



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

VODÍK JAKO PALIVO PRO VOZIDLO NAD 3,5 T

HYDROGEN AS FUEL FOR VEHICLES OVER 3.5 T

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Antonín Alinče

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **Antonín Alinče**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Stavba strojů a zařízení
Vedoucí práce: **prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.**
Akademický rok: 2021/22

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

Vodík jako palivo pro vozidlo nad 3,5 t

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Výhody nevýhody různých způsobů využití vodíku v těžké nákladní dopravě.
Spalování vodíku v zážehového motoru, simulace skriptem v MATLABu.
Ideový návrh řešení umístění nádrží pro vodík na motorovém vozidle.

Cíle bakalářské práce:

Provést rešerši různých metod výroby, dopravy a uskladňování vodíku pro potřebu dopravy, včetně potřebné infrastruktury. Řešení umístění vodíkových nádrží ve vozidle.

Seznam doporučené literatury:

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

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

BRESTOVIC, Tomas, JASMINSKA, Natalia, LAZAR, Marian. Metal hydride tank cooling at hydrogen absorption into the LaCeNi alloy. 1. Brussels: EuroScientia, 2017. ISBN 978-90-822990-8-3.

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

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá vodíkovou infrastrukturou pro potřebu nákladní dopravy: metodami výroby, dopravy a uskladňováním vodíku. V práci je popsána cesta vodíku od výroby až po pohon vozidla, ať již ve spalovacím motoru či v palivovém článku. Tyto možnosti vodíkového pohonu jsou následně porovnány jak mezi sebou, tak vůči jiným palivům. Závěr práce je pak zaměřen na ideový návrh umístění vodíkových nádrží ve vozidle.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vodík, vodíková infrastruktura, vodíkový pohon, vozidlo nad 3,5 t

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with hydrogen infrastructure for the needs of freight transport: methods of production, transportation, and storage of hydrogen. The work describes the path of hydrogen from production to vehicle propulsion, whether in the internal combustion engine or in the fuel cell. These hydrogen propulsion options are then compared with each other and with other fuels. The conclusion of the work is then focused on the conceptual design of the location of hydrogen tanks in the vehicle.

KEYWORDS

Hydrogen, hydrogen infrastructure, hydrogen propulsion, vehicle over 3.5 t

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ALINČE, Antonín. *Vodík jako palivo pro vozidlo nad 3,5 t* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/140627>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 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 16. května 2022

.....

Antonín Alinče

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat panu prof. Ing. Josefu Štětinovi, Ph.D. za vedení mé bakalářské práce, cenné rady, své vědomosti a poskytnuté podklady pro vypracování této práce.

Také bych chtěl poděkovat za veškerou poskytnutou pomoc své rodině a blízkým.

OBSAH

Úvod.....	11
1 Vlastnosti vodíku	12
2 Výroba vodíku.....	14
2.1 Výroba vodíku z fosilních paliv.....	14
2.1.1 Parní reforming.....	14
2.1.2 Parciální oxidace.....	15
2.1.3 Samotepelný reforming	16
2.1.4 Zplyňování uhlí	16
2.2 Výroba vodíku z obnovitelných zdrojů	17
2.2.1 Elektrolyza vody.....	17
2.2.2 Termolýza a termochemický rozklad vody	18
2.2.3 Výroba vodíku z biomasy.....	19
2.3 Shrnutí výroby vodíku	20
3 Skladování a přeprava vodíku.....	23
3.1 Skladování na palubě vozidla	23
3.1.1 Stlačený vodík	23
3.1.2 Kapalný vodík	24
3.1.3 Kryo-stlačený vodík	24
3.1.4 Hydridy.....	25
3.2 Skladování velkého množství vodíku	26
3.2.1 Skladování vodíku v chemické podobě	26
3.2.2 Podzemní skladování vodíku.....	27
3.3 Přeprava a distribuce vodíku.....	27
3.3.1 Přeprava vodíku.....	27
3.3.2 Čerpací stanice.....	28
3.4 Shrnutí skladování a přepravy vodíku	30
4 Vodík u vozidel nad 3,5 t.....	31
4.1 Vodík jako palivo ve spalovacích motorech.....	31
4.1.1 Pracovní cyklus vznětového motoru.....	31
4.1.2 Změny vlivem použití vodíku jako paliva.....	31
4.2 Vodík jako palivo v palivových článcích	34
4.2.1 Princip funkce palivového článku	34
4.2.2 Palivový článek typu PEM	34
4.3 Porovnání spalování vodíku a jiných paliv v zážehovém motoru pomocí simulace skriptem v MATLABu	35
4.4 Vozidla nad 3,5t s vodíkovým pohonem	38
4.4.1 Autobusy.....	38
4.4.2 Nákladní vozy a tahače.....	39
4.5 Porovnání vozidel na vodíkový pohon s konvenčními vozidly	40
4.5.1 Porovnání z ekonomického hlediska	40
4.5.2 Porovnání z ekologického hlediska	45
4.6 Shrnutí vodíku u vozidel nad 3,5 t.....	47

5	Ideový návrh řešení umístění nádrží pro vodík ve vozidle.....	49
5.1	Střecha	49
5.2	Podvozek a prostor mezi nápravami	49
5.3	Prostor za kabinou	50
5.4	Návěs & přívěs	51
5.5	Shrnutí možností umístění nádrží.....	51
	Závěr	52
	Použité informační zdroje	53
	Seznam použitých zkratk a symbolů	58
	Seznam příloh.....	60



ÚVOD

Snahy o uhlíkovou neutralitu mnoha států do roku 2050 při boji proti globálnímu oteplování a snížení emisí skleníkových plynů povedou k postupné přeměně nejen automobilního, ale celého průmyslu. Při těžbě, následném zpracování a využití fosilních paliv, primárního zdroje energie současnosti, dochází k tvorbě skleníkových plynů, a to i přes veškeré snahy o omezení tvorby těchto nežádoucích odpadních produktů a jejich důkladnou filtraci.

Vlivem konfliktu na Ukrajině a snah zemí EU o energetickou nezávislost také nejsou jisté další dodávky fosilních paliv z Ruska a zemí v ruské sféře vlivu. Právě tyto nerostné suroviny jsou pak politickou a ekonomickou pákou při vyjednávání. Z nejistoty výsledků bojů a jednání tak ani není možné určit budoucí dodávky ropy a zemního plynu do zemí EU.

Využití vodíku jako nositele energie by při masivní finanční podpoře tvorby vodíkové infrastruktury mohlo vést k osamostatňování až nezávislosti evropské energetiky od vnějších aktérů.

Vodík by tak mohl v budoucnu představovat nejen úložiště energie z obnovitelných zdrojů, ale také alternativu jakožto palivo v automobilním sektoru.

Specifickým odvětvím automobilního sektoru, ve kterém by vodík díky svým vlastnostem a současným trendům mohl být průkopníkem jakožto nástupce fosilních paliv, jsou vozidla nad 3,5 t, zvláště pak nákladní doprava.

1 VLASTNOSTI VODÍKU

Vodík, nejhodněji zastoupený prvek ve vesmíru, je za normálních podmínek bezbarvý plyn, který je lehčí než vzduch, bez chuti a zápachu. Jedná se o důležitý organický prvek, tvořící nejvíce chemických sloučenin z celé periodické tabulky. Tento prvek je také zodpovědný za tzv. vodíkové můstky, bez kterých by život na Zemi, tak jak ho známe, neexistoval [1].

Na Zemi se však vodík v čisté podobě téměř nevyskytuje, lze jej nalézt pouze ve sloučeninách, primárně s kyslíkem, uhlíkem a dusíkem [2]. Tato skutečnost na jednu stranu ztěžuje jeho použití jakožto palivo nutností výroby čistého vodíku pro toto použití, na druhou stranu zdroje, z nichž je možno vodík získat jsou prakticky nevyčerpatelné a obnovitelné (např. voda).

V tab. 1 jsou uvedeny důležité vlastnosti vodíku v porovnání s ostatními dominantními palivy dneška. Z ní je patrná několikanásobně větší výhřevnost (někdy také energetická hustota vzhledem k hmotnosti) vodíku a z toho plynoucí potřeba menšího množství (hmotnostní, nikoli objemové) paliva k ujetí stejné vzdálenosti.

Tab. 1 Důležité vlastnosti vodíku v porovnání se zemním plynem, benzínem a naftou [3, 4]

Vlastnosti	Jednotky	Vodík	Zemní plyn	Benzín	Nafta
Hustota	[kg.m ⁻³]	0,09	0,7-0,9	737	820-950
Výhřevnost	[MJ.kg ⁻¹]	120-142	53,6	46,4	48
Teplota samovznícení	[°C]	585	540	247-310	200
Koeficient difúze	[cm ² .s ⁻¹]	0,61	0,24	–	–
Minimální potřebná energie k zapálení	[mJ]	0,02	0,29	0,29	–
Rozsah zápalnosti směsi	[%]	4-75	5-15	1,4-7,6	0,6-7,5

Díky své vysoké difuzivitě je vodík lépe schopen tvořit se vzduchem homogenní směs než benzín. Tato vlastnost je žádoucí nejen při spalování v zážehovém motoru, ale v případě úniku vodíku z nádrže se také rychleji rozptýlí [3]. Navíc díky tomu, že hustota vodíku je nižší než vzduchu, směs se nekumuluje při zemi, ale uniká pryč. Nebezpečí je tedy při úniku v porovnání s benzínem nebo LPG menší [5].

Nízká hustota vodíku je však pro jeho použití jako palivo zároveň značnou nevýhodou. Pro možnosti konkurenceschopnosti vůči jiným palivům a využití v praxi je tedy nutné vodík stlačovat na vysoké tlaky (35 až 70 MPa) nebo využít jinou alternativu skladování vodíků ve vozidle (viz. kapitola 3). Navíc nízká hustota má za následek nízkou energetickou hustotu (v tomto případě vztaženou k objemu směsi) paliva ve směsi se vzduchem, což vede k snížení výkonu motoru [3].

Malá potřebná energie k zapálení směsi paliva a vzduchu (např. zapalovací svíčkou) zapříčiňuje to, že části válce s lokálně vysokou teplotou mohou sloužit jako nežádoucí zdroje energie k samovznícení směsi, což by mohlo vést k detonačnímu hoření či zpětnému zášlehu plamene (tzv. flashback či backfire) [3, 4].

Vysoká teplota samovznícení naopak vede k tomu, že směs ve válci je odolná vůči samovznícení, a tudíž vyžaduje vnější zdroj k dodání energie k zapálení. Teplota samovznícení je důležitý faktor při určování vhodného kompresního poměru motoru. Tato vlastnost vodíku tak umožňuje využití vyšších kompresních poměrů než v případě motorů s palivem na bázi uhlovodíků [3, 5].

Rychlost plamene je u vodíku vysoká, což umožňuje motoru se více přiblížit ideálnímu termodynamickému cyklu. Toto platí pro stechiometrickou směs a v takovém případě je rychlost plamene o řád vyšší než u benzínu [5]. V případě chudé směsi však dochází k výraznému poklesu rychlosti plamene [3].

Široký rozsah zápalnosti směsi (v tab. 1 uveden procentuální poměr objemu paliva vůči vzduchu) umožňuje široké provozní pásmo součinitele přebytku vzduchu λ . Spalování chudé směsi má za následek nižší spotřebu paliva [4]. Navíc spalování chudé směsi má za následek nižší teploty plamene, což vede k snížení tvorby emisí oxidů dusíku (NO_x) [3].

V neposlední řadě je důležitým jevem tzv. vodíková křehkost či vodíkové křehnutí [6]. Působením atomárního vodíku na kovy, zejména ocel, dochází k degradaci požadovaných mechanických vlastností a předčasnému praskání. Příčinou tohoto jevu je difúze.

Všechny tyto vlastnosti je nutné uvažovat nejen při návrhu a vývoji vozidel s vodíkovým pohonem, ale také při uskladňování a dopravě vodíku.

2 VÝROBA VODÍKU

Vodík se na Zemi nevyskytuje v čisté podobě, proto je potřeba jej nejdříve vyrobit. Metod a zdrojů pro výrobu vodíku je celá řada. V této kapitole jsou uvedeny a popsány jak metody tradiční a méně ekologické, tedy výroba vodíku z fosilních paliv, tak i novější metody výroby vodíku z obnovitelných zdrojů. Na konci kapitoly jsou pak metody shrnuty a porovnány.

2.1 VÝROBA VODÍKU Z FOSILNÍCH PALIV

K roku 2014 se 96 % celkové světové produkce vodíků se vyrábělo z fosilních paliv (49 % zemní plyn, 29 % kapalné uhlovodíky a 18 % uhlí) [7]. K dnešnímu dni je produkce z fosilních paliv dominantní, a ještě nějaký čas bude primárním zdrojem H_2 .

2.1.1 PARNÍ REFORMING

Parní reforming je endotermická metoda výroby vodíku s využitím katalyzátoru, při které vstupními surovinami do reakce jsou uhlovodík a pára. Produktem pak kromě vodíku jsou také oxidy uhlíku (1) [8, 9].

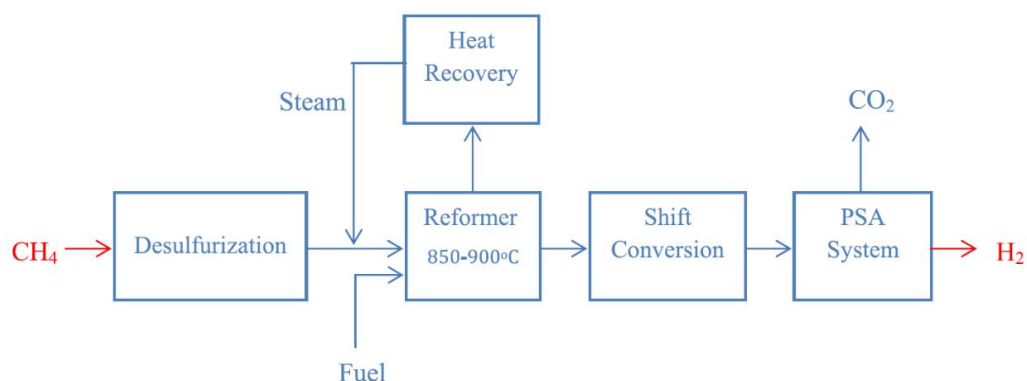


Vstupní surovinou do procesu výroby může být methan, zemní plyn, LPG nebo jiné plyny obsahující methan či nafta [8, 10]. V případě, kdy vstupní surovina obsahuje síru, je nutné před samotným začátkem výroby odsíření, jinak by totiž byl zničen katalyzátor. Ten bývá nejčastěji na bázi niklu [8].

Proces výroby se skládá z několika důležitých kroků: reformingu neboli tvorbou tzv. „synthesis gas“ zkr. syngas (plynná směs H_2 a oxidy uhlíku), přeměny voda-plyn (tzv. „water-gas shift“ zkr. WGS) a purifikací plynu [8].

Aby v prvním kroku (tj. reforming) došlo k tvorbě požadovaného množství vodíku v syngasu, je potřeba udržovat správné operační parametry, tedy vysokou teplotu a tlak až 3,5 MPa. Po reformingu syngas prochází jednotkou na rekuperaci tepla, které se znova využije při reformingu. Následuje WGS, kdy dochází k reakci CO a páry, z čehož vznikne další vodík (2). Nakonec směs prochází zařízením pro oddělení CO_2 a tzv. „pressure swing adsorption“ (PSA), díky čemuž je získán téměř dokonale čistý vodík (obr. 1) [8].





Obr. 1 Diagram parního reformingu s methanem jakožto vstupním uhlovodíkem [8]

Desulfurization – odsíření

Fuel – palivo

Heat Recovery – rekuperace tepla

PSA system – zařízení pro oddělení CO₂

Steam – pára

Reformer – reaktor

Shift Conversion – přeměna voda-plyn (WGS)

Emise je možno snížit zachytáváním a ukládáním CO₂ (z ang. „CO₂ capture and storage“ zkr. CCS), díky čemuž je CO₂ zachyceno a uloženo do geologických rezervoárů či oceánů [8].

Tato metoda výroby vodíku je nejvíce rozšířená. Z celkové světové produkce vodíku je touto metodou vytvořeno 48 % [9].

2.1.2 PARCIÁLNÍ OXIDACE

Parciální oxidace (POX) je exotermická metoda výroby vodíku, při které vstupními surovinami do reakce jsou uhlovodík a kyslík. Produktem pak kromě vodíku jsou také oxidy uhlíku, jak je patrné z (3) [10].



POX může být jak katalytická, tak může probíhat i bez přítomnosti katalyzátoru. Katalytická výroba probíhá při teplotách okolo 950 °C, bez přítomnosti katalyzátoru teploty dosahují 1150 – 1315 °C [8]. Katalyzátory bývají niklové, kobaltové či rutheniové [9, 10].

Vstupní surovinou při katalytické POX je např. methan či nafta, při POX bez katalyzátoru jsou to uhlovodíky obsahující methan, těžká ropa nebo i uhlí. POX je tak nejvhodnější metodou výroby H₂ při využití těžších reaktantů např. uhlí či zbytků z těžké ropy [8].

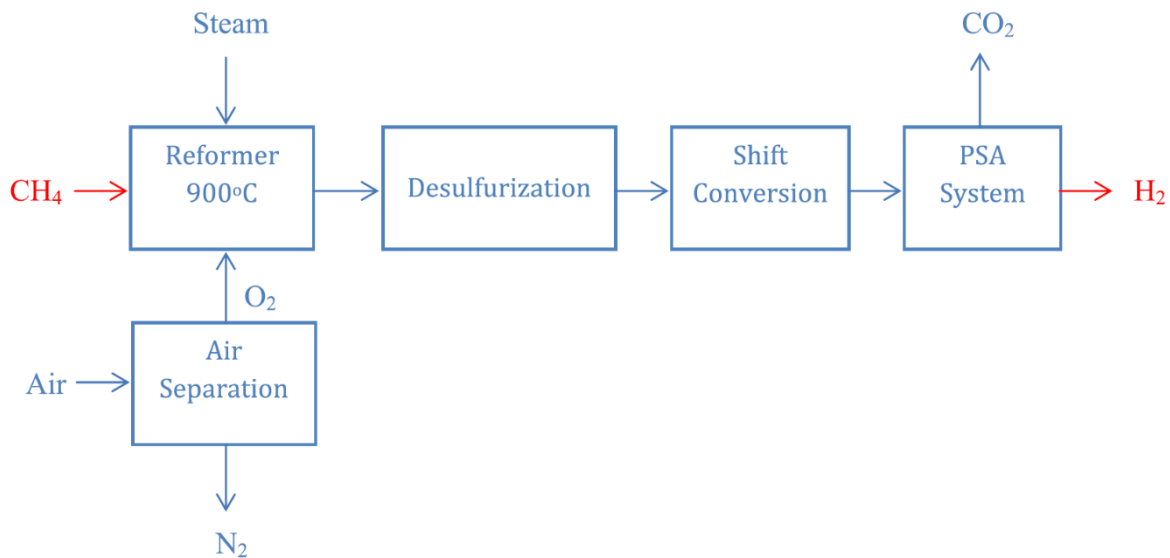
Před samotnou POX, je nutné odsíření, po POX pak následuje WGS pro získání více H₂ a vhodná forma purifikace směsi (obr. 2). Při katalytické POX je teplo dodáváno z kontrolovaného spalování methanu s termální účinností $\eta_t = 60 - 75$ %. Značným nákladem při využití této metody je nutnost výroby čistého O₂ [8].

