění prostoru pro řidiče a cestující. Autobus tak nepotřebuje dodatečné naftové vytápění [33].



Obr. 6 Princip funkce PEM palivového článku [8]

Důležitá je čistota paliva. Obzvláště jde o oxid uhelnatý, který působí jako katalyzátorový jed [34]. To je oproti spalovacímu motoru nevýhoda.

Provozní teplota je obvykle do $120\text{ }^\circ\text{C}$ a závisí na materiálu membrány. S vývojem materiálu se může zvýšit [34].

Výhoda oproti spalovacímu motoru na vodík je v absenci emisí oxidů dusíku (palivový článek vypouští do okolí pouze vodu), poměrně tichém provozu a ve vysoké účinnosti.

V souvislosti s emisemi je zajímavé, že vozidlo poháněné elektrickou energií z palivových článků bude ve městě působit jako filtr vzduchu. Mechanické nečistoty ve vzduchu přicházejícím do palivového článku nejsou žádoucí a je tedy nutné je filtrovat. Na výstupu je pak ve vzduchu méně kyslíku a přibývá vodní pára.

Hlavní nevýhoda PEM palivového článku je cena, která je ovlivněna hlavně materiály membrány a elektrod a také tím, že zatím nejde o masově rozšířenou technologii.

Palivový článek lépe pracuje při konstantním výkonu a jeho účinnost je vyšší při nižším zatížení [48]. Proto jsou vozidla obvykle konstruována jako hybridy s elektrickými akumulátory nebo kapacitory. Tak lze dosáhnout dobré dynamiky i v městském provozu [21].

Životnost článku je zhruba 20 000 hodin, u novějších vyvíjených článků by to mělo být 40 000 hodin [5]. Dobrým příkladem z praxe je provoz autobusů Wright v Londýně. Instalovaný palivový článek Ballard FCveloCity-HD6 již úspěšně překročil 35 000 provozních hodin, což je výrazně více než kolik bylo plánováno v době jeho uvedení do provozu. V USA byla v reálném provozu u pěti autobusů úspěšně překročena hranice 25 000 hodin [40].

Negativní vliv na životnost palivového článku může mít jeho zapínání a vypínání, někdy se uvádí údaj například 6000 cyklů, ale počet se různí podle konstrukce. Podle firmy Hydrogenics už to ale není problém a počet cyklů jejích článků považuje za neomezený [25].

Palivový článek spolu s doprovodným technologiemi zabere větší objem než spalovací motor, ale je tvarově lépe přizpůsobitelný a jeho instalace do vozidla tak není náročnější [48].

Výrobci palivových článků pro autobusy jsou například Ballard nebo Hydrogenics, ale věnují se jim i další společnosti a jejich počet se zvětšuje.

10 BEZPEČNOST

V této kapitole bude pojednáno bezpečném používání vodíku. Vlastnosti vodíku, které mají negativní vliv na bezpečnost, byly zmíněny v kapitole 1. Nyní budou některé z nich zmíněny v dalších souvislostech.

U vodíku je velká opatrnost na místě, ovšem i s ostatními palivy je nutno nakládat velmi obezřetně. Vodík bývá laickou veřejností vnímán jako nebezpečnější, než skutečně je. Tento přístup bývá nazýván Hindenburgský syndrom podle požáru vzducholodi Hindenburg v roce 1937, který se zapsal do povědomí veřejnosti kvůli obrazovému záznamu požáru a medializaci nehody [12].

Protože má vodík široký (výrazně širší než běžná paliva) rozsah koncentrace ve vzduchu, při které je hořlavý (4 až 75 %), je jeho únik nebezpečný při větším rozsahu podmínek. To, že pro zapálení vodíku stačí dodat jen velmi malou energii, je dalším negativním faktorem. Pomáhá však velká difuzivita, která je jinak pro náročné utěsnění systému považována za nevýhodu. Vodík se velmi rychle rozptýlí v okolním prostoru a nebezpečí pomine, na rozdíl například od benzínu, který vyteče a zůstává nebezpečím po delší dobu [11]. Výhoda je také v tom, že vodík díky nízké hustotě rychle stoupá a hoří spíše mimo vozidlo, zatímco benzín zůstává pod vozidlem [16].

Rychlost šíření plamene je u vodíku velká, což způsobuje, že v uzavřeném prostoru snáze dojde kromě hoření vodíku k explozi [11]. Z tohoto a dříve uvedeného plyne, že parkování vodíkových vozidel v uzavřených garážích představuje zvýšené riziko. Lze jej snížit dostatečným větráním, využitím senzorů a spolehlivou konstrukcí zařízení, která minimalizuje možnost úniku. Autobusy se parkují více v otevřeném prostoru, takže tento problém u nich není tak výrazný jako u osobních automobilů, pro které jsou podzemní a další uzavřené garáže ve velkých městech jednou z mála možností parkování.

Riziko vzniku požáru existuje i u konvenčních vozidel, u vodíkového autobusu je vhodné zabránit jeho rozšíření do vodíkové soustavy. Proto jsou například autobusy Van Hool vybaveny automatickým systémem pro potlačení požáru [20].

Vodík je bez zápachu, barvy a chuti, takže není zjistitelný lidskými smysly. U zemního plynu, který je rovněž bez zápachu, se tento problém řeší odorizací. Vodík se však s odoranty těžko mísí. Navíc pokud se vodík využívá v palivových článcích, není použití odorantů možné, protože palivové články vyžadují velkou čistotu vodíku a běžné odoranty by je poškodily [11]. I proto se vývoji senzorů úniku vodíku věnuje značná pozornost.

Autobusy bývají vybaveny senzory úniku vodíku. V případě úniku z jiném místa soustavy, než je nádrž, lze přívod vodíku z nádrže automaticky uzavřít.

U palivových nádrží ve vozidlech je důležité, aby byly odolné samy o sobě a také byly vhodně umístěné ve vozidle, tedy aby bylo vozidlo konstruováno s ohledem na ochranu posádky i palivových nádrží. Úspěšným příkladem bezpečného osobního automobilu je Hyundai Nexu, který v roce 2019 získal na základě crashtestů ocenění Top Safety Pick+ americké organizace IIHS [53].

Toyota prezentuje bezpečnost svých palivových nádrží na stlačený plyný vodík experimentálním prostřelením nádrže. Experiment byl snímán vysokorychlostní kamerou a

jeden okamžik je na Obr. 7. Střela nádrž pouze prorazila, ale nádrž se neroztrhla a zůstala v celku. Nedošlo k výbuchu ani k hoření vodíku. Plyn rychle uniknul a rozptýlil se ve vzduchu [38]. Při průniku střelou stěnou nádrže nedošlo k předání takového množství energie, které by stačilo pro zapálení vodíku.



Obr. 7 Experiment prostřelení vodíkové nádrže firmy Toyota [38]

Když je vodík skladován v kapalném skupenství, dochází k jeho postupnému odpařování a pokud by byl vypouštěn do okolí vozidla, nesmí to být v uzavřeném prostoru. Další specifikum z hlediska bezpečnosti je velmi nízká teplota. Vdechnutí studených par může poškodit plíce člověka. Při kontaktu pokožky se studenými součástmi může dojít k omrzlinám či mrazovým popáleninám, čemuž lze předejít používáním ochranných pomůcek a v případě uživatele vozidla nezasahováním do systému, který je v provozu [16].

Bezpečnosti vodíkových plnicích stanic je rovněž nutno věnovat pozornost. V roce 2019 došlo ke dvěma větším nehodám souvisejícím s vodíkovou mobilitou. V Kalifornii došlo k výbuchu během plnění nádrží na nákladním automobilu sloužícím pro distribuci vodíku do plnicích stanic pro automobily, incident se obešel bez zranění. V Norsku došlo k požáru plnicí stanice z důvodu chybně namontované součásti. Lehce zraněno bylo několik osob airbagy v automobilech v blízkosti stanice, což bylo nejspíš způsobeno tlakovou vlnou [40].

