

VYUŽITÍ VODÍKU V DOPRAVĚ

Kateřina Vondráková, Tomáš Hlinčík

Ústav plynných a pevných paliv a ochrany ovzduší, Vysoká škola chemicko-technologická v Praze,
Technická 5, 166 28 Praha 6, tomas.hlincik@vscht.cz

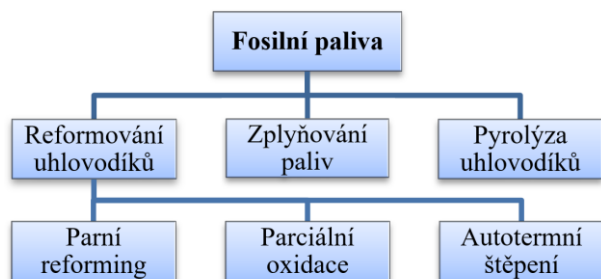
V posledních letech je snaha využívat ekologičtější prostředky a minimalizovat ekologické dopady v celém životním cyklu produktů. Důležitým bodem této ekologizace je i snížení emisí z energetického průmyslu a dopravy. Pokud se zaměříme na emise z dopravy, jedná se především o emise CO_2 , NO_x a pevných částic. Tyto emise vznikají zejména využíváním fosilních paliv. V dopravním sektoru lze snížit množství vznikajících lokálních emisí CO_2 , NO_x a pevných částic zavedením vodíkové mobility, která tyto emise neprodukuje a navíc může být založena na obnovitelných zdrojích energie. Naskýtá se však otázka, zda je pro dopravu možné vyprodukovat dostatečné množství vodíku za využití pouze obnovitelných zdrojů energie. Cílem tohoto příspěvku je popsat aktuální stav vodíkové mobility v ČR, ve světě a její vyhlídky do budoucnosti. Dále hodnotit účinnost získání vodíkového paliva (např. z fosilních paliv nebo z obnovitelných zdrojů energie) a celkovou účinnost přeměny chemické energie na mechanickou energii. Nedílnou součástí příspěvku je i kritické zhodnocení využití vodíku v dopravě.

Klíčová slova: vodík; doprava; paliva

Došlo 10. 05. 2021, přijato 20. 06. 2021

1. Úvod

Vodík se v přírodě přirozeně nevyskytuje a nelze ho těžít, ani získávat separací. V průmyslu je vyráběn jako hlavní i vedlejší produkt z celé řady chemických procesů. Primární surovinou pro jeho získávání mohou být fosilní i obnovitelná paliva. Na obr. 1 jsou znázorněny metody získávání vodíku z fosilních paliv [1,2].

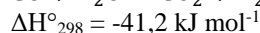
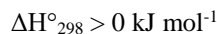
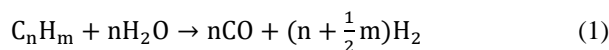


Obr. 1 Metody získávání vodíku z fosilních paliv [2]
Fig. 1 Methods for the production of hydrogen from fossil fuels [2]

Nejvyužívanějším zdrojem pro získávání vodíku jsou fosilní paliva, ze kterých dnes pochází 96 % celkové produkce, přičemž 48 % vyprodukovaného vodíku pochází ze zemního plynu [3], 30 % z těžkých topných olejů a motorové nafty a 18 % z hnědého uhlí. Pouze 4 % vodíku jsou vyráběna elektrolýzou vody. Elektrická energie pro elektrolýzu vody je ze 64 % vyrobena z fosilních zdrojů energie, 10 % jadernými elektrárnami a zbylých 26 % připadá na obnovitelné zdroje energie [1–4].

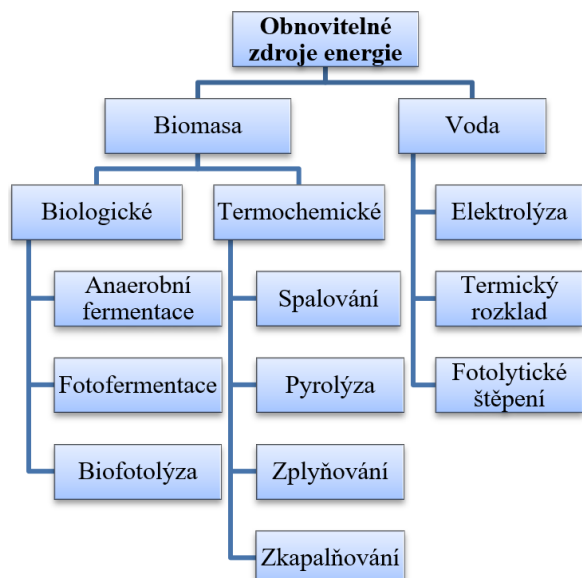
Nejčastěji využívanou metodou výroby vodíku je parní reforming, kterým je vyráběno přibližně 90 % jeho celkové produkce. Parní reforming lze popsat obecnou endotermní rovnicí (1) [2,3]. Standardně je prováděn za