2.1.3 SAMOTEPELNÝ REFORMING

Samotepelný reforming (autothermal reforming) je metoda výroby H_2 , která kombinuje exotermickou POX s endotermickým parním reformingem, kdy teplo z POX se využije k dodání potřebného tepla do parního reformingu. Výsledná reakce (4) je téměř termodynamicky neutrální, kdy vodní pára a O_2 či vzduch jsou zároveň přivedeny do reaktoru, což způsobí současně POX a parní reforming [8, 9].



Při samotepelném reformingu jsou využívány niklové katalyzátory s palladiem, platinou, rheniem, molybdenem či cínem [9].



Obr. 2 Diagram samotepelného reformingu s methanem jakožto vstupním uhlovodíkem [8]

Reformer – reaktor

Air separation – separace O_2 ze vzduchu

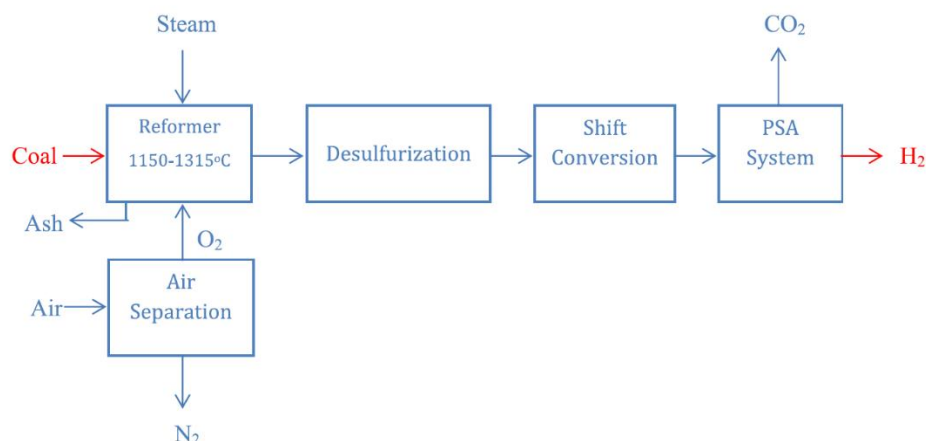
Desulfurization – odsíření

Shift conversion – přeměna voda-plyn (WGS)

PSA system – zařízení pro oddělení CO_2

2.1.4 ZPLYŇOVÁNÍ UHLÍ

Zplyňování uhlí je vyspělá metoda výroby H_2 , při níž dochází k parciální oxidaci uhlí s O_2 a párou za vysoké teploty a tlaku, produkty reakce jsou pak H_2 , CO a směs páry a CO_2 [11]. Jedná se tak tedy o specifický typ POX (3), kde vstupním reaktantem je právě uhlí (obr. 3). Kvůli nízkému obsahu H_2 v uhlí je vodní pára primárním zdrojem H_2 v této reakci [8].



Obr. 3 Diagram POX či zplynování uhlí s uhlím jako vstupní surovinou [8]

Coal – uhlí

Air – vzduch

Reformer – reaktor POX

Desulfurization – odsíření

PSA system – zařízení pro oddělení CO₂

Ash – popel

Steam – pára

Air separation – separace vzduchu

Shift conversion – přeměna voda-plyn (WGS)

2.2 VÝROBA VODÍKU Z OBNOVITELNÝCH ZDROJŮ

V době, kdy se státy po podpisu Pařížské dohody, obzvláště státy v EU, snaží dosáhnout uhlíkové neutrality a zbavit se závislosti na fosilních palivech, roste význam obnovitelných zdrojů.

2.2.1 ELEKTROLÝZA VODY

Elektrolýza vody je metoda výroby vodíku, při které se využívá elektrického proudu procházejícího skrze elektrody ponořené v elektrolytu k disociaci vody na vodík a kyslík (5) [8]. Obecně platí, že při elektrolýze na kladně nabitě anodě dochází k oxidaci, na katodě pak k redukci. V současnosti existuje několik typů elektrolyzérů: alkalické, PEM (Proton exchange membrane) a SOE (Solid oxide electrolyser). Celková reakce u těchto typů elektrolyzérů je stejná, liší se pouze reakcemi na elektrodách.



U alkalických elektrolyzérů využívající zásaditý roztok jako elektrolyt (např. KOH nebo NaOH) vznikají na katodě z vody vodík a hydroxid (6), hydroxid se následně přesouvá k anodě, kde vzniká kyslík (7) [10]. U tohoto typu elektrolyzéry je hlavním problémem koroze.



PEM elektrolyzéry využívají membránu z polymeru. Při oxidaci vody na anodě vzniká kyslík, protony a elektrony (8) [9]. Protony a elektrony prochází membránou ke katodě, kde dochází k redukci (9). U tohoto elektrolyzéry není problémem koroze, ale vysoká výrobní cena.



SOE elektrolyzéry operují za vysokých teplot. Se vzrůstající teplotou roste účinnost elektrolyzéry [9]. Na katodě vzniká vodík a oxidové anionty (10), které na anodě oxidují na kyslík skrze elektrolyt v pevném skupenství (11).



Elektrolýza je vhodná pro získání vysoce čistého vodíku, její nevýhodou je však velká spotřeba elektřiny, relativně nízká účinnost a vysoká cena ve srovnání s metodami využívající k výrobě vodíku fosilní paliva [9]. Při využití obnovitelných zdrojů energie, jako jsou vodní, větrné a solární elektrárny, je vyrobený vodík nejčistším nositelem energie, která může být skladována a využita v moment, kdy ji bude potřeba [8].

2.2.2 TERMOLÝZA A TERMOCHEMICKÝ ROZKLAD VODY

Termolýza vody je proces, kdy dochází k tepelnému rozkladu vody na vodík a kyslík (5), podobně jako u elektrolýzy. Termolýza však využívá k přeměně energii tepelnou, nikoli elektrickou. Aby při termolýze nebylo potřeba žádných dalších chemických surovin či katalyzátorů, je potřeba dosáhnout teploty přes 2000 °C [10].

Nebezpečí rekombinace H₂ a O₂ je zamezeno rychlým ochlazením a separací s použitím paládiové polopropustné membrány [11].

Kvůli náročnosti dosáhnout tak vysokých teplot udržitelnými zdroji tepla je využíváno kombinaci tepelného rozkladu vody a vhodných chemických reakcí [8, 10]. Takový proces je označován jako termochemický rozklad vody. Jako plně vyvinutý je považován S–I cyklus, otestován v USA a Japonsku, který by mohl být konkurenceschopnou metodou výroby vodíku v praxi [11].

První reakcí tohoto cyklu je disociace kyseliny sírové za teploty 300 – 500 °C bez katalyzátoru (12). Plynné SO₃ je separováno od vodních par při teplotě 800 – 900 °C, poté dojde k rozkladu SO₃ na kyslík a SO₂ (13). Následně je kyslík separován od SO₂ a oxid siřičitý reaguje s jódem a vodou za nízké teploty, kdy vzniká kyselina sírová a jodovodík (14). Poslední reakcí cyklu je pak vznik vodíku a jódu tepelným rozkladem jodovodíku za teploty 425 – 450 °C (15) [10, 11].





Díky tomu, že v reakcích (12 – 15) nevznikají vedlejší produkty, lze chemikálie v cyklu opakovatelně využít. Nevýhodou, stejně jako u termolýzy, je potřeba velkého množství energie k dosažení provozních teplot. Možnými zdroji tepla pro S–I cyklus je nukleární energie, koncentrovaná solární nebo teplo ze spalování biomasy [8, 11]. Dalšími nevýhodami, které přispívají k růstu nákladům produkce, kromě počáteční investice do potřebného vybavení, je toxicita chemikálií v reakcích, jejich dostupnost a cena, problémy s možnou korozí a separací látek v cyklu.

2.2.3 VÝROBA VODÍKU Z BIOMASY

Energie získaná z biomasy pochází z rostlinných a zvířecích produktů či zbytků (např. dřevo, zvířecí odpad, škrob nebo i odpadní voda) [8, 11]. Vodík lze z biomasy získat dvěma způsoby: termochemickým či biologickým procesem. Přestože jsou biologické procesy oproti termochemickým méně energeticky náročné a šetrnější z environmentálního hlediska, kvůli tomu, že probíhají za mírnějších podmínek, produkují méně vodíku vzhledem k vstupnímu množství surovin.

Mezi slibné termochemické metody výroby vodíku, z ekonomického a environmentálního hlediska, vhodné pro velkokapacitní výrobu, patří zplyňování biomasy [8, 9]. Tato metoda je stejná jako u zplyňování uhlí, vstupní surovinou je zde však biomasa místo uhlí [9]. Vedlejším produktem zplyňování je kromě CO a CO₂ i dehet.

Výhodami zplyňování biomasy, kromě výše zmíněných, je relativně vysoká účinnost (až 52 %) [8, 9]. Nevýhodou pak krom tvorby dehtu vysoká pořizovací cena reaktoru.

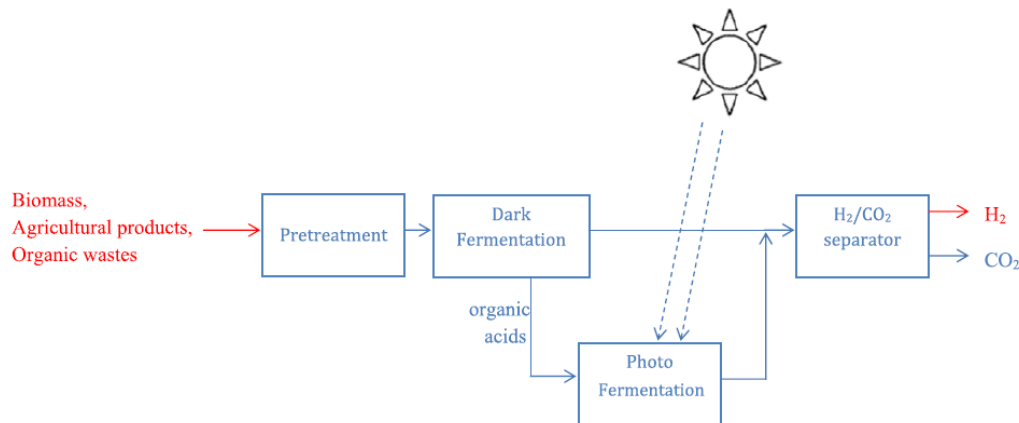
Jedním z nadějných biologických procesů výroby vodíku z biomasy je fermentace, jak anaerobní nebo také temná fermentace, tak i foto-fermentace. Fermentace obecněji je biochemický proces, za či bez přítomnosti kyslíku, kdy mikroorganismy (v tomto případě bakterie) přeměňují vstupní suroviny na organické kyseliny, alkoholy, aceton a v menší míře H₂ a CO₂ [8, 12].

Při temné fermentaci bakterie přeměňují vstupní suroviny, v uvedeném případě glukózu a vodu, na organickou kyselinu (zde octová), CO₂ a H₂ (16). V případě spojení temné a foto-fermentace je pak kyselina dále přeměněna na další CO₂ a H₂ (17) (obr. 4) [8]. V takovém případě je využito nefotosyntetizujících či anaerobních a fotosyntetizujících bakterií. Tímto spojením se získá vyšší produkce H₂ a snížení požadavků na světlo.



Reaktor pro anaerobní fermentaci, tedy bez přítomnosti O₂, je oproti foto-fermentačním jednodušší a levnější. Další výhodou je, že vstupní surovinou pro temnou fermentaci může

být organický odpad, např. odpadní voda. Díky tomu by mohla být integrována do systému čističek vod k produkci H_2 [11]. Využití organického odpadu k výrobě vodíku by mohlo napomoci k snížení výrobní ceny, jelikož tento odpad je levný a snadno dostupný. Temná fermentace též může pomoci se stabilizací odpadu, který by jinak mohl být potenciálním zdrojem nebezpečí kontaminace [12].



Obr. 4 Diagram temné fermentace spojené s foto-fermentací [8]

Biomass – biomasa

Agricultural products – zemědělské produkty

Organic wastes – organický odpad

Pretreatment – předpříprava

Dark Fermentation – temná fermentace

Organic acids – organické kyseliny

Photo Fermentation – foto-fermentace

H₂/CO₂ separator – separace H₂ a CO₂

2.3 SHRNUÍ VÝROBY VODÍKU

V této kapitole jsou popsány metody výroby vodíku, jak z fosilních paliv, tak z obnovitelných zdrojů. Z fosilních paliv jsou popsány parní reforming, parciální oxidace, samotepelný reforming a zplyňování uhlí. Z obnovitelných zdrojů pak elektrolýza vody (alkalická, PEM, SOE), termolýza a termochemický rozklad vody, zplyňování biomasy, temná a foto-fermentace.

V tab. 2 a 3 jsou tyto metody výroby porovnány. Kromě účinnosti metody a potřebné vstupní suroviny je také uvedena cena výroby vodíku (bez vstupních nákladů) a vspělost metody. Vspělostí je myšleno, zda-li je daná metoda již využívána v praxi nebo za jak dlouho by mohlo metoda být implementována v průmyslu. U některých metod výroby vspělost není známa.

Tab. 2 Porovnání metod výroby H₂ z fosilních paliv [8, 9, 10, 11]

Metoda výroby	Účinnost [%]	Vstupní surovina	Cena H ₂ [\$/kg]	Vypělost metody
Parní reforming	74 – 85	Uhlovodíky	2,08 – 2,27	Komerčně dostupná
Parciální oxidace	60 – 75	Uhlovodíky	1,34 – 1,63	Komerčně dostupná
Samotepelný reforming	60 – 75	Uhlovodíky	1,48	Komerčně dostupná
Zplyňování uhlí	-	Uhlí	1,34 – 1,63	Komerčně dostupná

Z tabulek je patrné, že konvenční metody výroby z fosilních paliv jsou velice účinné a díky současnému rozšíření je výrobní cena H₂ výhodnější oproti metodám využívající obnovitelné zdroje.

Sezonní dostupnost některých druhů biomasy je další faktor, který při zvažování implementace metod je potřeba brát v potaz [8, 10]. Dalšími nevýhodami je i to, že nedochází k úplně přeměně vstupních surovin a tvorba dehtu.

Tab. 3 Porovnání metod výroby H₂ z obnovitelných zdrojů [8, 9, 10, 11]

Metoda výroby	Účinnost [%]	Vstupní surovina	Cena H ₂ [\$/kg]	Vypělost metody
Alkalická elektrolýza	50 – 60	Voda	4,15 – 23,27	Komerčně dostupná
PEM elektrolýza	30 – 50	Voda	4,15 – 23,27	Dostupná v kratším časovém horizontu
SOE elektrolýza	50 – 60	Voda	4,15 – 23,27	
Termolýza vody	20 – 45	Voda	2,17 – 8,4	
Termochemický rozklad vody (S-I cyklus)	45	Voda	2,45 – 2,63	

Zplyňování biomasy	35 – 50	Biomasa	1,77 – 2,05	
Temná fermentace	60 – 80	Biomasa	2,57	Dostupná v dlouhém časovém horizontu
Foto-fermentace	0,1	Biomasa	2,83	Dostupná v dlouhém časovém horizontu

Cena H₂ na kilogram vyrobeného pomocí elektrolýzy se odvíjí od zdroje elektřiny: při použití větrné energie 5,89 – 6,03 \$, 4,15 – 7 \$ při použití jaderné energie a 5,78 – 23,27 \$ při použití fotovoltaiky [8]. Cenu dle metody elektrolýzy však zdroje neuvádějí. Podobně je to s termolýzou: při použití jaderné energie 2,17 – 2,63 \$, při použití solární 7,98 – 8,4 \$.

I přes vysoké vstupní náklady některých metod výroby z obnovitelných zdrojů se dá v budoucnu očekávat, že díky dalšímu výzkumu a snaze států o uhlíkovou neutralitu poroste podíl produkce vodíku právě z obnovitelných zdrojů. Do té doby však hlavní část poptávky budou nadále pokrývat konvenční metody výroby z fosilních paliv.

3 SKLADOVÁNÍ A PŘEPRAVA VODÍKU

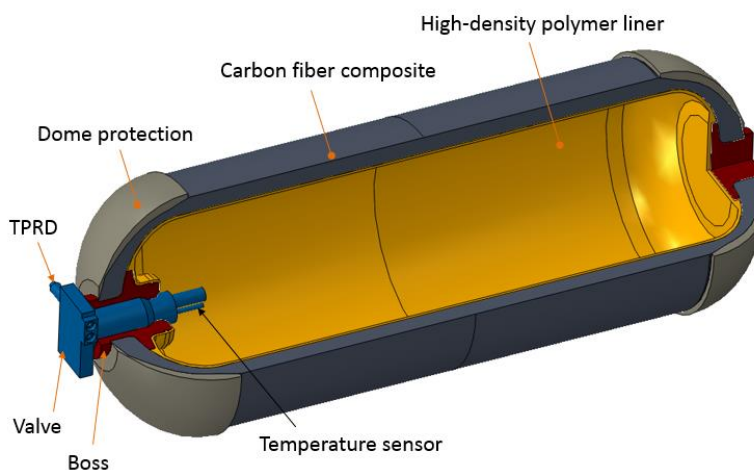
Pro konkurenceschopnost jakéhokoli paliva je stěžejní dostatečně vyspělá infrastruktura a vhodné skladování. S vývojem technologií výroby vodíku klesá jeho cena a roste důležitost vhodného uskladnění a transportu pro vytvoření dostatečné infrastruktury, která by poskytla vodíku možnost konkurovat konvenčním palivům. Většina vodíku je však spotřebována přímo v daném průmyslovém komplexu, kde je vyroben [1]. Právě proto je pro vodík důležitý výzkum a vývoj technologií skladování a přepravy. Z pokroků v tomto odvětví nebude těžit jen automobilní, nýbrž i celý energetický sektor zabývající se skladováním vytvořené elektrické energie.

3.1 SKLADOVÁNÍ NA PALUBĚ VOZIDLA

3.1.1 STLAČENÝ VODÍK

V současnosti nejvíce pokročilou a nejrozšířenější metodou pro skladování na palubě vozu je využití stlačeného vodíku v plynné podobě uloženého v tlakových nádobách. Tuto metodu skladování paliva na palubě vozidla využívá např. Toyota Mirai.