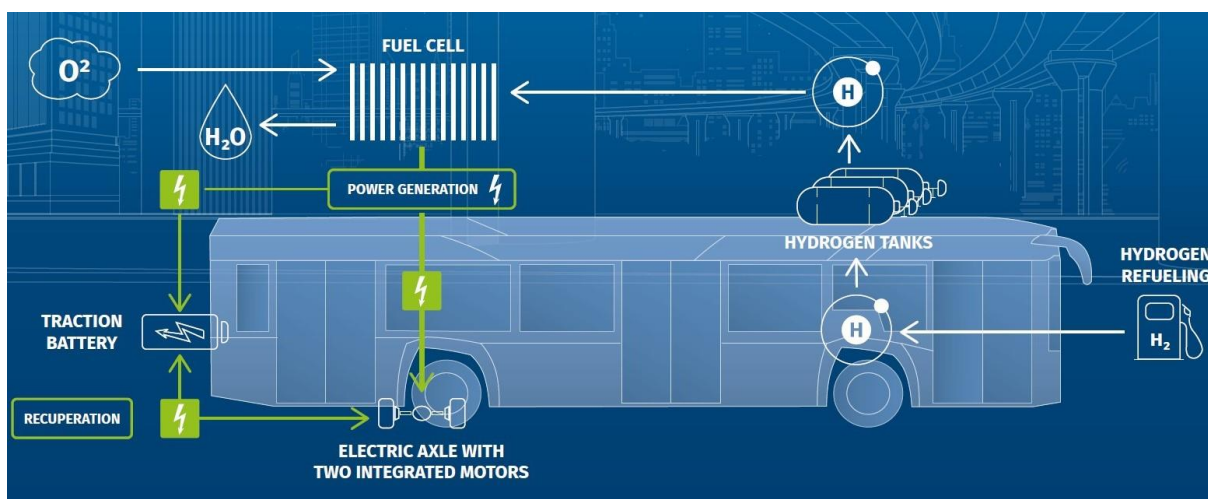
Jelikož je vodík netoxický, nepředstavuje jeho únik riziko pro životní prostředí, jako je tomu u většiny konvenčních paliv. Při požáru může dojít ke znečištění ovzduší pouze pokud začnou hořet i další materiály, v případě vozidel bývají problematické plasty.

Celkově lze konstatovat, že s vodíkem lze nakládat bezpečně, ovšem vyžaduje to vyšší úroveň opatření než konvenční paliva [11]. Základem bezpečného provozu vodíkových zařízení je dodržování těchto opatření.

11 USPOŘÁDÁNÍ KOMPONENT VODÍKOVÉHO AUTOBUSU

Vodíkové autobusy jsou v současnosti nejčastěji koncipovány jako hybridní a používá se tedy označení FCHEV (fuel cell hybrid electric vehicle). Elektrická energie pro napájení elektromotoru je dodávána z palivového článku a z elektrických akumulátorů. Tato kombinace umožňuje nepřetěžovat palivový článek (čímž by se snižovala účinnost), a přitom splnit nároky městského provozu s častými rozjezdy [21], [49]. Další výhodou je v možnosti rekuperace energie při brzdění, čímž lze dále snížit spotřebu paliva.

Fungování hybridního vodíkového pohonného systému s palivovým článkem bude popsáno na příkladu autobusu Solaris Urbino 12 Hydrogen a je znázorněno na Obr. 8. Stejný či podobný princip používají i mnozí další výrobci vodíkových autobusů. Před jízdou je vodík naplněn do nádrží. Poté je do palivového článku dodáván vodík z nádrží a kyslík ze vzduchu. Palivový článek produkuje elektrickou energii a vodu. Voda odchází ve formě vodní páry mimo vozidlo. V závislosti na aktuálním zatížení elektromotorů je část (nebo všechna) elektrická energie dodávána do elektromotorů a část do akumulátorů. Při velkém zatížení (zejména při rozjezdu) je elektrická energie do elektromotorů dodávána i z akumulátorů, které se tak vybíjí. Při brzdění je elektrická energie z elektromotoru, který v tu chvíli pracuje v režimu generátoru, dodávána do akumulátorů, které se tak nabíjí [37].



Obr. 8 Tok energie Solaris Urbino 12 Hydrogen [37]

Elektrické akumulátory je možné nahradit kapacitami, případně lze použít obě technologie. Kombinaci obou používá TriHyBus, který je blíže popsán v kapitole 12.6.

Akumulátory jsou používány nejčastěji lithium-iontové. Tato technologie zažila velký rozvoj díky vhodným vlastnostem lithia a je velmi důležitá pro elektromobilitu [2]. V hybridním autobusu jsou akumulátory výrazně menší, jelikož netvoří hlavní zdroj energie.

Superkapacitory umožňují velký výkon a velký počet nabíjecích cyklů. Nejsou ale vhodné pro skladování skutečně velkého množství energie, neboť by musely mít velmi velkou hmotnost, a proto se používají v kombinaci s dalšími zdroji. Hlavní nevýhoda je jejich vysoká cena [2].

Pro případ delšího brzdění, kdy už není možná rekuperace energie (akumulátory nebo kapacitory jsou nabitě), se autobusy vybavují brzdícími rezistory. Šetří se tak provozní brzdy.

Poměr mezi velikostí palivového článku a akumulátorů může být různý. U popsaného nejčastějšího systému tvoří hlavní zdroj energie palivový článek a akumulátory slouží pro zvládnutí většího zatížení. Pokud je zároveň možné akumulátor dobíjet z externího zdroje, jde o plug-in hybridní vůz, což je například Solaris Urbino 12 Hydrogen [37]. Další variantou je velký akumulátor, který tvoří hlavní zdroj energie a musí se nabíjet z externího zdroje, v kombinaci s menším vodíkovým systémem, který prodlužuje dojezd [21].

Možnosti konstrukce a umístění elektromotoru jsou stejné jako u elektrobuse. Elektromotor může být jeden, v tom případě je možné použít standardní (nebo velmi podobnou) hnanou nápravu. Motor je umístěn mimo nápravu a hřídelem je spojen s diferenciálem. Některé nápravy umožňují nízkou podlahu. Další používaná možnost je speciální náprava se dvěma integrovanými elektromotory. Portálovou nápravu se dvěma asynchronními třífázovými elektromotory, vyrábí například firma ZF a používá ji například zmíněný Solaris Urbino 12 Hydrogen [43]. I tato náprava umožňuje zachování nízké podlahy i v zadní části autobusu. Řešení s elektromotory integrovanými v nápravě se postupně stává častějším.

Palivové nádrže jsou podobně jako u autobusů se spalovacím motorem na zemní plyn umístovány na střeche vozu. O různých možnostech skladování vodíku bylo pojednáno v kapitole 6. V současnosti se nejčastěji používají nádrže z kompozitních materiálů na stlačený plynný vodík o tlaku 350 bar. Jsou orientovány buď podélně, jak je vidět například na Obr. 10, nebo příčně, jako například na Obr. 9. Nádrží bývá několik vedle sebe a celková kapacita tvoří obvykle kolem 35 kg u autobusů běžné velikosti (délka kolem 12 m) [21], [37], [41]. U větších autobusů je to více kvůli větší spotřebě vodíku.



Obr. 9 Vodíkové nádrže autobusu Mercedes-Benz Citaro FuelCELL-Hybrid [41]