Existují 4 možné typy tlakových nádob využívaných v současnosti. Typ I, celokovové konstrukce, je určen pouze pro tlak do 50 MPa, většinou spíše 30 MPa (300 bar). Přestože je ze všech typů nejlevnější, kvůli celokovové konstrukci je těžší než ostatní typy. Typ II je převážně kovový, obsahuje již kompozitní překrytí. Typický provozní tlak tohoto typu nádoby je 200 bar. Typ III, s kovovou vložkou a úplným kompozitním překrytím, je vhodný pro tlaky menší než 45 MPa, přestože může být využit pro tlak 70 MPa. Typ IV na obr. 5 má celo-kompozitní stavbu a je určen pro provozní tlak 70 MPa [13].



TPRD = Thermally Activated Pressure Relief Device
Credit: Process Modeling Group, Nuclear Engineering Division, Argonne National Laboratory (ANL)

Obr. 5 Tlaková nádoba na stačení vodík typu IV (700 bar) [14]

Na kovové části tlakové nádoby se používá nerezová či chrom–molybdenová ocel nebo hliník, na polymerní části polymery na bázi polyethylenu či polyamidu a na kompozitní části skleněná, aramidová či uhlíková vlákna v epoxydové pryskyřici [6]. Uhlíková vlákna se volí pro aplikace and 35 MPa. Kromě epoxydové pryskyřice se dají použít i jiné materiály, avšak tento materiál je preferován kvůli vhodným mechanickým vlastnostem, své stabilitě a kompatibilitě při výrobě tlakových nádob.

Změnami teplot při plnění a vypouštění, vodíkovému křehnutí a možným rychlým změnám tlaku může docházet k trvalým deformacím nádob, jejich poškození a degradaci materiálů [6]. Proto je potřeba volit materiály s vhodnými vlastnostmi k překonání těchto problémů.

Vysoké tlaky omezují tvar nádoby na válec, zakončený polokoulemi, tzv. dómy [6, 12]. Kvůli tomu je integrace tlakových nádob do zástavby vozidla výzvou. Vysoký tlak může představovat riziko i z hlediska bezpečnosti.

3.1.2 KAPALNÝ VODÍK

Další možnou metodou skladování vodíku na palubě vozidla je v kapalné podobě. K dosažení kapalného skupenství je potřeba ochladit H_2 na -253 °C (20 K) za atmosférického tlaku [6, 12, 15]. Pro udržení tak nízkých teplot je nutná dostatečně izolovaná nádoba, aby nedocházelo k prostupu tepla z okolí.

Kryogenní nádrž na kapalný vodík není primárně navrhována k tomu, aby vydržela vnitřní tlak, ale právě k tomu, aby nedocházelo k prostupu tepla. Zvýšení teploty v nádrži by vedlo k růstu tlaku uvnitř, proto je nádrž opatřena pojistným ventilem k případnému odpuštění, což vede k poklesu tlaku uvnitř nádrže. Jelikož v praxi žádná izolace není dokonalá, nádrž absorbuje teplo z okolí a dochází k postupnému odpuštění, až se nádrž časem zcela vyprázdní – celá nádrž se může vyprázdnit za 2 týdny.

Přestože zkapalněním vodíku vrostе energetická hustota vzhledem k objemu z 2,5 – 5 MJ/l (pro 345 bar a 690 bar) na 8 MJ/l, je tato metoda méně vhodná k skladování na palubě vozidla z několika důvodů [16]. K procesu zkapalnění, který je časově a energeticky náročný se spotřebuje 35 – 40 % energie uložené v palivu (u stlačení na 690 bar se jedná o 10 %) [6, 16]. Další nevýhodou je snadné vypařování při tankování.

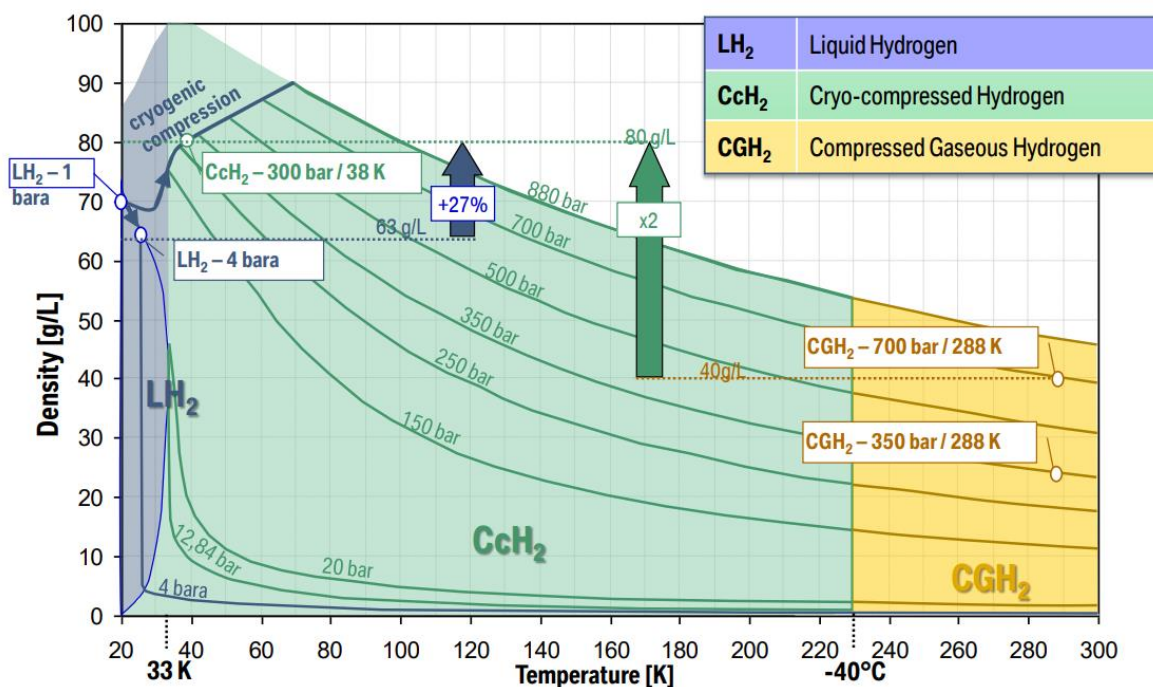
Vzhledem k těmto nevýhodám není kapalný vodík optimální pro aplikaci přímo na palubě vozidla, spíše k přepravě ve velkém množství na dlouhé vzdálenosti nákladními vozidly, vlaky či loďmi, v případě mezikontinentální přepravy [6]. Další vhodnou aplikací je pak stacionární skladování velkého množství se systémy zajišťujícími odvod tepla, které by jinak vedlo k odpuštění.

3.1.3 KRYO-STLAČENÝ VODÍK

Kryo-stlačení či kryo-kompresie je kombinací dříve uvedených metod skladování vodíku, tj. stlačení a zkapalnění. Tato metoda skladování vede k minimalizaci ztrát odpuštěním během nečinnosti vozidla a zároveň ke zvýšení energetické hustoty.

Nádrž na kryo-stlačený H_2 je tvořena tlakovou nádobou na vodík typu III s kovovou vložkou a úplným kompozitním překrytím zapouzdřeným v sekundárním izolovaném plášti, jehož účelem je zamezení prostupu tepla [6].

Nádoby pro tento typ skladování jsou navrženy tak, aby zvládly teploty 20 K a vysoké tlaky (přes 30 MPa). Při kryo-kompresním uskladnění H_2 se BMW podařilo při teplotě 38 K a tlaku 300 bar podařilo dosáhnout hustoty 80 g/l, jak je patrné z obr. 6 [17]. Při těchto podmínkách je dokonce hustota vyšší než u kapalného H_2 (63 g/l při teplotě 33 K a tlaku 4 bar) nebo vysoce stlačeného H_2 (40 g/l při teplotě 288 K a tlaku 700 bar) [6].



Obr. 6 Porovnání hustoty H₂ při skladování stlačením (CGH₂), zkvalněním (LH₂) a kryo-kompresí (CcH₂) [17]

Další výhodou nádob uzpůsobených pro tento typ skladování je možnost skladování kapalného H₂ při atmosférickém tlaku či stlačeného plynného H₂ pokojové teploty [16]. Díky tomu je možno doplnit nádrž na různých vodíkových čerpacích stanicích, což by vozidlu s tímto typem nádrže poskytlo výhodu oproti jiným s nádrží pouze na kapalný, nebo stlačený H₂.

Nevýhodou této metody skladování je vyšší výrobní cena nádrže a menší vyspělost technologie oproti zkvalnění či kompresi.

3.1.4 HYDRIDY

Skladování vodíku bez potřeby vysokého tlaku a dosáhnutí energetické hustoty často převyšující kapalný vodík je možné pomocí hydridů: iontových, kovalentních a metalhydridů [1, 6]. Tato forma skladování má oproti výše zmíněným metodám několik výhod. Relativně nízká potřebná teplota a tlak ve vozidlech s palivovým článkem jsou jen některé z těchto výhod. Jedná se také o bezpečnější způsob skladování v porovnání s výše zmíněnými metodami.

Vodík je absorbován do hydridových struktur v pevném skupenství za teploty a tlaku specifických pro daný hydrid. Při této absorpci je uvolňována energie ve formě tepla, je tedy nutné chlazení, např. u slitiny La_{0,85}Ce_{0,15}Ni₅ pomocí Peltierova článku [1]. Pro uvolnění H₂ je pak potřeba dodat stejné množství tepla, jinak by došlo k poklesu tlaku, což by vedlo k zpomalení celého procesu.

Přestože některé hydridy mohou najít uplatnění v automobilním průmyslu, tato metoda je vhodnější pro stacionární aplikaci a oblast energetiky obecně [1].

Pro možnost aplikace daného hydridu v praxi je podmínkou opakovatelnost absorpce a desorpce H_2 .

Problémem skladování H_2 v hydridech je možnost absorpce nečistot, vedoucí k snížení životnosti a omezení kapacity, jelikož tyto nečistoty zaujmou místa, které by normálně zaujímal právě H_2 [15]. Některé hydridy agresivně reagují s vlhkostí obsaženou ve vzduchu, důkladná izolace je tedy u těchto hydridů nutná.

3.2 SKLADOVÁNÍ VELKÉHO MNOŽSTVÍ VODÍKU

Na rozdíl od aplikace na palubě automobilů, stacionární skladování H_2 není tolik limitováno velikostí a potřebou tepelného managementu, tj. systém pro tepelnou regulaci. Hlavním kritériem je co největší energetická hustota skladovaného H_2 při co nejmenších nákladech a při co nejmenších, nejlépe nulových ztrátách.

Kvůli těmto kritériím je skladování ve formě kapalného H_2 , kryo–stlačeného H_2 nebo hydridů vhodnější oproti stlačenému vodíku. Při skladování ve velkém měřítku by náklady na systém pro tepelnou regulaci klesly.

3.2.1 SKLADOVÁNÍ VODÍKU V CHEMICKÉ PODOBĚ

Netradiční možností je skladování H_2 v chemické podobě, kdy je ponechán H_2 ve zdroji či uložen do tohoto zdroje, ze kterého se pak dá H_2 získat. Takovýmto zdrojem je např. methan (CH_4), methanol (CH_3OH) nebo amoniak (NH_3) [12, 15].

Methan je možno z H_2 a oxidů uhlíku vyrobit tzv. metanizací. Přestože infrastruktura zemního plynu, jehož hlavní součástí je CH_4 , je sice velice rozvinutá, pro methan by musela být nejprve celá vytvořena [12]. Jelikož je CH_4 významným skleníkovým plynem, skladování by muselo být kvalitně izolováno, aby, podobně jako u kapalného H_2 , nedocházelo k odpařování. Při získávání vodíku z CH_4 by docházelo k uvolňování dalšího skleníkového plynu, CO_2 , který byl na však vodík navázán právě při metanizaci, nedocházelo by tak k tedy další tvorbě CO_2 , pouze by se vrátil do atmosféry.

Methanol je možno vyrobit exotermickou syntézou H_2 s CO_2 [18]. H_2 je pak možno z methanolu získat tradičními metodami výroby vodíku z fosilních paliv, např. parním reformingem nebo POX, či termolýzou. Kvůli potřebě separace H_2 a CO_2 po výrobě je potřeba další energie.

Oproti tomu NH_3 je možno tvořit bez vzniku CO_2 pomocí Haberova–Boschova procesu (18), při němž se slučuje dusík s vodíkem, za přítomnosti katalyzátoru, vysoké teploty a tlaku, a vzniká amoniak. Energetická hustota kapalného amoniaku je 11,5 MJ/l [12]. Hlavní výhodou využití amoniaku je velice rozšířená infrastruktura a fakt, že na rozdíl od methanolu, který, stejně jako NH_3 , je vyráběn za pomoci zemního plynu, je amoniak možná i vyrábět za pomoci elektrolýzy [18]. H_2 z amoniaku je možno získat skrze palivový článek fungující na stejném principu jako SOE elektrolyzér, spalováním nebo termolýzou, která je prakticky opakem (18). Přestože větší inhalované množství NH_3 může být velice člověku škodlivé, silný přirozený zápach amoniaku upozorní na případný únik.



3.2.2 PODZEMNÍ SKLADOVÁNÍ VODÍKU

Méně známou možností pro skladování opravdu velkého množství stlačeného plynného vodíku je využití podzemních útvarů, tj. solné jeskyně, vyčerpaná ložiska ropy či zemního plynu, opuštěné doly nebo rezervoáry, v nichž se nacházela podzemní voda [19, 20]. Příkladem pak může být uskladnění přes 1 milion m^3 H_2 ve třech solných jeskyních v Teesside ve Velké Británii.

Nevýhodou prázdných ložisek, a zvláště pak vodních rezervoárů, je možnost reakce H_2 s mikroorganismy či minerály v těchto útvarech [20]. Tyto reakce pak mohou vést k úbytku vodíku či degradaci stěn těchto útvarů. V případě solných jeskyň toto nebezpečí nehrozí, jelikož soli jsou vůči vodíku inertní a navíc plynotěsné. Díky tomu jsou solné jeskyně příznivé k využití jako podzemní zařízení pro uskladnění H_2 .

Tato metoda uskladnění byla již otestována ve Velké Británii (v roce 1972) či USA (v letech 1983 a 2008), kde bylo dokázáno bezpečné uskladnění H_2 touto metodou po delší časové období [19].

Kvůli pečlivému výběru útvaru s požadovanými geologickými vlastnostmi, nutné úpravě těchto útvarů a nedostatku zkušeností s touto metodou je nutno dalších komplexních výzkumů v této oblasti před tím, než se podzemní skladování H_2 stane dostupnou a technicky možnou metodou [19]. Také bude nutné zhodnocení možných nebezpečí plynoucích z této metody skladování.

3.3 PŘEPRAVA A DISTRIBUCE VODÍKU

Doprava H_2 je potřebná všude tam, kde není možno pro danou čerpací stanici nebo jinou aplikaci vyrábět vodík přímo na místě, např. velká čerpací stanice v místě dopravního uzlu s požadavky až 1000 kg za den. Nejpravděpodobnějšími způsoby přepravy v budoucnu budou: přeprava stlačeného H_2 kamiony, kapalného H_2 kamiony a potrubím.

Nejnižší cena dopravy závisí na vzdálenosti a množství dopravovaného H_2 [21].

3.3.1 PŘEPRAVA VODÍKU

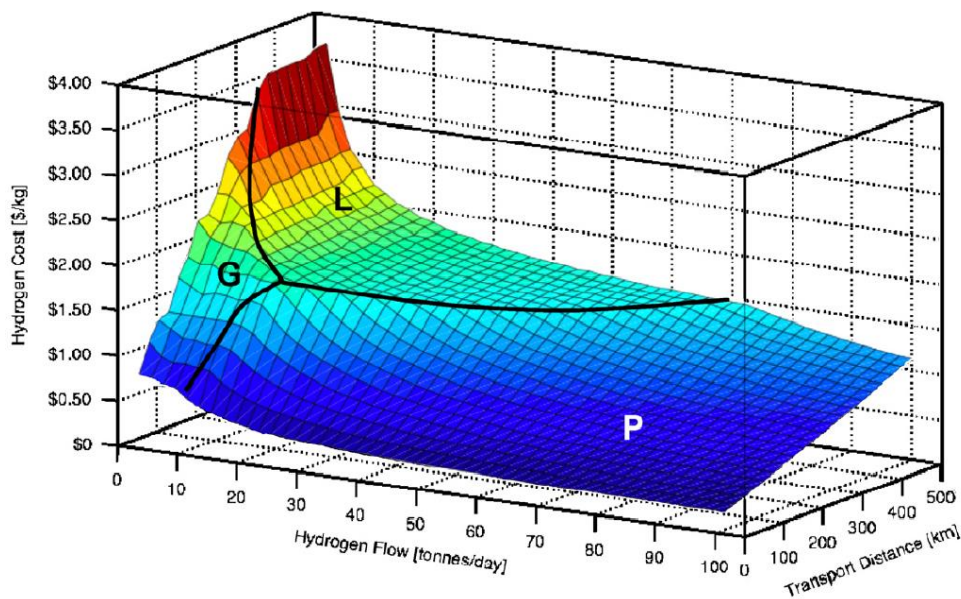
Z obr. 7 lze vyčíst vhodnou metodu dopravy pro co nejnižší náklady v závislosti na dopravovaném množství a vzdálenosti.

Distribuce stlačeného H_2 pomocí kamionů je vhodná pro přepravu malých množství (až 400 kg na kamion) na krátké vzdálenosti pro nízké pořizovací náklady [21, 22, 23]. Díky tomu se hodí pro počáteční fázi vývoje distribuční sítě vodíku, kdy poptávka i nabídka jsou omezeny. Využití tohoto způsobu přepravy zamezí ztrátám odpouštěním, které vznikají u kapalného H_2 . Cena tohoto způsobu přepravy roste lineárně se vzdáleností [21].

Přeprava kapalného vodíku je vhodná pro větší dopravované množství a dlouhé vzdálenosti, tedy v případě rostoucí sítě k pokrytí poptávky, jelikož je schopna přepravit větší množství H_2 na kamion než v případě stlačeného H_2 a ztráty odpouštěním jsou již zanedbatelnější [21, 22]. Kromě kamionů by mohl být kapalným H_2 dopravován vlaky nebo loďmi v případě mezinárodní dopravy, např. mezi Kanadou a Německem v rámci konceptu pilotního projektu, kdy by tanker mohl nést 5 kryogenních nádob, kdy každá by mohla pojmout 210 tun kapalného H_2 [24]. Hlavním faktorem ovlivňující cenu tohoto způsobu je zkapalnění vodíku,

jelikož cena elektřiny na zkapalnění tvoří 30 – 60 % provozních nákladů [21, 22]. S vyšším množstvím pak cena klesá.

Dodávání vodíkovodem, využíváno již přes 50 let, je pak řešením pro dopravu velkého množství (až 100 000 kg/h) do oblastí s vysokou poptávkou [23]. V současnosti je na celém světě cca 16 000 km potrubí dodávající H_2 do rafinérií a chemických továren. Husté síť se nachází např. mezi Belgií, Francií a Nizozemím, v Porúří v Německu či v oblasti Mexického zálivu v USA [22]. Rozšíření této metody poroste až v pozdějších fázích vzniku distribuční sítě H_2 , jelikož se jedná o způsob dopravy s vysokými počátečními náklady [21, 22]. Aktuálním problémem je, že vybudování 1 km vodíkovodu je o 10 % dražší než 1 km potrubí pro zemní plyn [1]. Výrazný rozdíl je i v množství přenesené energie, kdy vodíkovod se stejným průměrem pojme o 30 % méně energie než plynovod.



Obr. 7 Nejnižší cena přepravy H_2 jako funkce dopravovaného množství a vzdáleností [21]

Hydrogen Cost [\$/kg] – cena H_2 [\$/kg]

Hydrogen Flow [tonnes/day] – Množství dopravovaného H_2 [tun/den]

Transport Distance [km] – vzdálenost dopravy H_2

G – doprava stlačeného H_2

L – doprava kapalného H_2

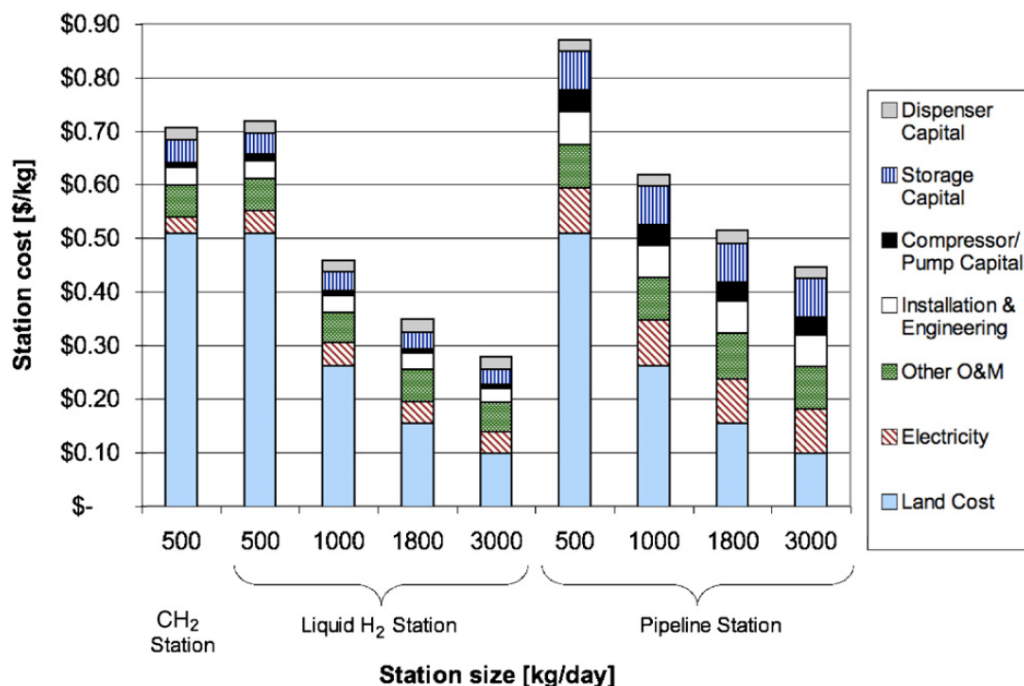
P – doprava vodíkovodem

3.3.2 ČERPACÍ STANICE

Dnes je na území České republiky v provozu pouze jedna čerpací stanice na stlačený vodík, s plnicím tlakem 350 bar, a to v Neratovicích, zřízená pro projekt vodíkového autobusu TriHyBus. Naplánovaných je dalších 5, v Brně, Praze, Ústí nad Labem, Plzni a v Litvínově [25, 26]. Všechny pouze na stlačený H_2 , a to jak na 350 bar, tak i 700 bar.

Cena H_2 čerpaného na stanici se může výrazně lišit podle druhu a velikosti dané stanice, jak je vidět na obr. 8. S rostoucí velikostí čerpací stanice klesá cena za kg H_2 . Cena samotné stanice se v současnosti pohybuje mezi 910 tisíc – 4,6 milionů \$ [27]. Vstupní náklady jsou větší u stanic s větší kapacitou nebo u stanic, které jsou schopny vyrábět H_2 na místě. Cena na provoz a údržbu se také odvíjí od velikosti a typu stanice, pro stanici na stlačený H_2 s kapacitou

500 kg denně cca 108 tisíc \$ ročně, pro stanici na kapalná H₂ s kapacitou 500, 1000, 1800 a 3000 kg denně cca 111, 131, 168 a 212 tisíc \$ ročně. Pro stanici zásobovanou vodíkovodem s kapacitou 500, 1000, 1800 a 3000 kg denně cca 130, 149, 201 a 155 tisíc \$ ročně [21]. Čerpacích stanic s kapacitou přesahující 1000 kg denně však ani v pozdějších fázích vývoje distribuční sítě nebude mnoho a budou se nacházet na důležitých dopravních uzlech.



Obr. 8 Porovnání ceny H₂ a její složky v závislosti na velikosti a druhu čerpací stanice [21]

Station cost [\$ /kg] – náklady na stanici [\$ /kg]

Station size [kg/day] – velikost stanice [kg/den]

CH₂, resp. Liquid H₂, resp. Pipeline Station – stanice s dodávkou stlačeného H₂, resp. kapalného H₂, resp. vodíkovodem

Compressor/ Pump Capital – vstupní náklady kompresoru/pumpy

Land cost – cena pozemku

Electricity – cena elektrina

Other O&M – cena provozu a údržby

Installation & Engineering – cena instalace

Storage Capital – náklady na uskladnění

Dispenser Capital – náklady na dávkovač

Důležitá vlastnost čerpací stanice je rychlost tankování. Průměrná doba čerpání je 3,6 minut s průměrnou hmotností načerpaného H₂ 2,9 kg, tj. 0,805 kg/min, v případě stanic s tlakem 70 MPa je průměrná rychlost čerpání 0,84 kg/min [27]. Skutečnost, že doba tankování H₂ se pohybuje v řádu minut, výrazně zvyšuje atraktivitu tohoto paliva. V budoucnu je více než pravděpodobné, že doba čerpání se ještě více přiblíží dobám čerpání fosilních paliv.

Při rychlosti čerpání vodíku 0,805 kg/min a uvážení výhřevnosti 120 MJ/kg (viz. kapitola 1) se jedná o energetický průtok 96,6 MJ/min, tj. 26,83 kWh/min, při 0,84 kg/min se pak jedná o energetický průtok 100,8 MJ/min, tj. 28 kWh/min. Firma Tesla u svých nabíjecích stanic Supercharger pro elektromobily udává maximální rychlost nabíjení 250 kW, tj. 4,17 kWh/min [28]. Energetický průtok při čerpání vodíku je tedy více než šestkrát větší oproti rychlonabíjecím stanicím, oproti běžným nabíjecím stanicím je to pak ještě více.

3.4 SHRNUÍ SKLADOVÁNÍ A PŘEPRAVY VODÍKU

V této kapitole jsou popsány metody skladování a distribuce vodíku. Uskladnění H_2 na palubě vozidla je možné v tlakových nádobách, v kapalně formě, kryo-kompresí či ve formě hydridů. Velké množství H_2 je pak možné kromě výše zmíněných metod skladovat v chemické podobě (např. NH_3) či ve vhodně upravených přírodních podzemních rezervoárech. Samotná přeprava je možná v tlakových nádobách v plynném stavu, v kapalném stavu či vodíkovodem. V příloze P1 jsou pak tyto metody porovnány [23]. Na konci této kapitoly je popsán současný stav čerpacích stanic v ČR a podíl nákladů na ceně H_2 .

Pro rozvoj dostupnosti vodíkových vozidel jsou rozvoj distribuce a skladování kriticky důležité. Některé zdroje zmiňují tzv. „slepice – vejce“ paradox [1, 24]. Podle tohoto paradoxu není možné počítat s větším počtem vozidel s vodíkovým pohonem bez dostatečné infrastruktury. Tato infrastruktura však se nebude rozvíjet a budovat, pokud pro ni nebude využití. Řešením pak mohou být užší spolupráce mezi automobilkami a vládami, cílené dotace a další činnost organizací jako FCH JU (Fuel cells and hydrogen joint undertaking).



4 VODÍK U VOZIDEL NAD 3,5 T

Automobily nad 3,5 t (autobusy, nákladní vozy, tahače atd.) je možné vodíkem pohánět dvěma způsoby: spalováním ve spalovacím motoru či přeměnou na elektřinu v palivových článcích. V současnosti velké množství automobilek provádí výzkum a vývoj vlastních vozidel, např. Tatra [29]. Některé již nabízejí první modely svých vozidel, např. Hyundai či Hyzon [30, 31].

4.1 VODÍK JAKO PALIVO VE SPALOVACÍCH MOTORECH

Drtivá většina vozidel nad 3,5 tuny využívá vznětový motor pracující dle Dieselova cyklu. Vznětové motory obecně dosahují maximálního výkonu a maximálního točivého momentu při nižších otáčkách, díky vyššímu kompresnímu poměru dosahuje vyšší účinnosti při nižších teplotách. Pro tyto vlastnosti jsou vznětové motory primárně využívány pro pohon vozidel nad 3,5 t.

4.1.1 PRACOVNÍ CYKLUS VZNĚTOVÉHO MOTORU

Pracovní cyklus tohoto typu čtyřdobého motoru je složen ze sání, komprese, expanze a výfuku. K těmto čtyřem fázím dojde během dvou otočení klikového hřídele.

Píst se při sání pohybuje k dolní úvrati (DÚ) a nasává vzduch sacím ventilem (SV), který se otevře předtím, než píst dorazí k horní úvrati (HÚ). Tento předstih činí několik stupňů úhlu otočení klikového hřídele (KH). SV se zavírá až několik stupňů otočení KH po překonání DÚ, kdy dochází ke kompresi vzduchu ve válci. Krátce před dosažením HÚ je do válce vstříknuto palivo a dojde k samovznícení vytvořené směsi. Vznícením směsi a jejím hořením ve válci narůstá tlak a teplota, rozpínající se plyny tlačí píst do DÚ, píst přes ojnici otáčí KH, který dále pohání pomocná zařízení a pohonné ústrojí. Výfukový ventil (VV) je otevřen ještě před DÚ, při pohybu do HÚ je výfukový, tj. shořený, plyn vytlačen z válce a VV se zavírá krátce po překročení HÚ. SV je otevřen těsně před HÚ, znovu dochází k sání vzduchu a cyklus se opakuje [32].

4.1.2 ZMĚNY VLIVEM POUŽITÍ VODÍKU JAKO PALIVA

Vlivem vysoké teploty samovznícení H_2 je při spalování ve vznětovém motoru potřeba vysoký kompresní poměr. Kompresní poměr je definován jako

$$\varepsilon = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{V_z + V_k}{V_k} \quad (19)$$

kde V_k je objem prostoru na spalovací straně pístu v HÚ, V_z je zdvihový objem motoru, který je definován jako

$$V_z = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot z \cdot i_v \quad (20)$$

kde d je vrtání válce, tj. jmenovitý vnitřní průměr pracovního válce, z je zdvih pístu, tj. vzdálenost mezi HÚ a DÚ a i_v je počet válců motoru [33].

Nepřímé spalování v předkomůrce s vhodnou geometrií je možné řešení, při kterém se palivo zažehne prouděním, tzv. jet ignition [34]. V takovémto motoru předkomůrka nahradí žhavicí svíčku a klasická vstříkovací tryska je nahrazena tryskou uzpůsobenou pro vstříkování

vodíku. Tato tryska, zvláště pak u motorů s velkým objemem, musí být navržena tak, aby byla schopna vstříknout patřičný objem vodíku, jak do předkomůrky, tak do válce, během daného časového intervalu. Při simulaci přeplňovaného 12,8l kamionového motoru využívající výše zmíněnou předkomůrku byl naměřen vyšší střední efektivní tlak při spalování vodíku než při spalování nafty [34].

Střední efektivní tlak je definován jako

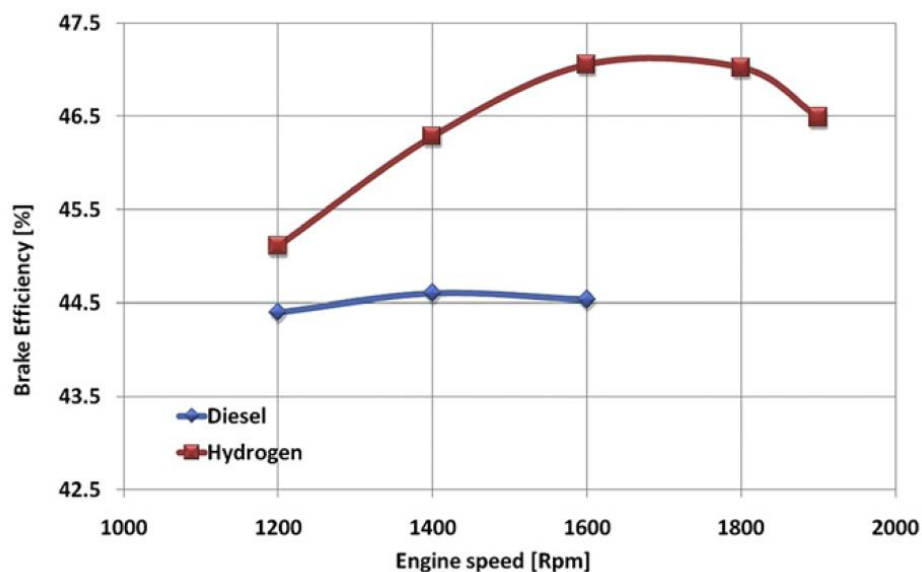
$$p_e = p_i - p_m \quad (21)$$

kde p_i je střední indikovaný tlak a p_m je střední tlak mechanických ztrát, který je podle SAE norem ztrátový výkon z mechanického tření hnací jednotky a hydraulických ztrát ve klikové skříni. Střední indikovaný tlak je pak definován jako

$$p_i = \frac{W_i}{V_z} \quad (22)$$

kde W_i je vykonaná práce během jednoho cyklu [35].

Při stejném p_e má vodík navíc větší účinnost, jak je patrné z obr. 9 [34].



Obr. 9 Účinnost motoru při p_e 25 bar při spalování vodíku a nafty [34]

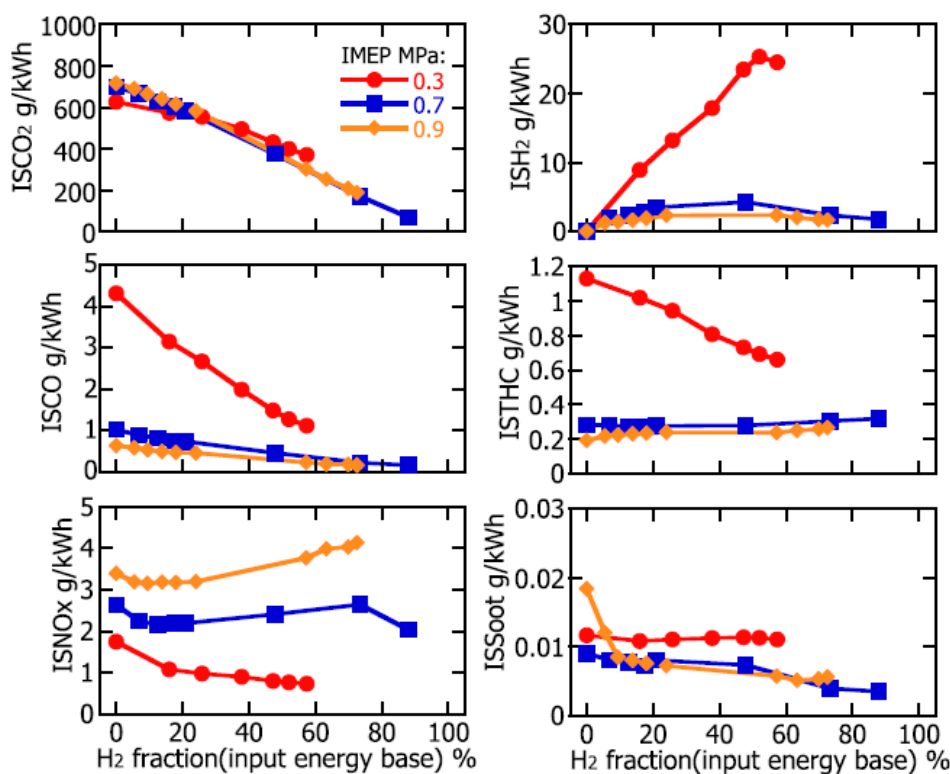
Engine speed [rpm] – otáčky motoru [min^{-1}]

Brake Efficiency [%] – efektivní účinnost [%]

Hydrogen – vodík

Diesel – nafta

V případě nepřímého vstřikování vodíku, ať již pomocí karburátoru nebo vstříkem do sacího potrubí těsně před SV, nebo přímého vstřikování bez předkomůrky je k samovznícení nutno vstříknutí nafty, jelikož samotný vodík by se nevznítil [3, 5]. V takovém případě se jedná o dvoupalivový motor. Přestože tato možnost obecně zlepšuje vlastnosti motoru, tj. zvyšuje výkon, snižuje emise CO_2 a CO , jak je patrné z obr. 10, atd., přináší toto řešení řadu nevýhod.



Obr. 10 Emise jednotlivých složek ve výfukových plynech v závislosti na množství H_2 [36]

H_2 fraction (input energy base) % – podíl H_2 (ze vstupní energie) v %

IMEP MPa – p_i v MPa

$ISCO_2$ g/kWh – množství CO_2 ve výfukových plynech v g/kWh

$ISCO$ g/kWh – množství CO ve výfukových plynech v g/kWh

$ISNO_x$ g/kWh – množství NO_x ve výfukových plynech v g/kWh

ISH_2 g/kWh – množství neshořelého H_2 ve výfukových plynech v g/kWh

$ISTHC$ g/kWh – množství všech uhlovodíků (HC) ve výfukových plynech v g/kWh

$ISSoot$ g/kWh – množství sazí ve výfukových plynech v g/kWh

Kromě složitější logistiky zajištění přísunu dvou paliv místo jednoho je nevýhodou také zvýšení emisí NO_x oproti konvenčnímu vznětovému motoru [36]. Problémem nepřímého vstřikování vodíku je pak riziko předčasného zažehnutí směsi, tzv. pre-ignition, a zášlehu plamene do sacího potrubí, tzv. backfire [3, 5]. K předčasnému zažehnutí dochází během komprese, kdy je SV zavřený, backfire nastává pouze v případě, kdy k předčasnému zážehu dojde ještě před uzavřením SV. Dalším výrazným rizikem vodíkových motorů vlivem nízké potřebné energie k samovznícení je také klepání motoru, tj. spontánní samovznícení paliva v jiný než určený okamžik vlivem lokálně zvýšených teplot.