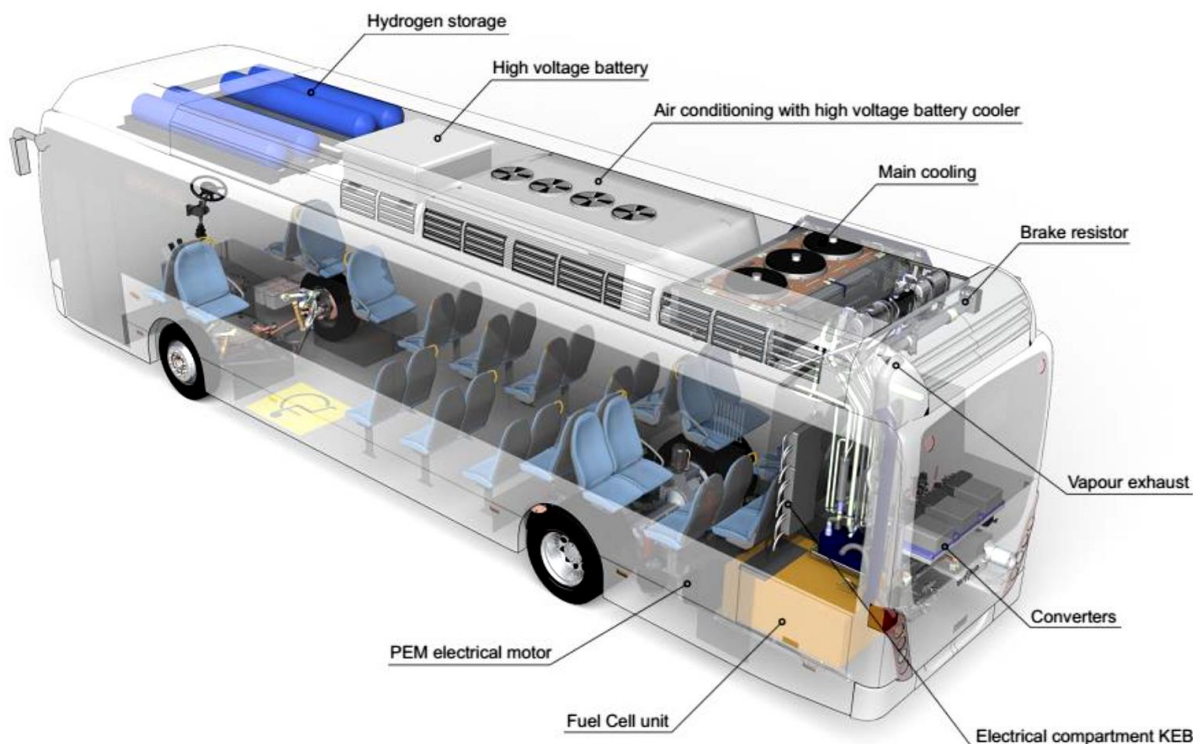
Jednotka klimatizace bývá kvůli snadnému přístupu vzduchu umístována rovněž na střeche vozu.

Palivové články jsou obvykle technologie PEM, protože se jeví pro vozidla jako nejvhodnější, jak bylo vysvětleno v kapitole 9.2. Jejich výkon bývá různý, zhruba od 60 do 150 kW.

Umístění akumulátorů, palivových článků a dalších zařízení se mezi výrobci vodíkových autobusů liší. Využívá se buď střecha nebo prostor v zadní části vozu, kde bývá u konvenčních autobusů umístěn spalovací motor s příslušenstvím.

Montáž mnoha komponent vodíkového pohonu na střechu vozu je důležitá kvůli nízké podlaze. Další výhodou může být v závislosti na konstrukci také lepší přístupnost komponent při údržbě a opravách. Tato koncepce sice představuje problém při konstrukci vozu, jelikož zvyšuje těžiště, ovšem tento problém se daří úspěšně řešit. Autobusy totiž musí při homologaci projít testem bočního náklonu [20].

Možné konkrétní uspořádání komponent bude představeno na příkladu vodíkového autobusu Van Hool a je znázorněno na Obr. 10. Zobrazené součásti umístěné na střechě popsané směrem od přední k zadní části autobusu jsou: vodíkové nádrže, elektrické akumulátory, klimatizace a chladicí systém akumulátorů, hlavní chladicí systém, brzdné rezistory, odvod páry. V zadní dolní části autobusu se nachází (popsáno zprava doleva): konvertory, podpůrná elektrická zařízení, palivový článek, elektromotor.

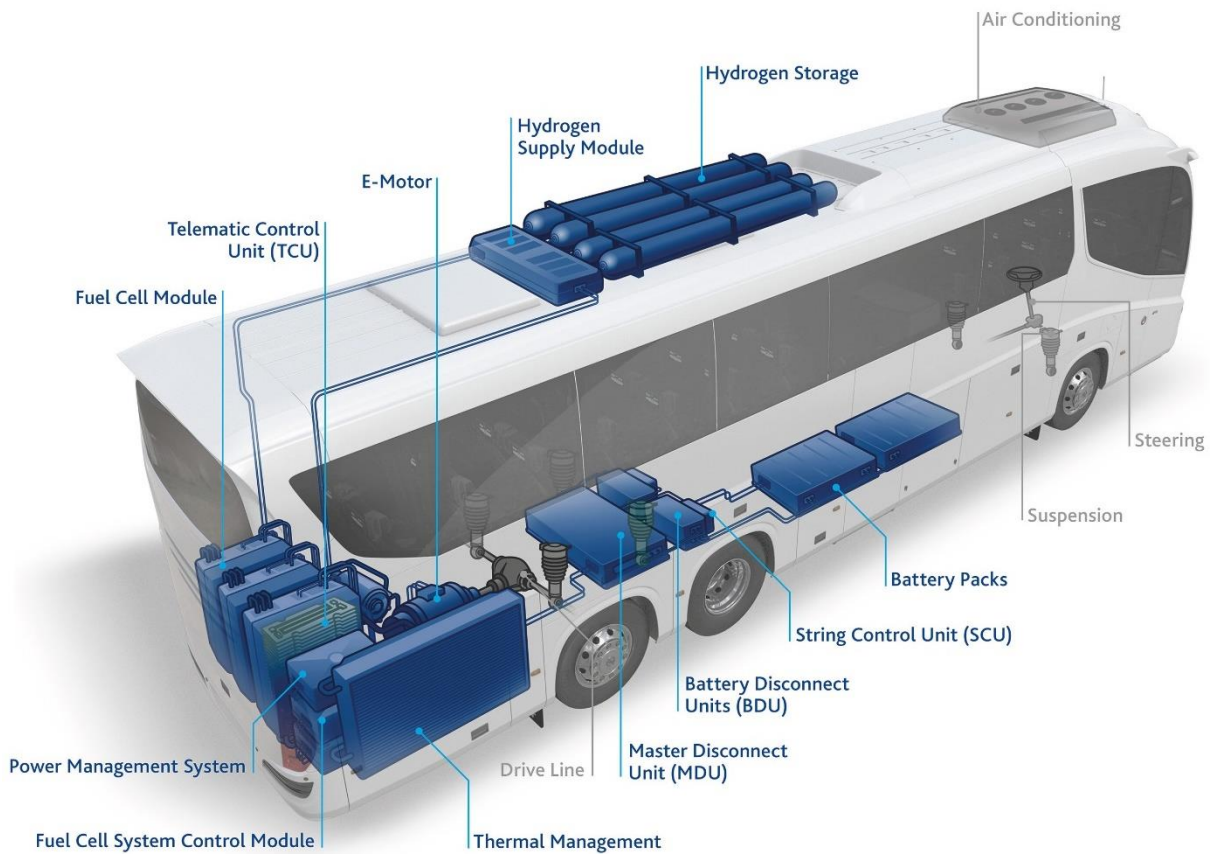


Obr. 10 Uspořádání komponent pohonu autobusu Van Hool [20]

U dálkových autobusů je situace jiná než u městských, zatím se nepoužívají. Základní princip pohonu může být stejný jako u městských autobusů. O jejich provoz má zájem dopravní společnost FlixBus, která proto spolupracuje se společností Freudenberg Sealing Technologies, která se zabývá mimo jiné palivovými články, a plánuje spolupráci s některým výrobcem autobusů [22].

U autobusů pro dálkovou dopravu není vyžadována nízká podlaha, naopak je vyžadován delší dojezd (v plánu je dojezd kolem 500 km [40]), větší cestovní komfort a prostor pro zavazadla. Prostor pro cestující bývá umístěn výše a v dolní části se nachází pohonný systém a

zavazadlový prostor. U zamýšleného vodíkového autobusu na Obr. 11, který konstrukčně vychází z konvenčního autobusu pro dálkovou dopravu, jsou na střechu kromě klimatizace umístěny také vodíkové nádrže. Palivový článek je umístěn v zadní části autobusu. Elektromotor je umístěn podélně podobně jako spalovací motor a pohání standardní nápravu. Akumulátory se nachází ve střední dolní části vozu, což příznivě ovlivňuje polohu těžiště.