Backfire a jeho vznik je možno potlačit optimalizací časování vstřiku vodíku, zvýšením vstupního tlaku, tedy přeplňováním, či snížením času, kdy je zároveň otevřený SV i VV, jelikož i horké výfukové plyny mohou způsobit zášleh plamene do sacího potrubí [37].

Další možností ke spalování vodíku je využití zážehového motoru pracujícího podle Ottova cyklu. Pracovní cyklus zážehového motoru se od motoru vznětového liší tím, že palivo je vstřikováno do válce v případě přímého vstřikování již během sání a výsledná směs je

na konci komprese zapálena zapalovací svíčkou [32]. Vodík je díky svým unikátním vlastnostem uvedených v kapitole 1 více než vhodným palivem pro zážehový motor, ať již samotný, nebo v doupalivovém motoru [3, 5]. Zážehový motor avšak není vhodný k pohonu vozidel nad 3,5 t z již dříve uvedených důvodů.

4.2 VODÍK JAKO PALIVO V PALIVOVÝCH ČLÁNCÍCH

Zatímco vozidla se spalovacím motorem na vodíkový pohon jsou pouze ve fázi prototypů, FCEV (Fuel cell electric vehicle), tedy vozidla s palivovým článkem, a to i ta nákladní, jsou komerčně dostupná. Hlavními výhodami palivových článků oproti spalovacím motorům jsou vyšší účinnost a nulové emise [38].

4.2.1 PRINCIP FUNKCE PALIVOVÉHO ČLÁNKU

Palivový článek je zařízení, v němž na základě elektrochemických procesů dochází k přímě přeměně vnitřní energie na elektrickou [39]. Na rozdíl od baterií netvoří anodu a katodu aktivní chemické prvky, ale jsou tyto prvky přiváděny k elektrodám průběžně zvnějšku. Obě elektrody působí jako katalyzátor chemických přeměn, během činnosti se téměř neopotřebovávají a jejich chemické složení se nemění.

Základními prvky palivového článku jsou dvě elektrody a elektrolyt. Jejich struktura závisí na použitém palivu.

Na anodu, záporně nabitou elektrodu, označovanou jako palivová, se přivádí aktivní látka – palivo. Palivo na anodě oxiduje, což znamená, že atomy se zbavují valenčních elektronů. Uvolněné elektrony tvořící elektrický proud se vnějším obvodem přemístí ke katodě, kladně nabitě elektrodě. Na katodě pak s přiváděným oksyličovadlem probíhá redukce, oksyličovadlo tedy volné elektrony přijímá a současně reaguje s kladnými ionty, které ke katodě pronikají elektrolytem. V případě přerušení vnějšího obvodu se zátěží, probíhající chemické reakce okamžitě ustanou. Výsledkem reakce je v závislosti na teplotě článku voda či vodní pára.

V současné době nejrozšířenějším palivovým článkem v elektromobilitě je díky svým vlastnostem typ PEM (Proton exchange membrane), pracující na opačném principu PEM elektrolyzáru, popsaném v kapitole 2.2.1.

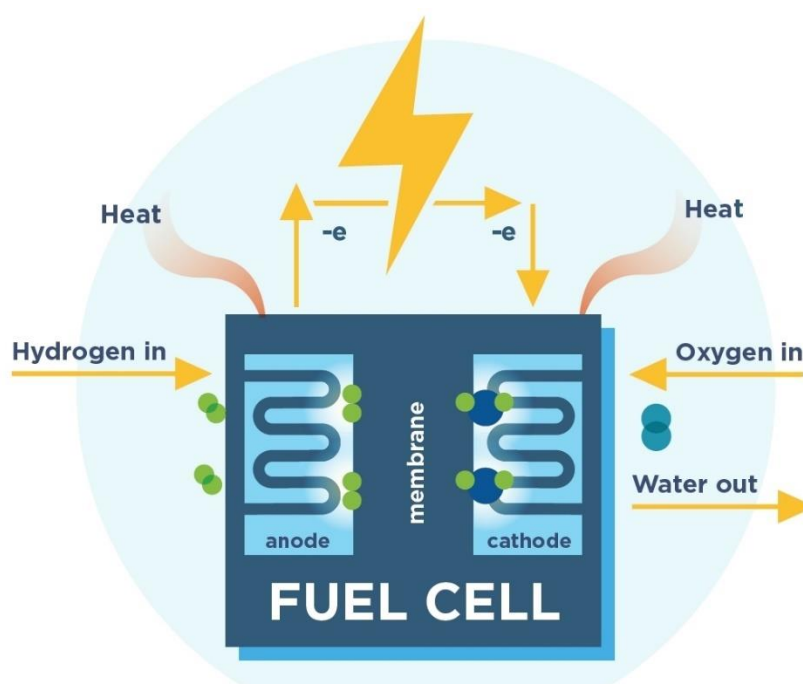
4.2.2 PALIVOVÝ ČLÁNEK TYPU PEM

Na obr. 11 je vidět zjednodušené schéma PEM palivového článku. Základ článku tvoří membrána z polymerů nepropouštějící plyny, pouze protony. Tato membrána fungující jako elektrolyt článku je stlačena mezi dvě porézní elektrody, vyrobeny z uhlíkové tkaniny nebo grafitického papíru. Na rozhraní elektrod a membrány se nachází vrstva katalytických částic, typicky platina [40]. K reakcím dochází na rozhraní elektrod a membrány. Vodík je přiváděn na anodu, kde se rozkládá na protony a elektrony, tedy oxiduje (23). Protony skrze membránu putují ke katodě, elektrony přes elektrodu do vnějšího obvodu generující elektrický proud, a ke katodě. Na katodě se sloučí protony s přiváděným kyslíkem a elektrony, vzniká voda, dochází tedy k redukci (24) [39]. Vzniklá voda je následně odvedena s přebytkem přivedeného kyslíku [40].





Díky nízké provozní teplotě (70 – 80 °C) má článek dostatečně rychlý náběh a není nutné tepelné odstínění z důvodu ochrany obsluhy, v případě aplikace ve vozidle pasažérů [39]. Účinnost článku je 40 – 60 % a je schopen dobře a rychle zvládat velké a náhlé změny výstupního výkonu [38]. Pro tyto vlastnosti je PEM článek právě využíván v automobilní dopravě.



Obr. 11 Schéma PEM palivového článku [41]

Hydrogen in – přísun vodíku

e⁻ – elektrony

Membrane – membrána

Oxygen in – přísun kyslíku

Heat – teplo

Anode – anoda

Cathode – katoda

Water out – odvod vody

4.3 POROVNÁNÍ SPALOVÁNÍ VODÍKU A JINÝCH PALIV V ZÁŽEHOVÉM MOTORU POMOCÍ SIMULACE SKRIPTEM V MATLABU

Pracovní cyklus zážehového motoru je stejně jako cyklus vznětového motoru složen ze sání, komprese, expanze a výfuku. Liší se však tím, že během sání je spolu se vzduchem do válce přivedeno palivo, tato směs je pak následně stlačena a zažehnuta jiskrou, nikoli samovznícením paliva.

Ideální cyklus zážehového motoru je Ottův cyklus, skládající se z adiabatické komprese, izochorického spalování, adiabatické expanze a izochorického výfuku. V příloze P2, skriptech v programu MATLAB poskytnutých vedoucím této bakalářské práce, profesorem Štětinou, je pro porovnání vodíku s ostatními palivy využit motor s následujícími parametry:

- vrtání válce: 120 mm,
- zdvih: 140 mm,
- objem válce: 1 l,
- počet válců: 8,
- otáčky motoru: 1100 min⁻¹.

Ve skriptech jsou porovnány následující paliva: vodík, benzín a methan jakožto zástupce CNG. Motory podle paliva se různí kompresním poměrem. Pro jednotlivé je kompresní poměr

- benzín: 10,5,
- methan: 12,
- vodík: 12.

Paliva se liší i poměrem vzduch palivo

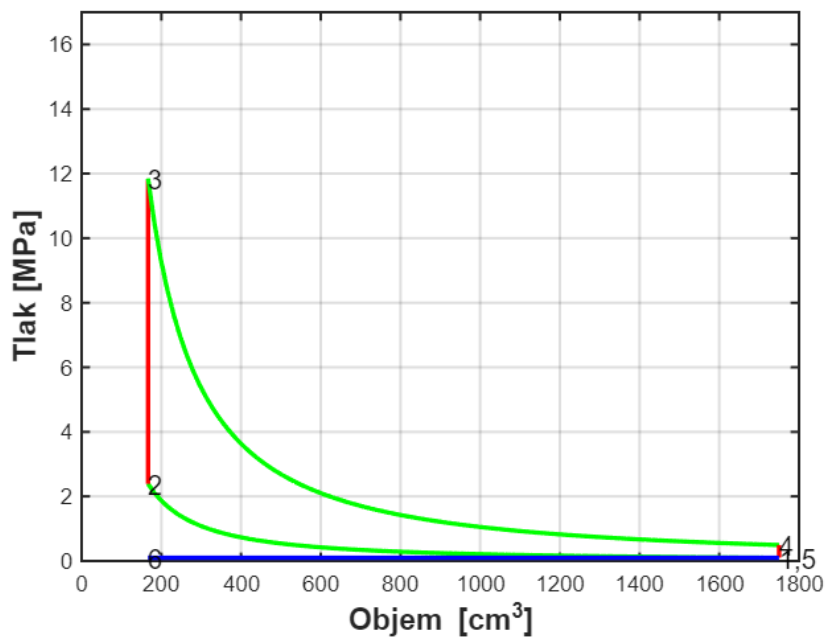
- benzín: 14,56 %,
- methan: 14,56 %,
- vodík: 35 %.

U benzínu nebylo počítáno s vnitřní recirkulací spalin, stejně tak ani u methanu či vodíku.

Pro každé z paliv pro posouzení byli vybrány následující parametry: maximální teplota v cyklu, maximální tlak v cyklu, střední efektivní tlak, efektivní výkon, točivý moment, měrná efektivní spotřeba paliva a termická účinnost. Níže jsou uvedeny spolu s výsledky jednotlivých parametrů také p-V diagramy (obr. 12, 13, 14).

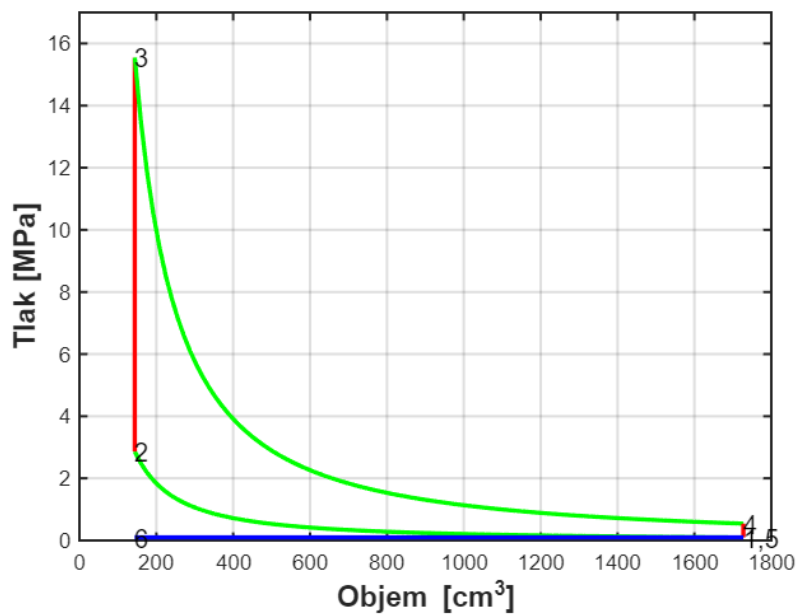
Tab. 4 Porovnání výsledných parametrů zážehového motoru v závislosti na druhu paliva

Parametr	Jednotka	Benzín	Methan	Vodík
Maximální teplota v cyklu	[°C]	3486,9	4043,4	4146,7
Maximální tlak v cyklu	[MPa]	11,9	15,6	15,9
Střední efektivní tlak	[MPa]	1,4	1,7	1,7
Efektivní výkon	[kW]	159,5	191,4	197
Točivý moment	[N.m]	1385	1661,2	1710
Měrná efektivní spotřeba	[g.kW ⁻¹ .h ⁻¹]	194,7	160,2	67,3
Termická účinnost	[%]	56,1	58,1	58,1

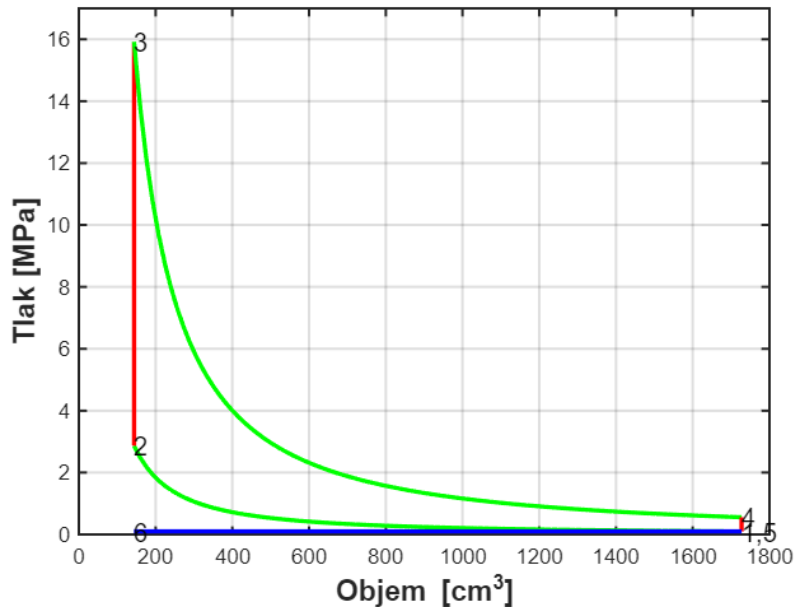


Obr. 12 p-V diagram pracovního cyklu zážehového motoru spalujícího benzín

Děj 1-2 v pracovních cyklech je adiabatická komprese, děj 2-3 izochorické spalování, děj 3-4 adiabatická expanze, děj 4-1 izochorický výfuk a děj 5-6 pak sání či výfuk.



Obr. 13 p-V diagram pracovního cyklu zážehového motoru spalujícího methan



Obr. 14 p-V diagram pracovního cyklu zážehového motoru spalujícího vodík

Z diagramů a posuzovaných parametrů je zřejmé, že z čistě teoretického hlediska ideálního cyklu je vodík lepším palivem než methan a výrazně lepším než benzín.

4.4 VOZIDLA NAD 3,5T S VODÍKOVÝM POHONEM

Jelikož v současnosti nejsou vozidla s vodíkovým pohonem se spalovacím motorem komerčně dostupná a není jisté, zda-li vůbec někdy budou, jsou v této podkapitole popsána pouze komerčně dostupná vozidla využívající palivový článek.

4.4.1 AUTOBUSY

Autobusy s palivovými články mají běžný autobusový podvozek. Obsahují elektromotor, tlakové nádoby se stlačeným vodíkem, palivový článek, baterie nebo ultrakapacitor sloužící jako krátkodobý akumulční prvek [42]. V provozu tyto autobusy fungují stejně jako autobusy elektrické, mají však obecně větší dojezd a životnost, navíc se očekává nižší nutnost údržby oproti konvenčním dieselovým autobusům.

Ukázkovým příkladem autobusu s vodíkovým pohonem je český TriHyBus (obr. 15) [43]. Tento autobus využívá palivový článek o výkonu 50 kW, 68Ah lithium-iontový akumulátor pro podporu článku a k rekuperaci energie a několik ultrakapacitorů pro náhlé výkyvy výkonu při akceleraci a brždění. Trihybus má cca 20 kg H_2 uloženo při tlaku 35 MPa v tlakových nádobách a se spotřebou 7 až 8 kg H_2 na 100 km je jeho dojezd zhruba 300 km [26].



Obr. 15 TriHyBus a čerpací stanice v Neratovicích [43]

Mezi výrobce vodíkových autobusů patří např. Solaris s modelem Urbino 12 hydrogen, Van Hool s modelem A330 Fuel Cell, Alexander Dennis anebo Hyzon s modelem High-Floor Coach [31, 44, 45, 46].

4.4.2 NÁKLADNÍ VOZY A TAHAČE

Vodíkové nákladní vozy a tahače dnes dostupné využívají stejně jako vodíkové autobusy elektromotor, tlakové nádoby se stlačeným vodíkem, palivový článok, baterie nebo ultrakapacitor. Jejich výhodou oproti dostupným nákladním vozům s elektrickým pohonem je vyšší dojezd a kratší doba čerpání oproti potřebnému času k nabytí baterií.

Mezi výrobce vodíkových nákladních vozů patří např. Hyundai s modelem Hyundai XCIENT Fuel Cell či Hyzon se serií HyMax na obr.16 a modelem Class 8 [30, 31].



Obr. 16 Hyzon série HyMax [31]

4.5 POROVNÁNÍ VOZIDEL NA VODÍKOVÝ POHON S KONVENČNÍMI VOZIDLY

Vozidla s vodíkovým pohonem je možné porovnávat s konkurenčními vozy dle dvou hlavních kritérií: ekonomického a ekologického hlediska.

4.5.1 POROVNÁNÍ Z EKONOMICKÉHO HLEDISKA

Ekonomické porovnání kromě pořizovací ceny zohledňuje též cenu paliva a provozu, oprav a údržby. Některé studie též do nákladu uvažují potřebnou infrastrukturu.

V tab. 5 jsou porovnány náklady provozu 12m autobusu s životností 15 let, typickým denním provozem 200 km a celkovým nájezdem 900 000 km za dobu životnosti [42]. V modelu jsou posuzovány náklady investiční čili pořizovací, údržbové a provozní, což primárně zahrnuje cenu paliva. Výsledky modelovaného provozu autobusu jsou také na obr. 17, na kterém jsou provozní náklady vztaženy na 1 km.

Dle výsledků jsou z čistě ekonomického hlediska výrazně výhodnější autobusy diesellové či na CNG. Kvůli stále rostoucím emisním požadavkům je však provoz spalovacích motorů v budoucnu nejistý, obzvlášť pak na fosilní paliva, více však v kapitole 4.4.2. V současnosti BEV autobus (Battery electric vehicle), tedy elektrický autobus poháněn pouze bateriemi, má kratší dojezd a není schopen plnit denní požadavky. Pokud není během dne dobíjen. FCEV autobus pak vyžaduje plnicí stanici, což v tab. 5 je zohledněno ve výsledné ceně vodíku.

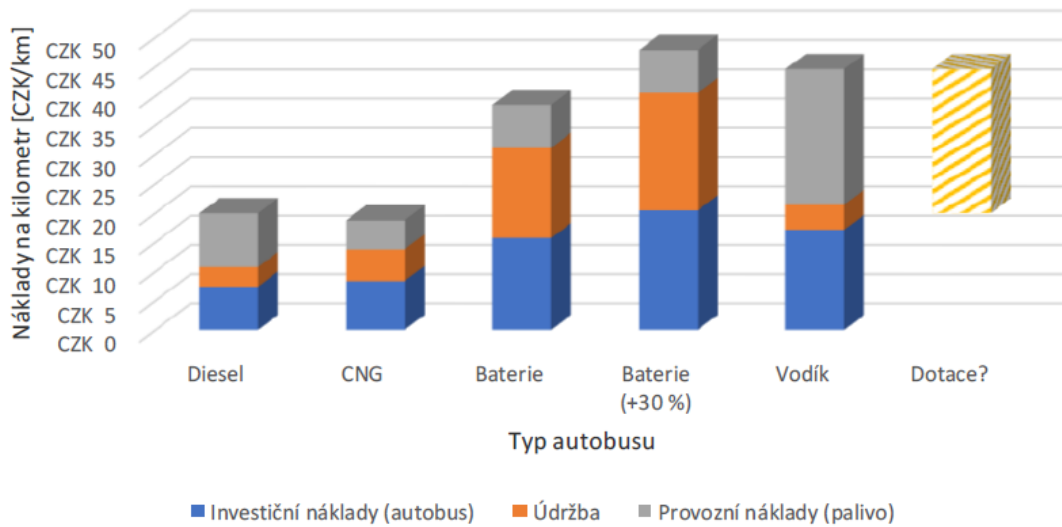
Tab. 5 Porovnání autobusů s různými pohony dle paliva, upraveno [42]

Technologie pohonu	Diesel	CNG	Baterie (BEV)	Vodík (FCEV)
Investiční náklady	260 000 €	293 000 €	550 000 € Bude klesat	600 000 € Bude klesat
Dodatečné náklady způsobené dlouhým dobíjením	-	-	+30 % za ekvivalentní denní dopravní výkon	-
Údržba	0,13 €/km 7800 €/rok	0,21 €/km 12 600 €/km	0,6 €/km 36 000 €/rok	0,17 €/km 10 000 €/rok
Cena paliva v 2019	0,95 €/l Bude růst	0,4 €/kg Bude růst	0,2 €/kWh	10 €/kg Bude klesat
Typická spotřeba paliva	37,6 l/ 100 km	48 kg/ 100 km	142 kWh/ 100 km	9 kg/ 100 km
Cena paliva na 100 km	35,7 €	19,2 €	28,4 €	90 €
Celková cena paliva za dobu životnosti autobusu (900 000 km)	321 000 €	173 000 €	255 000 €	810 000 €

Jak z tab. 5, tak z obr. 17 jasně vyplývá, že náklady na provoz FCEV autobusu jsou ve srovnání s autobusy dieselovými a na CNG prakticky dvojnásobné. V případě zohlednění dodatečných nákladů při provozu BEV autobusů, což značí další autobusy pro pokrytí požadovaného provozu a časy nabíjení, jsou celkové náklady srovnatelné s FCEV autobusy [42].

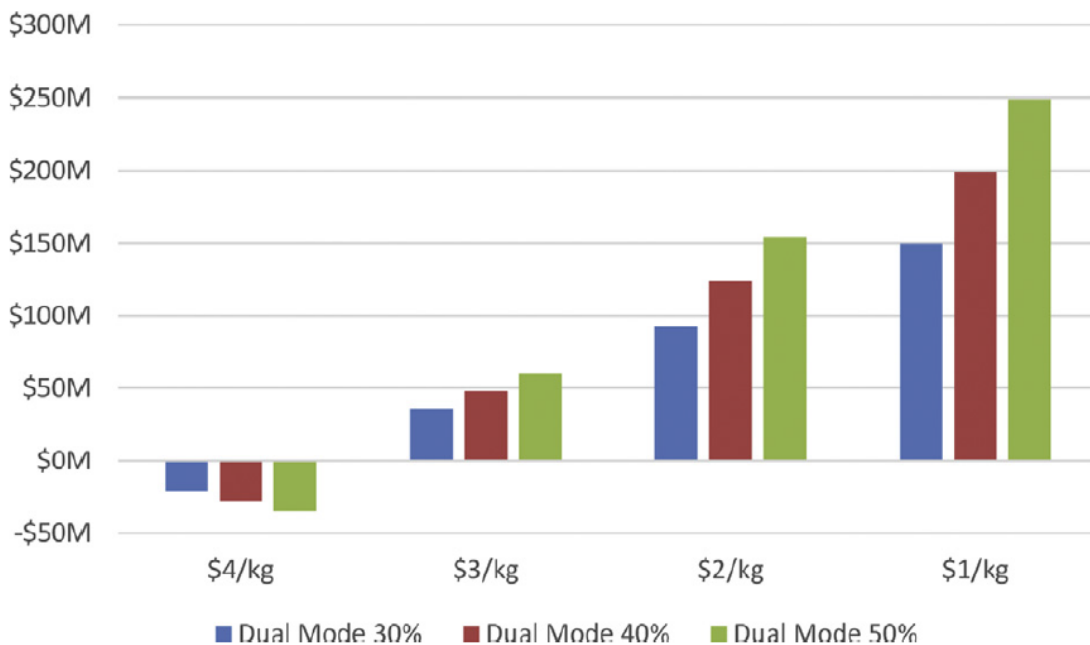
Kanadský model flotily 200 dvoupalivových kamionů s životností 20 let a ročním nájedem cca 290 000 km s různým podílem vodíku ve směsi umožňuje však pozorovat ekonomické úspory provozu, jak je patrné z obr. 18 [47]. Pro účely modelu byla uvažována cena nafty 1,09 \$/l, pro jednotlivé scénáře se cena vodíku pohybuje v rozmezí 1 – 4 \$/kg a uvažuje se s využíváním vodíku z odpadních surovin. Cena přestavby dieselových kamionů na dvoupalivový systém je studií zanedbána, vzhledem k faktu, že 77 % celkových nákladů plyne z paliva, cena údržby a oprav je uvažována stejná jako u konvenčních kamionů [47].

Přehled nákladů dle typu autobusu



Obr. 17 Přehled nákladů 12m autobusu na kilometr [42]

Jak je z obr. 18 patrné, plynoucí úspora není primárně závislá na podílu H_2 ve směsi, ale na ceně H_2 , s tím, že už jen rozdíl mezi 4 a 3 $\$/kg$ představuje výrazný rozdíl mezi ztrátou a úsporou. Cena H_2 pro návratnost investice by měla být menší než 3,6 $\$/kg$ [47]. V případě prakticky stejné ceny nafty a H_2 by pak úspora byla 150 – 250 miliónů $\$$.

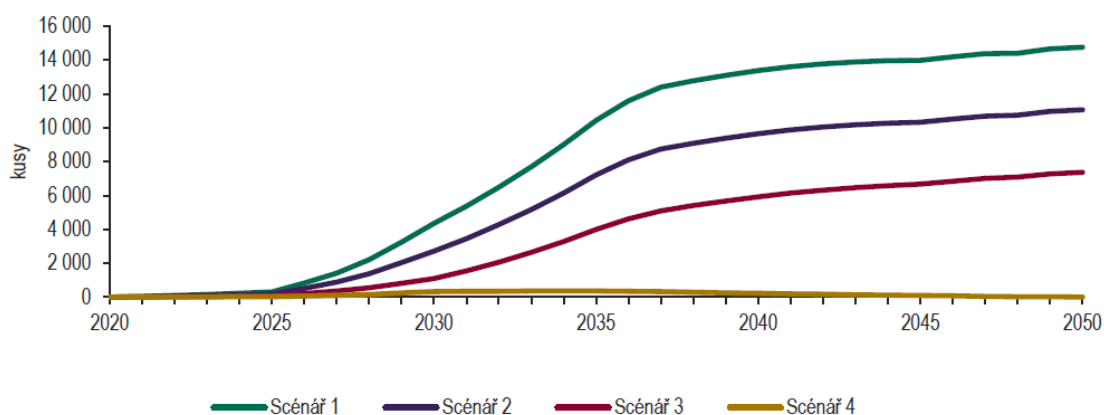
Obr. 18 Celková úspora v jednotlivých scénářích cen H_2 s uvážením podílu H_2 ve směsi [47]

$\$M$ – celková úspora v milionech kanadských dolarů

$\$4$ – $1/kg$ – cena vodíku na kilo v jednotlivých scénářích

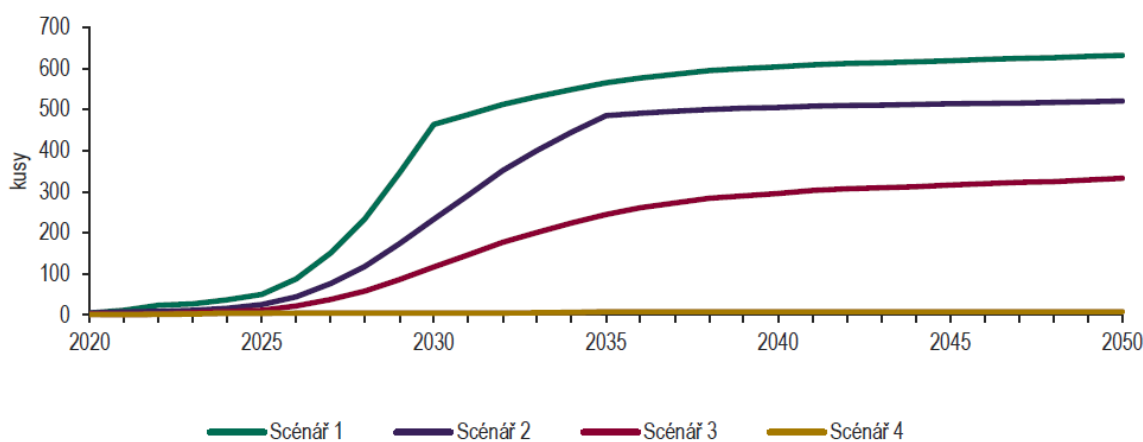
Dual mode 30 – 50 % – procentuální podíl vodíku ve směsi

Úspěchy a rozšíření vodíkových vozidel v ČR jsou spjaty se státní podporou. Ve studii vypracované pro ministerstvo dopravy jsou modelovány čtyři možné scénáře vývoje vodíkové mobility právě v závislosti na míře podpory, jak je patrné z obr. 19 a obr. 20 [48].



Obr. 19 Vývoj počtu vodíkových autobusů v ČR v závislosti na státní podpoře [48]

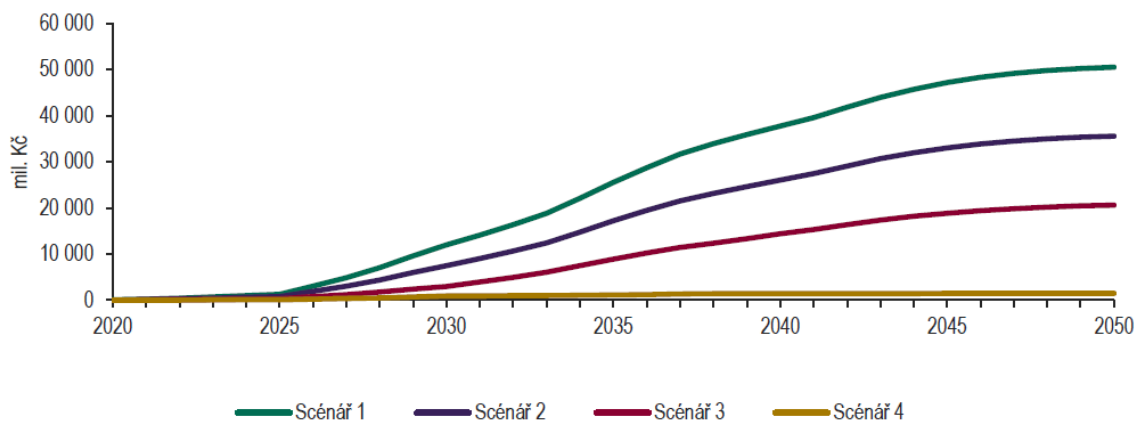
Model je založen na předpokladu, že se bude ČR angažovat v snižování emisí dle cílů EU. V modelu se sleduje míra naplnění následujících cílů: snížení emisí CO₂ v dopravě o 20 % do roku 2030 v porovnání s 2008, využívání alespoň 50 % vozů na alternativní paliva v městské dopravě do roku 2030 a 100 % do 2050 [48].



Obr. 20 Vývoj počtu vodíkových plnicích stanic v ČR v závislosti na státní podpoře [48]

V prvním scénáři se počítá se značnou podporou vodíku ze strany státu, poměrem autobusů na CNG, FCEV a BEV 40 %, 40 % a 20 % v roce 2030 a 10 %, 60 % a 30 % v roce 2050 [48]. Tento scénář také počítá s plným naplněním výše zmíněných cílů.

Ve scénáři druhém je vodíková mobilita brána jako rovnocenná s elektromobilitou, stále se však počítá s finanční podporou. Poměr zastoupení CNG, FCEV a BEV autobusů v roce 2030 je 40 %, 20 % a 35 %, v roce 2050 by pak jak FCEV, tak BEV autobusy tvořily 45 % každý, dohromady tedy 90 %. Emisní cíle pro rok 2030 jsou dosaženy z 90 %, celkové emise se pak sníží o 19 % ve srovnání s rokem 2008.

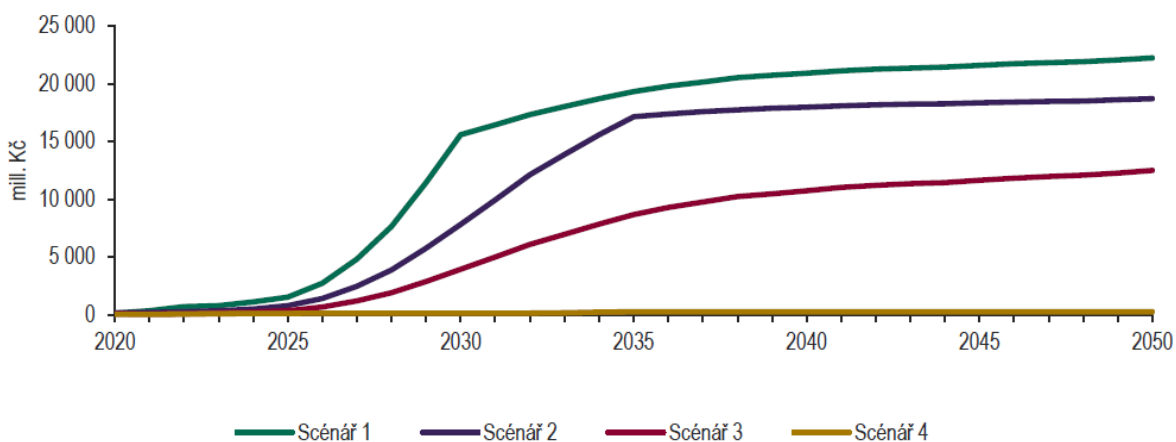


Obr. 21 Kumulované náklady na podporu vodíkové veřejné dopravy v závislosti na daném scénáři [48]

V třetím scénáři je vodík brán jako alternativa čisté mobility. Formy podpory od státu by sloužili spíše ke zvýšení povědomí o vodíku. V hromadné dopravě by pak k roku 2030 FCEV autobusy tvořily 10 %, k roku 2050 30 %. Pokles emisí by v tomto scénáři činil 17 %.

V případě posledního, čtvrtého scénáře by se jednalo prakticky pouze o nefinanční podporu ze strany státu, podíl FCEV autobusů by k roku 2030 činil pouze 3 %, do roku 2050 by však byly tyto autobusy nahrazeny plně BEV. Snížení emisí by činilo 16 % v porovnání s rokem 2008.

Na obr. 21 a obr. 22 je pak vidět kumulované náklady jednotlivých scénářů.

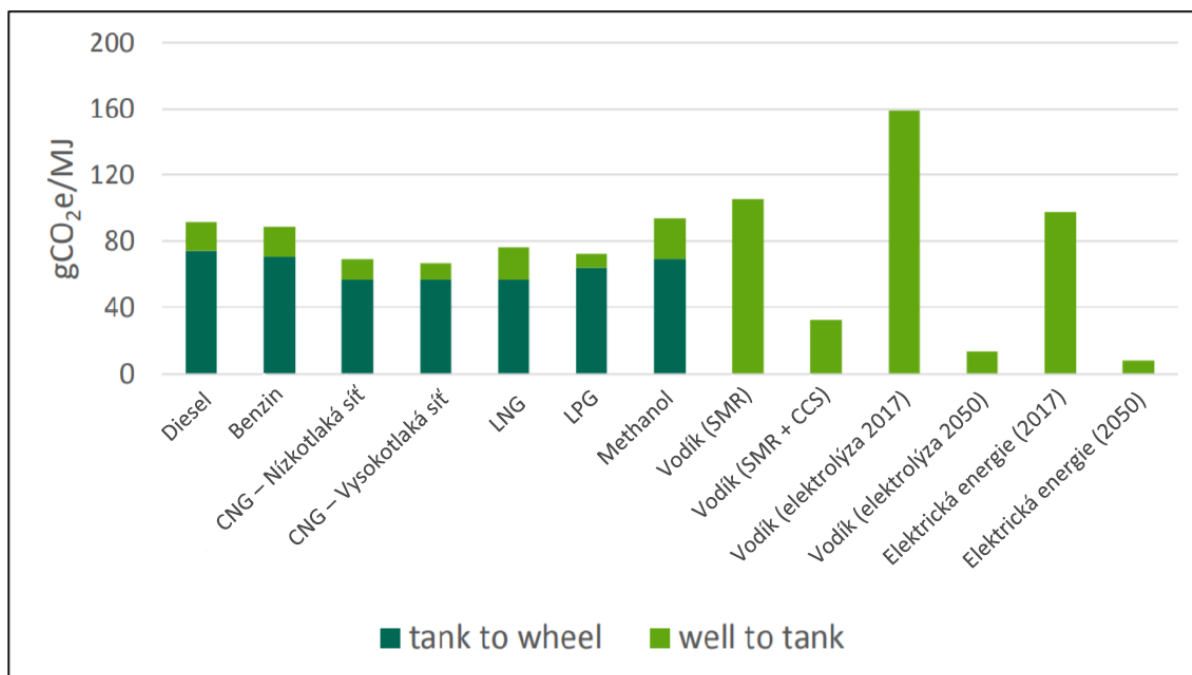


Obr. 22 Kumulované náklady na podporu vodíkových plnicích stanic v závislosti na daném scénáři [48]

Z dosavadních kroků vlády ČR se dá očekávat spíše scénář 2 nebo 3, scénář 1 je spíše hypotetický, a vzhledem k tomu že ČR přislíbila výstavbu plnicích stanic bez ohledu na vývoj trhu, scénář se také nezdá být příliš možným. Do roku 2025 by mělo být vybudováno stanic 15, do roku 2030 pak až 80 [43]. Speciálním bodem vlády dle Národního akčního plánu čisté mobility by pak měla být podpora neveřejných plnicích stanic využívaných primárně dopravními podniky, nákladní dopravou a velkými firemními flotilami.