Obr. 11 Koncept vodíkového autobusu pro dálkovou dopravu [22]

12 KONKRÉTNÍ PROJEKTY

Vodíková mobilita se postupně začíná prosazovat, a kromě výzkumných projektů je už realizován i provoz komerční, i když s výraznou finanční podporou veřejné správy. Vodíkových autobusů je tedy provozován stále větší počet na více místech ve světě a produkují je další výrobci. Výrobci je nyní kolem 12 [40], z evropských jsou to například Daimler, Van Hool, Wright a Solaris; z amerických Eldorado National a New Flyer; z asijských Hyundai a Toyota.

V této kapitole budou popsány některé konkrétní výrazné projekty a systémy týkající se provozu vodíkových autobusů. Zároveň tím bude ilustrována současná a budoucí míra rozšíření vodíkových autobusů ve světě.

12.1 PROJEKT JIVE

Projekt JIVE (Joint Initiative for Hydrogen Vehicles across Europe – společná iniciativa pro vodíková vozidla napříč Evropou) má za cíl uvedení do provozu 139 vodíkových autobusů s palivovými články a výstavbu potřebných plnicích stanic v pěti státech Evropy. Projekt by měl trvat šest let, začal v roce 2017 a je spolufinancován grantem Evropské unie ve výši 32 milionů Euro. Na JIVE navazuje od roku 2018 JIVE2. Dohromady by mělo být dosaženo provozu téměř 300 vodíkových autobusů ve 22 městech Evropy v první polovině 20. let 21. století. [21]

Velké počty autobusů aktuálně přibývají například v Londýně (20 dvoupatrových autobusů Wright), v nizozemském Groningenu (20 autobusů Van Hool) a v německém Kolíně (40 autobusů Van Hool) [40]. Další autobusy jsou plánovány v různých městech v Belgii, Dánsku, Itálii, Německu a Velké Británii [21].

12.2 WUPPERTAL

Dopravní systém v německém městě Wuppertal je samostatně zmíněn jako příklad komplexního systému s lokální výrobou vodíku. Vodík je zde vyráběn elektrolýzou a elektrická energie vzniká v místní spalovně odpadů. Systém může produkovat cca 400 kg vodíku denně a náleží k němu skladovací kapacita na 450 kg vodíku [52]. Výhoda je samostatnosti lokálního systému a v tom, že se vodík nemusí transportovat. Vstupní surovinou pro výrobu elektrické energie je komunální odpad, pro výrobu vodíku v elektrolýzě je vstupní surovinou voda. Používají se tedy místní zdroje. Elektrickou energii by bylo možné využít i jinak než k výrobě vodíku, například pro nabíjení elektrobuses. Nevýhodou systému je velký počet mezistupňů mezi komunálním odpadem a vodíkem (teplo, mechanická a elektrická energie). Vybudování infrastruktury (výroba vodíku, skladování, plnicí stanice) a nákup 10 vodíkových autobusů je spolufinancováno z projektu JIVE a z německých státních zdrojů.

Autobusy Van Hool A330 provozované ve Wuppertalu mají spotřebu vodíku asi 9 kg/km a dojezd 350 km. Plnění nádrží o kapacitě 38,5 kg vodíku trvá méně než 10 minut [52]. Pohonný systém těchto autobusů je hybridní s palivovými články a akumulátory, jeho funkce byla popsána v kapitole 11.

12.3 H2Bus EUROPE

V roce 2019 vzniklo konsorcium společností zabývajících se vodíkovými autobusy, palivovými články a vodíkovou infrastrukturou, nazvané H2Bus. Projekt, finančně podpořený Evropskou unií, má v první fázi za cíl do roku 2023 uvést do provozu celkem 600 vodíkových autobusů Dánsku, Litvě a Velké Británii. Zúčastněné firmy by měly dodávat autobusy a potřebnou infrastrukturu pro jejich zásobování vodíkem. Výrobu autobusů, jejich servis a školení řidičů má zajistit Wright Bus. [21]

Mezi nabízenými autobusy jsou i patrové a kloubové. Vzhled autobusů, dojezd a orientační ceny jsou na Obr. 12. Standardní 12metrové autobusy by měly mít ve verzi s prodlouženým dojezdem (dostupné až od roku 2021) dojezd 675 km, v základní verzi by mohl dojezd překročit 450 km [33].



Obr. 12 Autobusy Wright nabízené v projektu H2Bus [21]

12.4 KALIFORNIE

Kalifornský provoz vodíkových autobusů je významný nejen v rámci USA, ale i světa. Na konci roku 2019 by mělo být v provozu 31 autobusů. Rozvoj bezemisní mobility je urychlován státními regulacemi, podle kterých by do roku 2023 měla být čtvrtina autobusů bezemisních a do roku 2040 by to měly být všechny. Zároveň je poskytována finanční podpora. Většinu autobusů dodávají američtí výrobci ElDorado National nebo New Flyer. [40]

12.5 ASIE

V Číně by mělo být přes 100 vodíkových autobusů s palivovým článkem, ale není známo kolik z nich je v pravidelném provozu. Přibývá také místních výrobců vodíkových autobusů. Autobusy jsou většinou menší než v Evropě a USA a používají výrazně menší palivové články, které doplňují akumulátory tvořící hlavní zdroj energie [40].

V jižní Koreji bylo v roce 2019 celkem 44 vodíkových autobusů s palivovými články. Podle plánů by jich v roce 2022 mohly být 2000, k čemuž mají přispět výrazné dotace na jejich nákup. Hlavním místním producentem je Hyundai, který pro autobusy využívá technologie z osobního automobilu Nexu [40].

Vodíkové autobusy se rozvíjí také v Japonsku, kde zaujímá vedoucí postavení Toyota, používající pro autobusy technologie z vozu Mirai. V roce 2020 by mělo být v provozu 100 autobusů [40].

12.6 TRIHYBUS

Název TriHyBus znamená triple hybrid bus a jde tedy o autobus se třemi systémy: palivový článek, akumulátory, ultrakapacitory. V rámci projektu vedeného ÚJV Řež a. s. byl 12metrový dvounápravový vodíkový autobus vyvinut, vyroben a po dobu pěti let úspěšně provozován v Neratovicích v ČR. Karoserie autobusu je Iveco Irisbus Citelis, elektrický systém vyrobila Škoda Electric a.s. Zdrojem energie je PEM palivový článek (od společnosti Proton Motor) o výkonu 48 kW. Energie nevyužitá elektromotorem nebo vzniklá rekuperací je uchovávána v lithium-iontovém akumulátoru o kapacitě 28 kWh a v ultrakapacitorech. Elektromotor má výkon 120 kW, maximální špičkový výkon systému je 200 kW. Dojezd autobusu činí 300 km. Pro provoz TriHyBusu byla v Neratovicích vybudována plnicí stanice na vodík, která je spolu s autobusem zachycena na Obr. 13. [49]



Obr. 13 TriHyBus u plnicí stanice [49]

12.7 PLÁNY V ČESKÉ REPUBLICE

Kromě projektu TriHyBus není v ČR zatím žádný vodíkový autobus v běžném pravidelném provozu. V Národním akčním plánu čisté mobility byl stanoven cíl provozovat 95 vodíkových autobusů v roce 2025 a 870 v roce 2030 [13]. O finanční podpoře ze strany státu bude blíže pojednáno v kapitole 13.2.

V Ostravě je v plánu do roku 2020 v městské hromadné dopravě ukončit provoz autobusů na naftu a nahrazují je autobusy se spalovacím motorem na stlačený zemní plyn, elektrické autobusy a později přibudou také vodíkové autobusy [47]. Projekt vodíkové infrastruktury je nyní ve fázi příprav a jeho realizace by měla probíhat od roku 2021 [47]. Jak již bylo uvedeno v kapitole 5.2, počítá se zde s výrobou vodíku z plynů vznikajících při těžbě a zpracování uhlí, především koksárenského plynu. V plánu je také výstavba plnicí stanice [47]. Jelikož bývá tato oblast často postižena smogovou situací, je zde hledání alternativních pohonů pro hromadnou dopravu obzvláště potřebné. Zařazení vodíkových autobusů je smysluplné, protože je tak možno využít vedlejší produkty místního průmyslu. Toto lokální řešení přispívá také k větší soběstačnosti regionu.

V Ústí nad Labem je plánováno zahájení provozu tří vodíkových autobusů na rok 2021. Aktuálně je připravována výstavba plnicí stanice, na kterou byla získána dotace kolem 30 milionů Kč, která by měla z větší části pokrýt náklady. Vodík do ní bude dodáván z místního chemického provozu, kde vzniká v dostatečném množství jako vedlejší produkt [44]. Podobně jako na Ostravsku by tak měly být dobře využity místní možnosti a provoz vodíkových autobusů může mít velký ekologický přínos.

13 EKONOMIKA PROVOZU

Hlavní nevýhodou vodíkových autobusů z pohledu provozovatele je jejich vysoká cena. Ovšem zatímco cena konvenčních autobusů postupně mírně roste, což lze přičíst stále přísnějším emisním limitům a cen řešení, která tato limity pomohou splnit, cena vodíkových autobusů výrazněji klesá. Jde totiž o postupně se rozšiřující technologii, která se stále zlepšuje a které se začínají věnovat další výrobci. Neočekává se však, že by došlo ke snížení ceny vodíkových autobusů na úroveň těch konvenčních [20], [40]. Je odhadováno, že kolem roku 2030 by rozdíl mezi cenou vodíkového a konvenčního autobusu mohl tvořit asi 2 miliony Kč místo současných zhruba 6 milionů Kč [13]. Vysoká cena tak nevýhodou vodíkového autobusu zůstane, ale bude se zmenšovat.

13.1 EKONOMIKA PROVOZU Z TECHNICKÉHO POHLEDU

Stanovení provozních nákladů vodíkového autobusu obecně je komplikované z toho důvodu, že vstupní parametry se liší podle států, způsobu výroby vodíku, typu autobusu a podobně. Provozní náklady závisí především na ceně a spotřebě paliva.

Například spotřeba vodíku standardního autobusu Van Hool se pohybuje mezi 9 a 11 kg vodíku na 100 km. Výrobce monitoroval reálný provoz autobusu a největší vliv na spotřebu měl jízdní styl řidiče (asi 10 %), dopravní situace (7 až 10 %) a profil trasy (5 až 10 %) [20]. Pro Mercedes-Benz Citaro FuelCELL-Hybrid je udávána spotřeba 11 až 13 kg / 100 km [41].

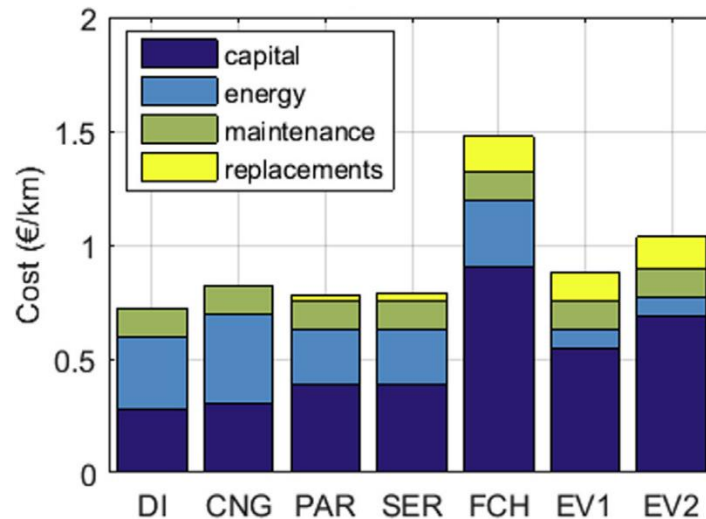
Ceny vodíku se liší podle způsobu výroby, nákladů na skladování a transport a odebíraného množství. Například v rámci projektu H2Bus, popsaném v kapitole 12.3, je počítáno s cenou od 5 do 7 Euro za 1 kg vodíku [33].

Celkové náklady životního cyklu se liší zahrnutím nákupní ceny a nákladů na údržbu. Je zřejmé, že tento parametr bude pro vodíkový autobus méně příznivý. Náklady životního cyklu různých autobusů byly simulovány ve studii z roku 2015, která bude dále popsána. Od té doby se technologie rozšířila, některé náklady se snížily a prodloužila se životnost palivových článků, takže lze předpokládat, že nyní by byly výsledky vodíkového autobusu o něco lepší. Bylo počítáno s vodíkem vyráběným parní reformací zemního plynu, což nemusí být vždy nejlevnější metoda. Celkové náklady životního cyklu byly složeny z nákupní ceny, provozních nákladů, nákladů na údržbu a nákladů na výměnu součástí (například akumulátorů nebo palivového článku) [28].

Simulace byla prováděna pro dvě linky ve Finsku a dvě v Kalifornii. Výsledky všech čtyř simulací lze považovat za velmi podobné. Rozdíl je hlavně ten, že autobus na CNG byl měl v Kalifornii menší náklady než naftový, zatímco ve Finsku by to bylo kvůli rozdílným cenám paliv naopak [28]. Pro účely této práce proto postačí rozbor jen jedné, jejíž výsledky jsou na Obr. 14.

Srovnávány byly tyto autobusy: dieselový spalovací motor (DI), spalovací motor na CNG (CNG), paralelní hybrid s dieselovým motorem (PAR), sériový hybrid s dieselovým motorem (SER), hybridní vodíkový autobus s palivovým článkem (FCH), elektrobus s menším akumulátorem (EV1) a elektrobus s velkým akumulátorem (EV2).

Součet nákladů se skládá ze čtyř složek: pořizovací náklady (tmavě modrá), náklady na palivo (světle modrá), náklady na údržbu (zelená) a náklady na výměnu součástí (žlutá). Náklady životního cyklu jsou vztaženy na 1 km.



Obr. 14 Náklady životního cyklu různých autobusů [28]

Výsledků srovnatelných s konvenčními autobusy (s dieslovým motorem na naftu) dosáhly hybridy s dieslovým spalovacím motorem. V Kalifornii by však kvůli zmíněným jiným cenám paliv lépe dopadl pohon na CNG. Vodíkový autobus má vysoké náklady hlavně kvůli vysokým pořizovacím nákladům a ceně paliva. Lépe vychází oba elektrobuses. Z nich menší náklady má elektrobuses s menším akumulátorem, který se ale musí během provozního dne nabíjet [28].

Podobných výsledků bylo dosaženo i v jiné studii, která v australském prostředí srovnávala celkové náklady spojené s vlastnictvím konvenčních dieslových autobusů, hybridních dieslových autobusů, autobusů na CNG a vodíkových hybridních autobusů s palivovým článkem. Náklady byly u konvenčního autobusu hodnoceny jako nejnižší (díky nízké pořizovací ceně), u hybridního autobusu mírně vyšší, u autobusu na CNG ještě o trochu vyšší. Výrazně vyšší náklady než všechna ostatní zmíněná řešení měl vodíkový autobus s palivovými články. Ve studii je ale předpokládáno, že při očekávaném dalším vývoji by se mohly jeho náklady velmi přiblížit nákladům autobusu na CNG. Nejvýznamnější složku nákladů vodíkového autobusu tvořila kupní cena [29].

13.2 FINANČNÍ PODPORA VODÍKOVÉ MOBILITY

Pohled investora na ekonomické aspekty pořízení vodíkových autobusů je zásadně ovlivněn tím, jakou měrou jsou podporovány ze strany státu. Jde jednak o podporu ve formě vytvoření vhodného prostředí pro jejich provoz (například příslušná legislativa) a jednak o finanční podporu. Dotace na nákup nových vozidel hromadné dopravy se týkají i jiných technologií pohonu.

S podporou vodíkové mobility je počítáno i v České republice. Jak vyplývá z Národního akčního plánu čisté mobility (dále NAP CM) a jeho aktualizací, vodíkový pohon je hodnocen

jako jeden z perspektivních prostředků pro snižování emisí oxidu uhličitého. Je počítáno s finanční podporou, která by měla být dlouhodobá a jasně definovaná, aby skutečně motivovala zájemce o nákup vodíkových vozidel. Jmenovitě jsou zdůrazněny autobusy, které jsou považovány za velice efektivní způsob šetření emisí ve vztahu k vloženým financím a jsou označeny jako priorita v rámci vodíkové mobility. Na naplnění cílů NAP CM by mohlo být do roku 2030 vynaloženo celkem (ze soukromých i veřejných zdrojů) zhruba 2,4 miliardy Kč, přičemž veřejné zdroje (včetně dotací Evropské unie) by měly tvořit značnou část těchto nákladů. [13]

Uvažuje se také o podpoře dálkových spojení vodíkovými autobusy a je vypracována studie proveditelnosti autobusové linky mezi Prahou a Berlínem [13]. Vzhledem k dobré obslužnosti této trasy železniční dopravou by ale bylo přínosnější zkoumat potenciál vodíkových dálkových autobusů na jiných trasách.