4.5.2 POROVNÁNÍ Z EKOLOGICKÉHO HLEDISKA

FCEV během svého provozu prakticky neprodukuje emise skleníkových plynů jako např. CO₂ či NO_x, ale ani smog či pevné částice. Takový druh emisí se označuje „tank-to-wheel“, tedy emise vzniklé spalováním paliva a přeměny na mechanickou energii. Emise „well-to-tank“ jsou tedy hlavním zdrojem emisí vodíku jako paliva vozidel, tedy emise vzniklé výrobou či těžbou paliva a jeho přepravou na čerpací stanice. Emise „well-to-wheel“ je pak označení pro souhrn těchto emisí, tedy veškeré emise vzniklé od těžby či výroby paliva až po jeho přeměnu na energii pohánějící vozidlo [42]. Na obr. 23 je vidět porovnání emisí „well-to-wheel“ a jeho složky pro jednotlivá paliva s formou výroby [49].



Obr. 23 Emise skleníkových plynů „well-to-wheel“ v ekvivalenci pro CO₂, upraveno [41,48]

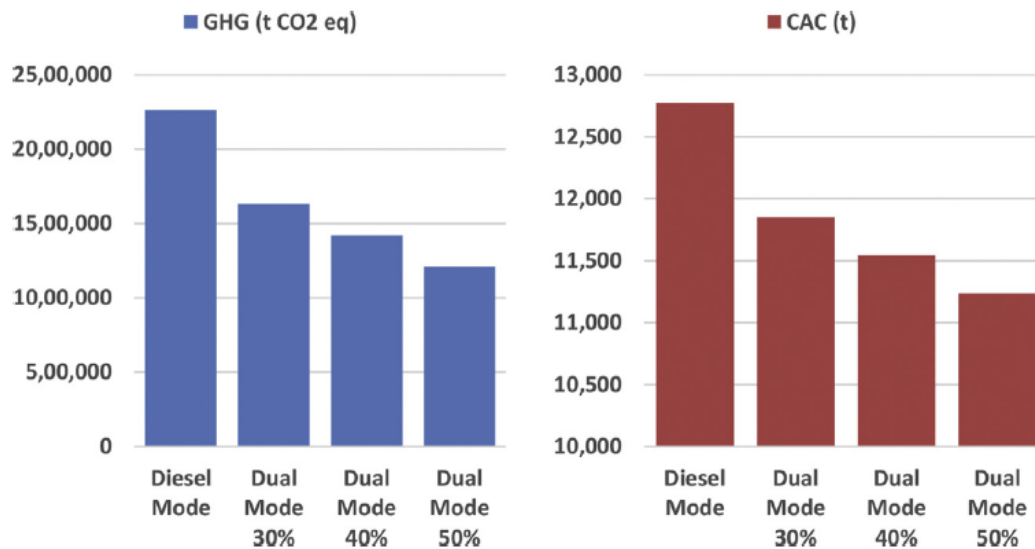
gCO₂e/MJ – ekvivalentní množství CO₂ v gramech na megajoule

SMR – parní reforming methanu

SMR + CCS – parní reforming methanu se systémem zachycujícím a udržujícím uhlík

Z obr. 23 je tedy patrné, že přestože v současné době je výroba vodíku ekologicky výhodnější z fosilních paliv s co nejlepším systémem filtrace a zachycování emisí. Vysoké emise výroby H₂ elektrolýzou pramení jak z nižší účinnosti, tak i ze skutečnosti, že k výrobě se využívá elektrina nejen z obnovitelných zdrojů. V do roku 2050 se dá očekávat nárůst podílu obnovitelných zdrojů a také možnost vyrábět H₂ primárně z obnovitelných zdrojů.

Z kanadské studie kamionové flotily popsané v kapitole 4.4.1 dvoupalivovové vyplývá jasná ekologická výhoda, přímo rostoucí s podílem H₂ ve směsi, jak je patrné z obr. 24 [47]. Stejně důležitou výhodou spalování směsi H₂ a nafty oproti čisté naftě jako nižší emise skleníkových plynů (GHG – Green House Gases), je pokles emisí CAC (CAC – Criteria Air Contaminat), tj. látky sloužící k posouzení znečištění ovzduší. Jako emise skleníkových plynů slouží k posouzení vlivu na životní prostředí, tak CAC emise slouží k posouzení kvality vzduchu a veřejného zdraví [47]. CAC měří šest složek: NO_x, SO₂, pevné částice, CO, ozón a olovo [50].



Obr. 24 Emise skleníkových plynů (GHG) v ekvivalenci pro CO₂ a emisí CAC s uvážením podílu H₂ ve směsi [47]

GHG – skleníkové plyny (Green House Gases)

tCO₂ eq – ekvivalentní množství CO₂ v tunách

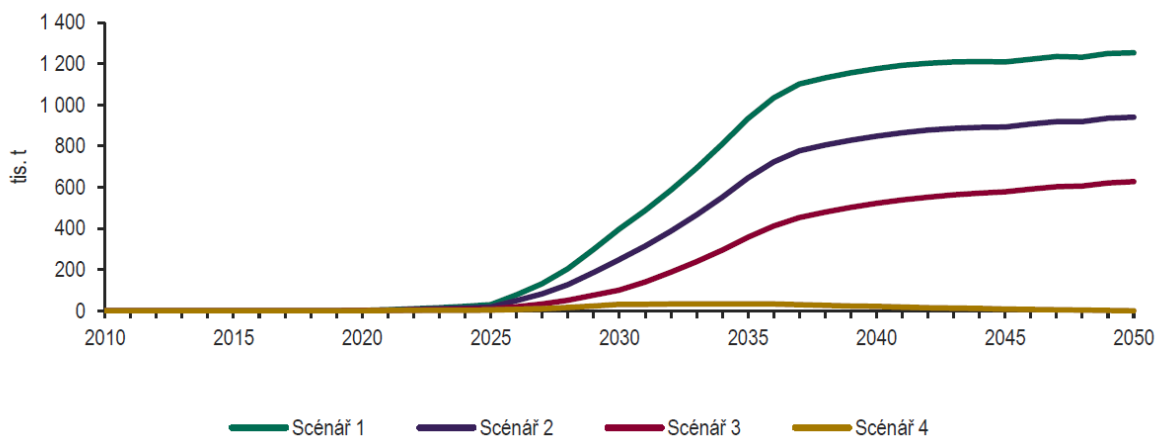
CAC – látky sloužící k posouzení znečištění ovzduší (Criteria Air Contaminant)

Diesel mode – spalování pouze nafty

Dual Mode 30, 40, 50 % – spalování s podílem 30, 40, 50 % H₂ ve směsi

Jak již bylo zmíněno, z obr. 22 je patrný výrazný pokles emisí. Při 50 % H₂ ve směsi dojde k poklesu GHG emisí o 47 % a 12 % poklesu emisí CAC [47]. Celkový pokles emisí však závisí na metodě výroby H₂.

Na snížení emisí CO₂ využíváním FCEV autobusů poukazuje studie vypracovaná pro ministerstvo dopravy, již dříve zmíněná v kapitole 4.4.1. Používáním těchto autobusů, byť i podle toho pro vodík nejméně optimistického, čtvrtého, scénáře, by v roce 2030 tyto autobusy ušetřily 99 tisíc tun CO₂, jinak vyprodukovanými konvenčními autobusy [48]. Na obr. 25 je pak možné vidět množství ušetřeného CO₂ podle jednotlivých scénářů [48]. Využívání vodíkových autobusů by tedy vedlo ke zlepšení ovzduší ve městech a městských částích, v níž by byly nasazeny.



Obr. 25 Ušetřené emise CO₂ využíváním FCEV autobusů [48]

4.6 SHRUTÍ VODÍKU U VODIDEL NAD 3,5 T

Tato kapitola popisuje využití vodíku jako palivo v těžké nákladní dopravě, tj. u vozidel nad 3,5 t. Bylo popsáno využití ve spalovacích motorech, v současnosti pouze ideové, a v palivových článcích nákladních elektrovozidel. Obě možnosti pak proti konvenční naftě, CNG či bateriím mají své výhody a nevýhody.

Mezi výhody využití vodíku ve spalovacích motorech patří:

- obecně nižší emise, ať již v jedno či dvoupalivovém motoru,
- vyšší p_e při stejném kompresním poměru,
- nižší emise skleníkových plynů ve dvoupalivovém motoru oproti využití CNG či LPG pro pohon nákladních vozů [47],
- vyšší účinnost.

Nevýhodami pak jsou:

- vyšší emise NO_x,
- vyšší emise při použití stejné výroby H₂ oproti FCEV,
- složitější logistika zajišťování paliv v případě dvoupalivového motoru,
- v praxi nutnost NO_x katalyzátoru.

Vozidla s palivovým článkem mají následující výhody:

- Nulové emise SO₂, NO_x, CO a uhlovodíků při provozu [47],
- vyšší účinnost oproti spalovacímu motoru,
- doba čerpání paliva srovnatelná s konvenčními palivy,
- akceptovatelný dojezd [47],
- nízká provozní teplota PEM článku,
- dlouhá životnost palivových článků plynoucích z absence pohybujících se částí,

Nevýhody plynoucí pro vozidla využívající palivový článek jsou pak:

- nutnost katalyzátorů, v mnohých případech drahých a vzácných kovů jako např. platiny, pro provoz při nízkých teplotách,
- nutnost kvalitní filtrace vzduchu přiváděného do palivového článku,
- vyšší pořizovací náklady,
- vyšší ceny H_2 oproti konkurenčním palivům.

Společnou výhodou je násobně vyšší energetický průtok při čerpání oproti dobíjení baterií, a to i v případě rychlonabíječek. Tento rozdíl u vozidel nad 3,5 t bude kvůli velké potřebné energii k uražení stovek kilometrů o to znatelnější oproti osobním automobilům. Zvláště u nákladní dopravy může tento fakt být silným rozhodujícím faktorem vedoucím k úspěchu vodíku v tomto sektoru dopravy.

Všechny výše uvedené výhody a nevýhody pak budou rozhodovat o úspěšnosti vodíkových vozidel v těžké nákladní dopravě.

Úspěch spalovacích motorů s vodíkem bude záviset na ceně přestaveb na dvoupalivový systém, či nových motorů čistě na H_2 . Dalším faktorem pak budou emisní nároky, které mohou ovlivnit, zda-li tato možnost bude implementována v praxi.

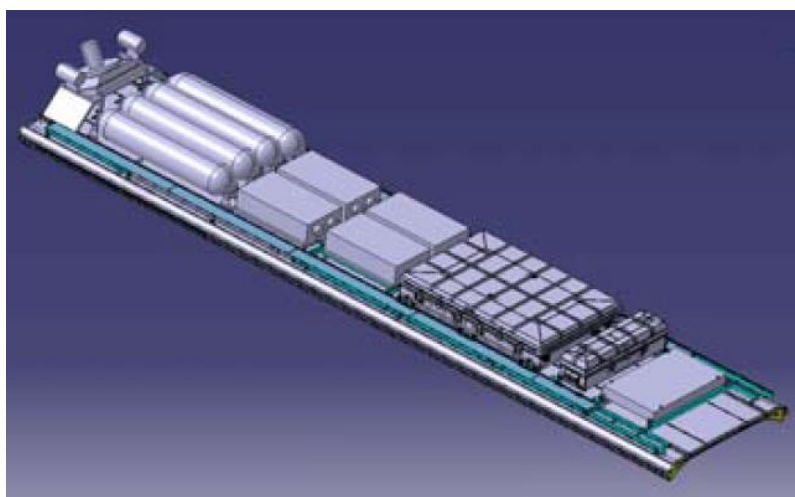
V současnosti se však zdá, že díky vyšší účinnosti, šetrnosti k přírodě, tichému chodu a trendu elektromobility bude hlavní a možná i jedinou aplikací vodíku v mobilní dopravě palivový článek.

5 IDEOVÝ NÁVRH ŘEŠENÍ UMÍSTĚNÍ NÁDRŽÍ PRO VODÍK VE VOZIDLE

Vozidla nad 3,5 t, ať již autobusy či nákladní vozy a tahače návěsů, potřebují dostatek paliva pro překonání požadované vzdálenosti. V této kapitole jsou nastíněny a popsány celkem čtyři možnosti umístění vodíku v tlakových nádobách na palubě vozidla. V praxi je pak možná kombinace jednotlivých možností pro zvýšení maximálního možného dojezdu vozidla.

5.1 STŘECHA

Umístění tlakových nádob na střechu vozidla je prakticky možné pouze u autobusů, u ostatních vozidel by tato možnost přinesla daleko více nevýhod, než výhod. Příkladem vozidla využívající tuto možnost umístění je pak např. TriHyBus, jak je vidět na obr. 26. Kromě nádrží jsou v případě tohoto vozidla na střeše vozidla umístěné i další prvky např. palivové články [26].



Obr. 26 Umístění vodíkových nádrží na střeše, levý horní roh [26]

Výhodou umístění nádrží na střechu vozidla je více prostoru uvnitř samotného vozidla, což je hlavním faktorem pro úspěch této možnosti skladování paliva u autobusů. V případě úniku či vznícení vodíku bude k tomuto jevu docházet nad úroveň vozidla, jelikož je vodík lehčí než vzduch, podobně jako CNG. Díky tomu dojde k snížení rizika úhony pasažérů.

Nevýhodou této možnosti je zvýšení polohy těžiště, což vede k horším jízdním vlastnostem, zvláště pak při vyšších rychlostech. U autobusů, které jsou z velké části prostředkem MHD, však tato skutečnost není takový problém.

Umístění na střechu vozidla je však v realitě praktické pouze u vozidel s dostatečně velkou střechou, jako jsou právě autobusy. V případě ostatních vozidel by nádrže umístěné pouze na střeše neumožňovaly pojmout dostatečné množství vodíku pro uražení požadovaných vzdáleností.

5.2 PODVOZEK A PROSTOR MEZI NÁPRAVAMI

Další možností umístění nádrží je místo na podvozku, tedy ve volných místech rámu a po stranách v prostoru rozvoru vozidla, po vzoru umístění naftových nádrží nákladních vozidel.

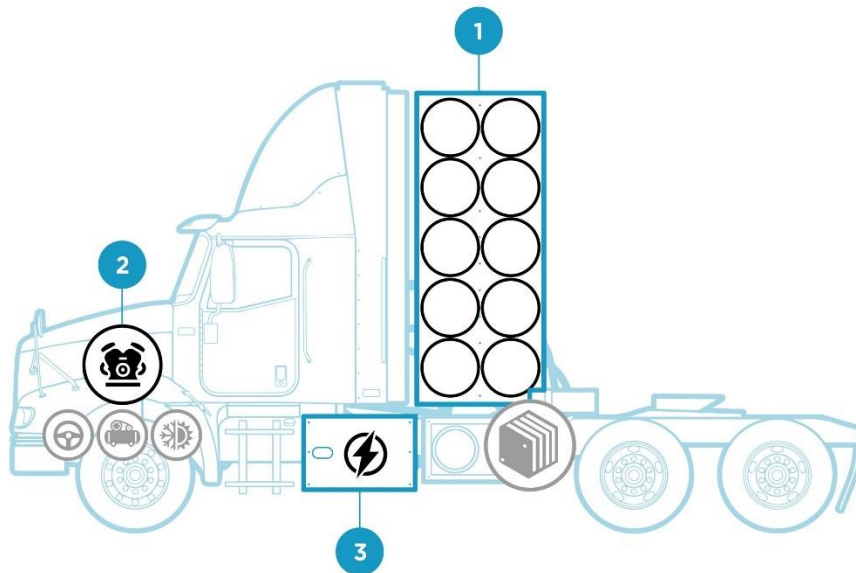
Jedná se o osvědčené umístění osvědčené právě u konvenčních naftových nákladních vozidel praxi.

Výhodou této možnosti je zachování výšky těžiště, tudíž by nedošlo k zhoršení jízdních vlastností. Také díky tomu, že se jedná o standartní umístění by nebylo nutné prodloužení vozidla či jiné zásahy do konstrukce rámu.

Nevýhodou je pak malý prostor v porovnání s ostatními možnostmi. Pokud by vodík byl uložen pouze v těchto nádržích, nemusel by být zaručen požadovaný dojezd v řádu stovek kilometrů mezi čerpáním paliva.

5.3 PROSTOR ZA KABINOU

Umístění tlakových nádob za kabinou v současnosti využívá spousta nákladních vozidel, jako např. Hyundai XCIENT Fuel Cell, Hyzon se serií HyMax či Hyzon class 8 . Na obr. 27 je pak zobrazeno toto umístění u vozidla Hyzon class 8 [30, 31].



Obr. 27 Umístění vodíkových nádrží v prostoru za kabinou, číslo 1 [31]

Tato možnost umístění zajišťuje dostatečné množství vodíku pro uražení požadovaných vzdáleností. Hyzon série HyMax dle výrobce je schopen urazit 400 – 680 km, model Class 8 od stejného výrobce pak 375 – 500 mil, tj. 600 – 800 km, pokud při převodu je uvažováno 1 míle se rovná 1,6 km [31]. Hyundai XCIENT Fuel Cell je schopen urazit cca 400 km dle výrobce, s kapacitou nádrží 32 kg H₂ se tedy jedná se spotřebou 8 kg H₂/100 km [30].

Výhodou této možnosti je poskytnutí dostatečně velkého prostoru pro uskladnění vodíku pro uražení stovek kilometrů bez nutnosti využití dalšího místa na či ve vozidle pro uražení takovýchto vzdáleností.

Nevýhodou této možnosti umístění je nutnost prodloužení vozidla k umístění nádrží. V případě tahace návěsů musí také být zajištěn dostatečný prostor mezi nádržemi a návěsem, což také přispěje k nárůstu délky vozidla.



5.4 NÁVĚS & PŘÍVĚS

Možnost umístění nádrží v přívěsu či návěsu by byla vhodná v případě nedostatečné hustoty čerpacích stanic, kdy by tahač návěsu či nákladní automobil táhnoucí přívěs museli urazit bez možnosti načerpání paliva až tisíc kilometrů. Nádrže by v takovém případě museli být umístěny na rámu a po stranách mezi koly. Umístění uvnitř samotného návěsu či přívěsu by nejen zvýšilo polohu těžiště, ale také omezilo místo k uložení přepravovaného nákladu.