K vodíkové mobilitě patří také další důležité části vodíkové infrastruktury, z nichž nejvýrazněji vnímané jsou plnicí stanice. Na podporu jejich výstavby vyčlenilo v roce 2019 Ministerstvo dopravy v rámci Operačního programu doprava 102 milionů Kč, přičemž podpora projektu může tvořit až 85 %. Cílem této a také podobné předcházející výzvy je výstavba alespoň šesti plnicích stanic [31].

14 DALŠÍ VÝVOJ

Z dlouhodobého pohledu není očekáváno prosazení vodíkových spalovacích motorů kvůli nižší účinnosti a nenulovým lokálním emisím a dá se předpokládat pokračování rozvoje vozidel s palivovými články.

Hlavní nevýhoda PEM palivových článků i PEM elektrolyzérů je jejich vysoká cena. Ta je ovlivněna cenou materiálů, náklady na vývoj a výrobu a cenou výrobních zařízení. Náklady na výrobu spolu s podílem ceny výrobních zařízení, která připadá na jeden palivový článek, lze snížit masovou produkcí. Při masové výrobě se také snáze pokryjí náklady na vývoj. S postupným rozvojem vodíkových technologií k poklesu cen již dochází a nadále nejspíš docházet bude. Cena materiálů závisí na situaci na trhu s těmito materiály a obvykle se neočekává výrazný pokles cen. Jde především o platinu, jejíž cena je velmi vysoká a zásoby nepříliš velké [19]. Vzhledem k úspěšně pokračujícím výzkumům zmíněným v kapitole 5.4.1 lze do budoucna očekávat výrazné snížení nákladů na materiály používané v PEM palivovém článku.

S vývojem palivových článků také dochází ke zvyšování výkonu při menších rozměrech, hmotnosti a ceně zařízení [19]. Menší hmotnost do budoucna přispěje ke snižování spotřeby vozidla, spolu s menšími rozměry usnadní konstrukci vozu a umožní jeho větší využití.

Spolehlivost a odolnost palivových článků není považována za výrazně limitující faktor rozvoje vodíkové mobility, a navíc se jí daří dále vylepšovat [19]. Do budoucna lze očekávat další zlepšení.

Ačkoliv mezi způsoby skladování vodíku v autobusech je zatím nejčastější plynný vodík stlačený na 350 bar, do budoucna nelze vyloučit zvyšování tlaku a používání i jiných metod. K tomu však nejspíš nedojde hned, hlavně kvůli ceně. Rozvoji metod skladování vodíku by mohl nadále napomáhat automobilový průmysl, který jako celek disponuje většími finančními možnostmi, a hlavně je pro něj vylepšení skladování vodíku důležité.

Velké úsilí je potřeba věnovat také výrobě vodíku. Vývoj by měl směřovat k užívání obnovitelných zdrojů energie. V tomto směru se jeví jako perspektivní výroba vodíku elektrolyzou vody za využití elektrické energie z obnovitelných zdrojů, a to hlavně při jejím přebytku. V omezeném měřítku se nejspíše bude využívat vodík vznikající v chemických provozech jako vedlejší produkt, takže se z dříve přebytečného produktu může stát velmi dobře využitý produkt. V budoucnosti by se mohly uplatnit také termochemické cykly, ale jejich praktické použití je ještě otázkou delšího vývoje.

Různé dostupné technologie výroby vodíku se budou dále vyvíjet, což by mohlo přinést i snížení nákladů a ve výsledku i snížení ceny vodíku. To by snížilo celkové náklady na provoz vodíkových vozidel.

V dopravních systémech měst lze očekávat postupné zapojování vodíkových autobusů do existujících systémů. Jelikož se všeobecně směřuje k nahrazení konvenčních autobusů bezemisními, je očekáváno, že část jejich úkolů by mohly převzít vodíkové autobusy a část elektrobuses, případně parciální trolejbusy. Ve větších městech, kde je možné provozovat více než jen jeden druh vozidel, je očekáváno kombinování různých typů vozidel podle jejich vlastností do jednoho komplexního systému.

V dálkové dopravě by se mohly díky velkému dojezdu vodíkové autobusy také prosadit. K tomu však bude zapotřebí síť plnicích stanic, ne jedna vlastní v zázemí dopravního podniku jako to stačí u městské dopravy. Dálkové vodíkové autobusy by se mohly rozvíjet spolu s vodíkovými osobními automobily, které také potřebují síť plnicích stanic.

Až bude existovat dostatek plnicích stanic, dálkové vodíkové autobusy bude produkovat více výrobců a cena přijatelná, lze očekávat, že se vodíkové autobusy uplatní i v zájezdové dopravě. Využije se tak jejich velký dojezd a variabilita, kterou dopravcům zatím poskytují jen autobusy na fosilní paliva. Jelikož tento segment dopravy, na rozdíl od městské hromadné dopravy, není tolik podporován z veřejných zdrojů, může dojít k uplatnění vodíkových autobusů nejspíše výrazně později.

Z finančního a politického hlediska je očekáváno pokračování podpory ze strany států a zvýšení zájmu těch států, které vodíkovou mobilitu dosud opomíjely. Vodíková mobilita může být součástí moderní dopravní filosofie státu, podobně jako elektromobilita. Právě od státních správ, nikoliv od soukromých dopravních společností, lze totiž očekávat kroky vedoucí nejen k úspoře provozních nákladů, ale i k dlouhodobým benefitům jako je omezení emisí skleníkových plynů a škodlivých látek.

Velká pozornost by měla být věnována také bezpečnosti. K jejímu zvýšení mohou napomoci technologická zlepšení fyzicky omezující riziko úniku vodíku, lepší systémy pro kontrolu a aktivní systémy pro zabránění požáru.

ZÁVĚR

Hlavní motivací pro hledání alternativních pohonů je snížení emisí skleníkových plynů a zdraví škodlivých látek a zbavení se závislosti na fosilních palivech. Při správném nastavení systému (hlavně výroby vodíku) je vodíkový autobus jedním z prostředků, jak toho lze docílit. Jako perspektivnější se přitom jeví použití palivových článků, které mají velkou účinnost a jsou zcela bez lokálních emisí, na rozdíl od spalovacích motorů na vodík. Existují však i jiné varianty bezemisní dopravy než jen vodíková mobilita. Jde o autobusy využívající elektrickou energii přímo, konkrétně trolejbusy, parciální trolejbusy a elektrobuses. Každá z těchto technologií má trochu jiné vlastnosti, a proto je nejlepší využít každou z nich tam, kde se nejlépe uplatní, a dohromady je kombinovat v komplexní dopravní systém.

Hlavní výhody vodíkového autobusu s palivovými články (v hybridním uspořádání s akumulátorem nebo kapacitorem) jsou nulové lokální emise, poměrně vysoká energetická účinnost, možnost rekuperace energie při brzdění, velký dojezd (v současnosti může být i přes 700 km), rychlost tankování srovnatelná s konvenčními autobusy, dobrá dynamika, tichý provoz a absence vibrací motoru. Při vhodném způsobu výroby vodíku se přidávají další výhody v podobě nulových globálních emisí a nezávislosti na fosilních palivech. Díky velkému dojezdu není nutné budovat ve městech dobíjecí stanice nebo trolejové vedení. Ve srovnání s elektrobuses není tak velký problém se zajištěním tepelného komfortu.

Vodíkový autobus tedy může velmi dobře splnit požadavky hromadné dopravy osob. Hlavní nevýhoda je ale zatím jeho vysoká pořizovací cena, ovšem je očekáváno postupné zlepšení. Další nevýhody souvisí se složitostí vodíkového systému od primární energie po kinetickou energii autobusu. Cena paliva nemusí být příznivá, ale závisí na způsobu výroby. Aktuální nevýhoda je také nedostatečná infrastruktura, kterou bude potřeba vybudovat. S rozvojem této nové technologie souvisí i nutnost zlepšování pravidel pro bezpečný provoz a nutnost edukace zúčastněných osob.

Podobně jako k většině nových technologií je i k vodíkovému autobusu zatím přistupováno s určitou nedůvěrou. Z jeho vlastností ale lze usuzovat, že má smysl se tímto systémem zabývat a nadále jej rozvíjet. Technologie vodíkového pohonu se dnes poměrně rychle vyvíjí, a tak se některé uvedené výhody a nevýhody budou nadále zvětšovat, respektive zmenšovat.

Hlavní uplatnění nachází vodíkový autobus zatím v městské dopravě. Hodí se pro delší trasy, kde se využije výhoda dojezdu a případně i rychlého a snadného tankování. Proto se hodí i pro příměstskou dopravu nebo dopravu v oblastech s menší hustotou osídlení, kde jeden autobus během dne někdy obsluhuje více linek. Nabízí velkou flexibilitu, což je možné využít i pro zájezdy či mimořádné situace.

Vodíkový autobus nejspíš nebude představovat jediné univerzální řešení, ale svými vlastnostmi i dosavadním praktickým provozem dokazuje, že může být jedním z pilířů moderní bezemisní hromadné dopravy.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] HORDESKI, Michael Frank. *Alternative fuels – the future of hydrogen*. Lilburn: The Fairmont Press, 2007. ISBN 0-88173-519-1.
- [2] BERETTA, Joseph, ed. *Automotive Electricity: Electric Drives*. Hoboken (NJ): Wiley, 2010. ISBN 978-1-84821-095-0.
- [3] VARGA, Bogdan Ovidiu, Calin ICLODEAN a Florin MARIASIU. *Electric and Hybrid Buses for Urban Transport: Energy Efficiency Strategies*. Switzerland: Springer, 2016. ISBN 978-3-319-41248-1.
- [4] PISTOIA, Gianfranco. *Electric and Hybrid Vehicles: Power Sources, Models, Sustainability, Infrastructure and the Market*. Amsterdam: Elsevier, 2010. ISBN 978-0-444-53565-8.
- [5] LIPMAN, Timothy E. a Adam Z. WEBER, ed. *Fuel Cells and Hydrogen Production*. Second edition. New York: Springer Science+Business Media, 2019. ISBN 978-1-4939-7788-8.
- [6] HIRSCHER, Michael, ed. *Handbook of Hydrogen Storage: New Materials for Future Energy Storage*. Weinheim: WILEY-VCH, 2010. ISBN 978-3-527-32273-2.
- [7] SCIPIONI, Antonio, Alessandro MANZARDO a Jingzheng REN, ed. *Hydrogen Economy: Supply Chain, Life Cycle Analysis and Energy Transition for Sustainability*. San Diego: Academic Press, an imprint of Elsevier, 2017. ISBN 978-0-12-811132-1.
- [8] CORBO, Pasquale, Fortunato MIGLIARDINI a Ottorino VENERI. *Hydrogen Fuel Cells for Road Vehicles*. London: Springer, 2011. ISBN 978-0-85729-135-6.
- [9] GUPTA, Ram B. *Hydrogen Fuel: Production, Transport, and Storage*. Boca Raton: CRC Press, 2009. ISBN 978-1-4200-4575-8.
- [10] GREENWOOD, Norman Neill a Alan EARNSHAW. *Chemie prvků. Svazek I*. Praha: Informatorium, 1993. ISBN 80-85427-38-9.
- [11] TABAK, John. *Natural gas and hydrogen*. New York: Facts On File, 2009. ISBN 0816070849.
- [12] BALAJKA, Jiří. *Vodík a jiné nové nosiče energie*. Bratislava: Alfa, 1982. Edícia energetickej literatúry.
- [13] *Aktualizace Národního akčního plánu čisté mobility 2019* [online]. Praha: Ministerstvo průmyslu a obchodu, 2019 [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: <https://www.komora.cz/legislation/171-19-aktualizace-narodniho-akcniho-planu-ciste-mobility-t-27-12-2019/>

- [14] KING, Laurie A, Mckenzie A HUBERT, Christopher CAPUANO, et al. A non-precious metal hydrogen catalyst in a commercial polymer electrolyte membrane electrolyser. *Nature nanotechnology* [online]. 2019, **14**(11), 1071–1074 [cit. 2020-05-10]. DOI: 10.1038/s41565-019-0550-7. ISSN 17483387. Dostupné z: <https://www-nature-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/articles/s41565-019-0550-7>
- [15] MÁCAL, Filip. *Aspekty provozu vozidel MHD s pohonem CNG a možnosti dalšího rozvoje ekologické MHD v Dopravním podniku města Pardubic a.s.* Pardubice, 2014. Diplomová práce. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera. Vedoucí práce Petr Jílek.
- [16] DLOUHÝ, Petr a Luděk JANÍK. Bezpečnost. In: *Česká vodíková technologická platforma* [online]. c2020, 1. 6. 2007 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/bezpecnost/482-bezpecnost>
- [17] Clean hydrogen. *Air Liquide* [online]. c2020 [cit. 2020-05-12]. Dostupné z: <https://energies.airliquide.com/energies-clean-energy-supply/clean-hydrogen>
- [18] Data & Čísla 2017. In: *Dopravní podnik města Brna, a. s.* [online]. 2017 [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: <https://dpmb.cz/cs/firma>
- [19] WILBERFORCE, Tabbi, Zaki EL-HASSAN, F.N KHATIB, Ahmed AL MAKKY, Ahmad BAROUTAJI, James G CARTON a Abdul G OLABI. Developments of electric cars and fuel cell hydrogen electric cars. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. Elsevier, 2017, **42**(40), 25695-25734 [cit. 2020-05-20]. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.07.054. ISSN 0360-3199. Dostupné z: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S036031991732791X>
- [20] VAN HECKE, Geert. Fuel cell Electric Bus: It works and it's ready! In: *European Commision* [online]. Brussels, 1. 3. 2018 [cit. 2020-05-19]. Dostupné z: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/7._presentation_van_hool.pdf
- [21] *Fuel Cell Electric Buses: knowledge base* [online]. [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: <https://www.fuelcellbuses.eu/>
- [22] Fuel Cells for Long-Distance Bus Transport. *Freudenberg Sealing Technologies* [online]. Weinheim: Freudenberg FST, 2. 9. 2019 [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://www.fst.com/corporate/newsroom/press-releases/2019/freudenberg-flixbus-press/>
- [23] KONVIČKA, Vladislav. Koksovny. *Hornická skripta* [online]. [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: <http://podzemi.solvayovylomy.cz/prirucka/zprac/koksovny/koks.htm>
- [24] *Hydrogen Europe* [online]. c2017 [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: <https://hydrogeneurope.eu/>
- [25] Hydrogen powered buses. *Hydrogenics* [online]. Hydrogenics, c2020 [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: <https://www.hydrogenics.com/hydrogen-products-solutions/fuel-cell-power-systems/hydrogen-powered-buses/>