Výhodou této možnosti je možnost uložení velkého množství vodíku díky značnému prostoru v rámu vlivem absence hnacího ústrojí a dalších prvků nacházejících se v podvozku nákladního vozidla. Z velkého množství H_2 pak plyne možnost uražení velké vzdálenosti bez nutnosti zastávek k načerpání paliva.

Nevýhodou tohoto umístění je doprava paliva z nádrží do motoru či palivového článku, umístěného v samotném vozidle. Přívod paliva by tak byl vystaven nejen přírodním živlům, ale také možnosti poškození lidským přičiněním, ať již nehodou při připojování návěsu či přívěsu, tak záměrným poškozením. Také by toto umístění vedlo k problému, kdy by nádrže nebyly plně vyčerpány, ale tahač či nákladní vozidlo by musel návěs či přívěs zanechat na místě.

5.5 SHRUTÍ MOŽNOSTÍ UMÍSTĚNÍ NÁDRŽÍ

V této kapitole byli popsány čtyři možnosti umístění nádrží pro vodík ve vozidle a jejich výhody a nevýhody.

Možnost umístění nádrží na střeše je vhodná pouze pro autobusy. Možnost umístění nádrží v prostoru za kabinou je již v praxi využívána a zajišťuje dostatek palivo pro dojed v řádu stovek kilometrů. Konvenční umístění po vzoru naftových nákladních vozů je pak možnost vhodná pro vozidla s menším požadovaným dojezdem či jako doplnění možnosti umístění za kabinou. Rozšíření umístění nádrží na návěs či přívěs je pak méně pravděpodobné z důvodů nebezpečí poškození přívodu paliva a také proto, že rychlost čerpání H_2 je dostatečná k tomu, aby bylo výhodnější po cestě načerpat další palivo než umístit další nádrže na návěs či přívěs.

ZÁVĚR

Následkem zpřísnujících se emisních norem a všeobecného zájmu společnosti o ekologii je trend elektrifikace a dekarbonizace dopravy čím dál silnější bez zjevné známky poklesu. Tento trend, jasně patrný v osobní dopravě, dříve či později ovlivní dopravu nákladní, přestože při pořizování a provozu nákladních vozů je rozhodováno primárně na základě ekonomických kalkulací. U osobních vozidel naopak v potaz mnohem více vstupují osobní emoce a přesvědčení majitele vozidla.

Trend elektrifikace a dekarbonizace dopravy, společně se současným nárůstem cen pohonných hmot a nejistotou dostatečných dodávek těchto paliv postupně povede k zařazení vodíku mezi paliva budoucí dopravy. Podíl na tom má i to, že zásoby ropy nejsou nevyčerpatelné a dříve či později dojít musí.

Úspěch či neúspěch vodíku jako paliva v nákladní dopravě není prozatím jasný, množství skutečností však nasvědčuje tomu, že tato možnost je více než realistická.

Vodík lze obecně využít jako úložiště energie, nejen pro automobilní dopravu, ale také se například v něm může ukládat elektrická energie nejen z obnovitelných zdrojů, která by následně byla opět využita v případě zvýšeného odběru elektřiny. Další výhodou vodíku je pak rychlost čerpání a energetický průtok při něm. V porovnání se současnými rychlonabíječkami je energetický průtok vodíku šestkrát větší. V neposlední řadě pak při spalování vodíku vzniká v porovnání s konvenčními palivy zlomek emisí, s výjimkou oxidů dusíku, v případě palivového článku pak nevznikají žádné emise, pouze voda či vodní pára.

První z mnoha nevýhod vodíku je pak skutečnost, že je jej nutné nejdříve vyrobit, nelze jej jako jiná paliva jen vytěžit a rafinovat. Pro výrobu samotného vodíku je potřeba vynaložit energii, v závislosti na druhu výroby a použité energii pak dochází k tvorbě skleníkových plynů. Pro přepravu a skladování vodíku je nutno vynaložit další energii pro stlačení či zkapalnění. Kvůli celkové energetické spotřebě jsou celkové emise vodíku (well-to-wheel) v některých případech v současnosti vyšší než u konvenčních či alternativních uhlovodíkových paliv.

Hlavní překážkou, aby se vodík stal konkurenceschopným palivem, je v současnosti nedostatečná infrastruktura a absence sítě čerpacích stanic nejen pro dopravní podniky, ale i širší veřejnost.

Budoucí plány státu začít palivo využívat nejen v městské hromadné dopravě, ale i ve vlakové dopravě k pohonu vlaků s palivovým článkem v místech, kde není elektrifikace trati výhodná, je pak prvním krokem k výstavbě potřebné infrastruktury, kterou by poté mohli využívat i nákladní vozy a tahače návěsů poháněné vodíkovými palivovými články.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] BRESTOVIC, Tomas, Natalia JASMINSKA a Marian LAZAR. Metal hydride tank cooling at hydrogen absorption into the LaCeNi alloy. Brussels: EuroScientia, 2017. ISBN 978-90-822990-9-3.
- [2] MOMIRLAN, Magdalena a T.N. VEZIROGLU. The properties of hydrogen as fuel tomorrow in sustainable energy system for a cleaner planet. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2005, 30(7), 795-802 [cit. 2021-11-14]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2004.10.011>
- [3] CİNİVİZ, Murat a Hüseyin KÖSE. HYDROGEN USE IN INTERNAL COMBUSTION ENGINE: A REVIEW. *International Journal of Automotive Engineering and Technologies* [online]. 2012, 1(1), 1-15 [cit. 2021-11-17]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/267711346_HYDROGEN_USE_IN_INTERNAL_COMBUSTION_ENGINE_A_REVIEW
- [4] DIMITRIOU, Pavlos a Taku TSUJIMURA. A review of hydrogen as a compression ignition engine fuel. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2017, 42(38), 24470-24486 [cit. 2021-11-17]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.07.232>
- [5] KUMAR, Vasu, Dhruv GUPTA a Naveen KUMAR. HYDROGEN USE IN INTERNAL COMBUSTION ENGINE: A REVIEW. *International Journal of Advanced Culture Technology* [online]. 2015, 3(2), 87-99 [cit. 2021-11-17]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.17703/IJACT.2015.3.2.87>
- [6] BARTHELEMY, H., M. WEBER a F. BARBIER. Hydrogen storage: Recent improvements and industrial perspectives. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2017, , 7254-7262 [cit. 2022-02-24]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319916305559>
- [7] PARTHASARATHY, Prakash a K. Sheeba NARAYANAN. Hydrogen production from steam gasification of biomass: Influence of process parameters on hydrogen yield – A review. *Renewable Energy* [online]. 2014, 66, 570-579 [cit. 2021-11-22]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.12.025>
- [8] NIKOLAIDIS, Pavlos a Andreas POUILLIKKAS. A comparative overview of hydrogen production processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2017, 67, 597-611 [cit. 2021-11-21]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.044>
- [9] DA SILVA VERAS, Tatiane. aj. Hydrogen: Trends, production and characterization of the main process worldwide. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2017, 42(4), 2018-2033 [cit. 2021-11-21]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.08.219>
- [10] EL-SHAFIE, Mostafa, Shinji KAMBARA a Yukio HAYAKAWA. Hydrogen Production Technologies Overview. *Journal of Power and Energy Engineering* [online]. 2019, 7(1) [cit. 2021-11-21]. Dostupné z: doi:[10.4236/jpee.2019.71007](https://doi.org/10.4236/jpee.2019.71007)

- [11] DINCER, Ibrahim a Canan ACAR. Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2015, 40(34), 11094-11111 [cit. 2021-11-22]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.12.035>
- [12] DINCER, Ibrahim. Green methods for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2012, 37(2), 1954-1971 [cit. 2022-02-02]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.03.173>
- [13] RIVARD, Etienne, Michel TRUDEAU a Karim ZAGHIB. Hydrogen Storage for Mobility: A Review. *Functional Materials for Energy Conversion and Storage* [online]. 2019, 12(12) [cit. 2022-02-24]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.3390/ma12121973>
- [14] Physical Hydrogen Storage. ENERGY.GOV [online]. Washington: U.S. Department of Energy [cit. 2022-02-24]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/physical-hydrogen-storage>
- [15] NIAZ, Saba, Taniya MANZOOR a Altaf Hussain PANDITH. Hydrogen storage: Materials, methods and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2015, , 457-469 [cit. 202-02-24]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.011>
- [16] DURBIN, D.J. a C. MALARDIER-JUGROOT. Review of hydrogen storage techniques for on board vehicle applications. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2013, 38(34), 14595-14617 [cit. 2022-02-24]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.07.058>
- [17] KUNZE, Klaas a Oliver KIRCHER. Performance of a cryo-compressed hydrogen storage. In: *World Hydrogen Energy Conference-WHEC 2012*. 2012. [cit. 2022-02-24]. Dostupné z: <https://stfc.ukri.org/stfc/cache/file/F45B669C-73BF-495B-B843DCDF50E8B5A5.pdf>
- [18] ANDERSSON, Joakim a Stefan GRÖNKVIST. Large-scale storage of hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2019, 44(23), 11901-11919 [cit. 2022-02-24]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.063>
- [19] TARKOWSKI, Radoslaw. Underground hydrogen storage: Characteristics and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2019, , 86 - 94 [cit. 2021-10-11]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032119300528>
- [20] OZARSLAN, Ahmet. Large-scale hydrogen energy storage in salt caverns. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2012, 37(19), 14265-14277 [cit. 2022-02-24]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.07.111>
- [21] YANG, Christopher a Joan OGDEN. Determining the lowest-cost hydrogen delivery mode. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2007, 32(2), 268-286 [cit. 2022-02-24]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.05.009>

- [22] SINGH, Sonal. Hydrogen: A sustainable fuel for future of the transport sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2015, 51, 623-633 [cit. 2022-02-24]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.040>
- [23] HAWKINS, Sam a D. JOFFE. UKSHEC Social Science Working Paper [online]. 2006, 21 [cit. 2022-03-01]. Dostupné z: https://www.academia.edu/904707/Technological_characterisation_of_hydrogen_storage_and_distribution_technologies?bulkDownload=thisPaper-topRelated-sameAuthor-citingThis-citedByThis-secondOrderCitations&from=cover_page
- [24] TEICHMANN, Daniel, Wolfgang ARLT a Peter WASSERSCHIED. Liquid Organic Hydrogen Carriers as an efficient vector for the transport and storage of renewable energy. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2012, 37(23), 18118-18132 [cit. 2022-02-24]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.08.066>
- [25] H2 Stations Map. H2stations.org [online]. Ottobrunn: Ludwig-Bölkow-Systemtechnik, [2005] [cit. 2022-02-24]. Dostupné z: <https://www.h2stations.org/stations-map/>
- [26] DOUCEK, Aleš a Luděk JANÍK. TriHyBus: The First Fuel Cells Hydrogen Bus in New EU Countries. *The Electrochemical Society* [online]. 2011 [cit. 2021-10-10]. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/1.3641838>
- [27] KURTZ, Jennifer, Sam SPRIK a Thomas H. BRADLEY. Review of transportation hydrogen infrastructure performance and reliability. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2019, 44(23), 12010-12023 [cit. 2022-02-24]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.027>
- [28] Supercharger. Tesla [online]. Austin: Tesla, 2022 [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: <https://www.tesla.com/supercharger>
- [29] TATRA TRUCKS překročila plán na loňský rok a prodala 1277 vozů. Tatra.cz [online]. Kopřivnice: TATRA TRUCKS, 2014 [cit. 2022-03-15]. Dostupné z: <https://www.tatra.cz/o-spolecnosti/tisk-a-media/novinky-a-clanky/tatra-trucks-prekrocila-plan-na-lonsky-rok-a-prodala-1277-vozu-1/>
- [30] Hyundai XCIENT Fuel Cell Heads to Europe for Commercial Use. Hyundai news [online]. Hyundai Motor Company, 2012 [cit. 2022-03-15]. Dostupné z: <https://www.hyundai.news/eu/articles/press-releases/hyundai-xcient-fuel-cell-heads-to-europe-for-commercial-use.html>
- [31] Vehicle Catalog. Hyzon Motors [online]. Hyzon Motors, 2022 [cit. 2022-03-15]. Dostupné z: <https://hyzonmotors.com/vehicle-catalog/>
- [32] VLK, František. *Vozidlové spalovací motory*. Brno: Prof. Ing. František Vlk, DrSc., 2003, s. 12-17. ISBN 80-238-8756-4.
- [33] VLK, František. *Vozidlové spalovací motory*. Brno: Prof. Ing. František Vlk, DrSc., 2003, s. 25-26. ISBN 80-238-8756-4.

- [34] BORETTI, Alberto. Advances in hydrogen compression ignition internal combustion engines. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2011, 36(19), 12601-12606 [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.06.148>
- [35] VLK, František. *Vozidlové spalovací motory*. Brno: Prof. Ing. František Vlk, DrSc., 2003, s. 29-31. ISBN 80-238-8756-4.
- [36] TSUJIMURA, Taku a Yasumasa SUZUKI. The utilization of hydrogen in hydrogen/diesel dual fuel engine. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2017, 42(19), 14019-14029 [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.01.152>
- [37] DUAN, Junfa, Fushui LIU a Baigang SUN. Backfire control and power enhancement of a hydrogen internal combustion engine. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2014, 39(9), 4581-4589 [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.12.175>
- [38] Fuel Cell Basics. Fuel Cell & hydrogen Energy Association [online]. Washington D.C.: Fuel Cell & Hydrogen Energy Association [cit. 2022-03-23]. Dostupné z: <https://www.fchea.org/fuelcells/>
- [39] VLK, František. *Alternativní pohony motorových vozidel*. Brno: Prof. Ing. František Vlk, DrSc., 2004, s. 186-198. ISBN 80-239-1602-5.
- [40] BARBIR, Frano. *PEM Fuel Cells: Theory and Practice*. 2. Waltham (Massachusetts): Elsevier, 2013, s. 10-11. ISBN 978-0-12-387710-9.
- [41] Fuel Cell & Hydrogen Energy Basics. Fuel Cell & Hydrogen Energy Association [online]. Washington D.C.: Fuel Cell & Hydrogen Energy Association [cit. 2022-03-23]. Dostupné z: <https://www.fchea.org/h2-day-2019-events-activities/2019/8/1/fuel-cell-amp-hydrogen-energy-basics>
- [42] Technicko-ekonomické posouzení implementace vodíkového pohonu v Ústeckém kraji. Ústecký kraj [online]. Husinec: ÚJV Řež, a. s., 2020 [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: https://www.kr-ustecky.cz/assets/File.ashx?id_org=450018&id_dokumenty=1748691
- [43] Vodíkové technologie. ÚJV Řež, a. s. [online]. Řež: ÚJV Řež, 2022 [cit. 2022-03-26]. Dostupné z: https://www.ujv.cz/cs/produkty-a-sluzby/nejaderna_energetika/vodikove-technologie
- [44] SMĚR Hydrogen. Solaris [online]. Owińska: Solaris Bus & Coach sp. z o.o., 2022 [cit. 2022-03-26]. Dostupné z: <https://www.solarisbus.com/cs/vozidla/nulove-emise/hydrogen-1>
- [45] Hybrid Fuel Cell. Van Hool [online]. Lier: Van Hool NV, 2022 [cit. 2022-03-26]. Dostupné z: <https://www.vanhool.be/en/public-transport/agamma/hybrid-fuel-cell>

- [46] ADL adds hydrogen fuel cell technology to the market's widest range of low and zero emission buses. Alexander Dennis [online]. Edinburgh: Alexander Dennis [cit. 2022-03-26]. Dostupné z: <https://www.alexander-dennis.com/media/news/2018/november/adl-adds-hydrogen-fuel-cell-technology-to-the-market-s-widest-range-of-low-and-zero-emission-buses/>
- [47] EL HANNACH, Mohamed. Life cycle assessment of hydrogen and diesel dual-fuel class 8 heavy duty trucks. International Journal of Hydrogen Energy [online]. 2019, 44(16), 8575-8584 [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.02.027>
- [48] Studie – Využití vodíkového pohonu v dopravě v České republice. Česká vodíková technologická platforma [online]. Grant Thornton Advisory, 2017 [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/images/dokumenty-ke-stazeni/Studie-Vyuziti-vodikoveho-pohonu-v-doprave-v-Ceske-republice.pdf>
- [49] Transport Energy Model Report. Department for Transport [online]. Londýn: Department for Transport, 2018 [cit. 2022-03-31]. Dostupné z: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/739462/transport-energy-model.pdf
- [50] Criteria Air Contaminants. Oregon.gov [online]. Salem (Oregon): Oregon Department of Transportation, 2014 [cit. 2022-04-01]. Dostupné z: <https://www.oregon.gov/ODOT/Planning/Documents/Mosaic-Specific-Indicators-Criteria-Air-Contaminants.pdf>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

\$		Americký dolar
BEV		Battery electric vehicle, tj. elektrické vozidlo s bateriemi
CAC		Clean Air Contaminant
CcH ₂		Kryo-stlačený vodík
CCS		CO ₂ capture and storage
CGH ₂		Stlačený vodík
CNG		Stlačený zemní plyn
CO		Oxid dusný
CO ₂		Oxid uhličitý
d	[mm]	Vrtání válce
DÚ		Dolní úvrat'
e ⁻		Elektron
FCEV		Fuel cell electric vehicle, tj. vozidlo s palivovým článkem
FCH JU		Fuel cells and hydrogen joint undertaking
GHG		Green House Gases, tj. skleníkové plyny
H ⁺		Proton
H ₂		Vodík
HÚ		Horní úvrat'
CH ₃ OH		Methanol
CH ₄		Methan
i _v	[-]	Počet válců motoru
KH		Klikový hřídel
KOH		Hydroxid draselný
LH ₂		Kapalný vodík
LPG		Zkapalněný ropný plyn
NaOH		Hydroxid sodný
NH ₃		Amoniak
NO _x		Oxidy dusíku
O ₂		Kyslík
p _e	[MPa]	Střední efektivní tlak
PEM		Proton exchange membrane
p _i	[MPa]	Střední indikovaný tlak

p_m	[MPa]	Střední tlak mechanických ztrát
POX		Parciální oxidace
PSA		Pressure swing adsorption
SO ₂		Oxid siřičitý
SO ₃		Oxid sírový
SOE		Solid oxide electrolyser
SV		Sací ventil
V_k	[mm ³]	Objem prostoru na spalovací straně pístu v HÚ
VV		Výfukový ventil
V_z	[mm ³]	Zdvihový objem motoru
WGS		Water-gas shift
W_i	[J]	Vykonaná práce během jednoho cyklu
z	[mm]	Zdvih pístu
ε	[-]	Kompresní poměr
λ	[-]	Součinitel přebytku vzduchu

SEZNAM PŘÍLOH

- P1 Porovnání metod dopravy vodíku
- P2 Skripty ideálních cyklů zážehového motoru v programu MATLAB