- [26] JAROLÍN, Zdeněk. I letos pokračuje DPMB v obnově vozového parku autobusů. *Šalina* [online]. Brno: Dopravní podnik města Brna, 2020, **14**(2), 18 [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: <https://www.dpmb.cz/cs/download-section/4>
- [27] Kraj se dohodl s ostravskou koksovnu na výrobě vodíku pro veřejné autobusy. In: *Moravskoslezský kraj* [online]. 2019 [cit. 2020-05-07]. Dostupné z: <https://www.msk.cz/cz/doprava/kraj-se-dohodl-s-ostravskou-koksovnu-na-vyrobe-vodiku-pro-verejne-autobusy-126788/>
- [28] LAJUNEN, Antti a Timothy LIPMAN. Lifecycle cost assessment and carbon dioxide emissions of diesel, natural gas, hybrid electric, fuel cell hybrid and electric transit buses. *Energy* [online]. Elsevier, 2016, **106**, 329-342 [cit. 2020-05-22]. DOI: 10.1016/j.energy.2016.03.075. ISSN 0360-5442. Dostupné z: <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S036054421630319X>
- [29] ALLY, Jamie a Trevor PRYOR. Life cycle costing of diesel, natural gas, hybrid and hydrogen fuel cell bus systems: An Australian case study. *Energy Policy* [online]. Elsevier, 2016, **94**, 285-294 [cit. 2020-05-24]. DOI: 10.1016/j.enpol.2016.03.039. ISSN 0301-4215. Dostupné z: <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0301421516301422>
- [30] KUS, Peter, Anna OSTROVERKH, Ivan KHALAKHAN, et al. Magnetron sputtered thin-film vertically segmented Pt-Ir catalyst supported on TiC for anode side of proton exchange membrane unitized regenerative fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. Elsevier, 2019, **44**(31), 16087–16098 [cit. 2020-05-10]. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.04.216. ISSN 0360-3199. Dostupné z: <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0360319919316702>
- [31] Ministerstvo dopravy otvírá další výzvu OPD na podporu výstavby plnicích stanic na vodík. In: *Ministerstvo dopravy ČR* [online]. Praha: Ministerstvo dopravy, 30. 4. 2019 [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: [https://www.mdcz.cz/Media/Media-a-tiskove-zpravy/Ministerstvo-dopravy-otevira-dalsi-vyzvu-OPD-z-\(1\)](https://www.mdcz.cz/Media/Media-a-tiskove-zpravy/Ministerstvo-dopravy-otevira-dalsi-vyzvu-OPD-z-(1))
- [32] BIČÁKOVÁ, Olga. Možnosti výroby vodíku biologickými procesy. *Paliva* [online]. 2010, **2**(4), 103–112 [cit. 2020-05-06]. ISSN 1804-2058 Dostupné z: <http://paliva.vscht.cz/download.php?id=29>
- [33] *Offering: Buses* [online]. H2bus Consortium [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: <https://h2bus.eu/offering.html>
- [34] DLOUHÝ, Petr a Luděk JANÍK. Palivové články. In: *Česká vodíková technologická platforma* [online]. c2020, 17. 4. 2007 [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/vyuziti-vodiku/588-palivove-clanky>
- [35] DLOUHÝ, Petr a Luděk JANÍK. Skladování vodíku I. In: *Česká vodíková technologická platforma* [online]. c2020, 17. 5. 2007 [cit. 2020-05-12]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/transport-a-skladovani-vodiku/618-skladovani-vodiku-i>

- [36] DLOUHÝ, Petr a Luděk JANÍK. Skladování vodíku II. In: *Česká vodíková technologická platforma* [online]. c2020, 29. 5. 2007 [cit. 2020-05-12]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/transport-a-skladovani-vodiku/620-skladovani-vodiku-ii>
- [37] *Solaris Customer Magazine* [online]. Bolechowo-Osiedle: Solaris Bus & Coach, 2019, (1) [cit. 2020-05-18]. ISSN 1689-6076. Dostupné z: https://www.solarisbus.com/public/assets/Magazyn_Solaris_wiosna2019_EN_72dpi.pdf
- [38] Tank Safety: Hydrogen Tank Gunshot Toyota. In: *YouTube* [online]. Toyota USA, 2016 [cit. 2020-03-22]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=jVeagFmmwA0>
- [39] HARTMAN, Miloslav, Karel SVOBODA, Václav VESELÝ, Otakar TRNKA a Josef CHOUR. Tepelné zpracování čistírenských kalů. *Chemické listy* [online]. 2003, **97**(10), 976–982 [cit. 2020-05-10]. ISSN 1213-7103. Dostupné z: http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2003_10_01.pdf
- [40] HART, David, Franz LEHNER, Stuart JONES a Jonathan LEWIS. *The Fuel Cell Industry Review 2019* [online]. E4tech, 2019 [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: <http://www.fuelcellindustryreview.com/>
- [41] The future has arrived: World premiere of the Mercedes-Benz Citaro FuelCELL-Hybrid bus. *Daimler Global Media Site* [online]. Stuttgart: Daimler, c2020 [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://media.daimler.com/marsMediaSite/en/instance/ko/The-future-has-arrived-World-premiere-of-the-Mercedes-Benz-Citaro-FuelCELL-Hybrid-bus.xhtml?oid=9271703>
- [42] BRAUER, Holger, Manuel SIMM, Elke WANZENBERG a Marco HENEL. Transport von gasförmigem Wasserstoff via Pipelines. *Die BBR* [online]. 2018, (11), 36 - 41 [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: https://www.mannesmann-linepipe.com/fileadmin/footage/MEDIA/gesellschaften/smlp/Documents/Transport_von_gasfoermigem_Wasserstoff_via_Pipelines.pdf
- [43] Urbino 12 Hydrogen. In: *Solaris* [online]. Bolechowo-Osiedle: Solaris Bus & Coach, c2020 [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <https://www.solarisbus.com/cs/vozidla/nulove-emise/hydrogen-1>
- [44] ANGERMANNOVÁ, Andrea. Ústí chce mít plnicí stanici a první tři autobusy na vodík už příští rok. *IDNES.cz* [online]. MAFRA, 14. 2. 2020 [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: https://www.idnes.cz/usti/zpravy/usti-nad-labem-autobusy-vodik-plnici-stanice-ekologicky-doprava.A200213_532818_usti-zpravy_pakr
- [45] Úvodem o koksu. *OKK Koksovny, a.s.* [online]. [cit. 2020-05-07]. Dostupné z: <http://www.koksovny.cz/cz/uvodem-o-koksu>
- [46] V Brně vyjel do ulic první autobus poháněný bioplynem z odpadní vody. In: *Dopravní podnik města Brna, a. s.* [online]. 29.10.2018 [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: <https://dpmb.cz/cs/firma-tiskove-zpravy/all>
- [47] Vodíková infrastruktura pro dopravu. *FajnOVA* [online]. 20. 2. 2020 [cit. 2020-05-07]. Dostupné z: <https://fajnova.cz/projekt/vodikova-infrastruktura-pro-dopravu/>

- [48] MACEK, Jan. Vodíkové spalovací motory. In: *Česká vodíková technologická platforma* [online]. c2020, 3. 12. 2007 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/vyuziti-vodiku/657-vodikove-spalovaci-motory>
- [49] Vodíkové technologie. *ÚJV Řež, a. s.* [online]. Řež: ÚJV Řež, c2020 [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: <https://www.ujv.cz/cs/produkty-a-sluzby/veda-a-vyzkum/vodikove-technologie>
- [50] SOMOLOVÁ, Markéta a Petr DLOUHÝ. Výroba vodíku. In: *Česká vodíková technologická platforma* [online]. c2020, 9. 5. 2007 [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/vyroba-vodiku/664-vyroba-vodiku>
- [51] DOUCEK, Aleš. Výroba vodíku z biomasy. In: *Česká vodíková technologická platforma* [online]. c2020, 4. 2. 2008 [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/vyroba-vodiku/666-vyroba-vodiku-z-biomasy>
- [52] Wasserstoffbusse. *WSW Wuppertaler Stadtwerke* [online]. Wuppertal: Wuppertaler Stadtwerke, c2020 [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: <https://www.wsw-online.de/wsw-mobil/mehr-service/aktuelles/wasserstoffbusse/>
- [53] 2019 Hyundai Nexo 4-door SUV. *IIHS-HLDI* [online]. Insurance Institute for Highway Safety, 2019 [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: <https://www.iihs.org/ratings/vehicle/Hyundai/nexo-4-door-suv/2019>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

BEAMR	Bioelektrochemicky podporované mikrobiální reaktory
C	Uhlík
CNG	Stlačený zemní plyn
CO	Oxid uhelnatý
CO ₂	Oxid uhličitý
ČR	Česká republika
FCHEV	Fuel cell hybrid electric vehicle
H ₂	Molekula vodíku
H ₂ O	Voda
H ₂ SO ₄	Kyselina sírová
HI	Kyselina jodovodíková
CH ₄	Methan
I ₂	Molekula jódu
IIHS	Insurance Institute for Highway Safety
JIVE	Joint Initiative for Hydrogen Vehicles across Europe
KOH	Hydroxid draselný
LNG	Zkapalněný zemní plyn
MHD	Městská hromadná doprava
NAP CM	Národní akční plán čisté mobility
O ₂	Molekula kyslíku
PEM	Proton exchange membrane
SO ₂	Oxid siřičitý
USA	Spojené státy americké