využití niklového katalyzátoru. Produktem parního reformingu je syntézní plyn (směs H_2 a CO). Ze syntézního plynu je vodík získáván v několika krocích. Prvním krokem dojde ke zvýšení jeho koncentrace v plynu, viz rovnice (2) [3]. Vzniklá směs H_2 a CO_2 se ve druhém kroku nejčastěji separuje za využití kombinace procesu adsorpce (PSA) s membránovou separací. Tímto kombinovaným způsobem čištění lze dosáhnout vysoké čistoty vodíku (hmotnostní koncentrace vodíku více než 99,99 %) i vysokého výtěžku (více než 90 % hmotnostního zlomku vodíku) [1–3,5].



Na obr. 2 jsou znázorněny možnosti získávání vodíku z obnovitelných zdrojů energie. Zdrojem může být biomasa, kterou lze zpracovávat biologicky nebo termochemicky, a voda, kterou lze dělit elektrolýzou, termicky nebo fotolyticky. Nejvyužívanějším postupem výroby vodíku z obnovitelných zdrojů je elektrolýza vody [2].

Výroba vodíku elektrolýzou vody, za využití energie vyrobené v jaderných, větrných a slunečních elektrárnách, má nulové emise oxidu uhličitého [6]. Cena vyrobeného vodíku elektrolýzou se liší dle zdroje elektrické energie. Nejlevněji vyrobená elektrická energie pocházející z obnovitelných zdrojů vzniká ve vodních elektrárnách za průměrnou cenu 0,047 USD/kWh [7]. Nejdražší energie z obnovitelných zdrojů vzniká v solárních elektrárnách a její cena je 0,259 USD/kWh [7]. Celková průměrná cena energie pro průmysl ve světě se v roce 2018 pohybovala okolo 0,097 USD/kWh [8] a její výrobní cena byla a v rozmezí 0,050 až 0,177 USD/kWh [6–8].



Obr. 2 Metody získávání vodíku z obnovitelných zdrojů energie [2]

Fig. 2 Methods for the production of hydrogen from renewable energy sources [2]

Výrobní cena vodíku vyráběného elektrolýzou se liší dle zdroje elektrické energie a účinnosti použitého elektrolýzoru. Při dnešním energetickém mixu je cena vodíku vyráběného elektrolýzou přibližně 2,3 USD/kg [9]. Cena vodíku vyrobeného zpracováním obnovitelných zdrojů se pohybuje okolo 3,6 USD/kg. Do roku 2029 by tato cena dle některých zdrojů mohla klesnout na 2,8 USD/kg [10]. Cena vodíku vyrobeného parním reformingem methanu je cca 2,08 USD/kg bez použití technologií CCS (Carbon, Capture and Storage) [9–11].

Dle primárního zdroje a způsobu získávání energie pro výrobu dělíme vodík na 4 kategorie. Existuje takzvaný šedý vodík, který je vyroben z fosilních zdrojů energie a jeho nejvýznamnějším zástupcem je vodík vyrobený parním reformingem zemního plynu. Produkce šedého vodíku vede ke vzniku významných emisí CO₂. Dalším zástupcem je modrý vodík, který sice vzniká z fosilních zdrojů energie, ale při jeho výrobě je vznikající oxid uhličitý zachycován a následně ukládán metodami CCS. Vodík vyráběný elektrolýzou vody za použití elektrické energie výhradně z obnovitelných zdrojů se nazývá zelený vodík. Posledním zástupcem je tyrkysový vodík, který vzniká termickým štěpením methanu za vzniku vodíku a uhlíku [12].

2. Vodíková mobilita v ČR a ve světě

V České republice jsou 4 průmyslové podniky, které vyrábějí vodík jako hlavní nebo vedlejší produkt, a které disponují množstvím vodíku, jež lze uplatnit na trhu. Například Společnost Spolchemie, a.s. v Ústí nad Labem denně vyprodukuje až 4 tuny přebytečného vodíku. Vozidlo s elektromotorem poháněným vodíkovým palivovým článkem (FCEV) by na toto množství vodíku dokázalo ujet až 400 000 kilometrů. Další společností, která

má potenciál produkovat vysoké množství vodíku, je Orlen Unipetrol, a.s. Do budoucna plánuje zásobování vodíkových čerpacích stanic (HRS) společnosti Benzina. HRS se dělí na veřejné a neveřejné. Ve veřejných HRS může vodík čerpat každý vlastník vodíkového zařízení zahrnující osobní automobily, vozidla hromadné dopravy a obslužná zařízení. Neveřejné HRS slouží pro plnění vozidel hromadné dopravy, pro plnění firemních pracovních strojů poháněných vodíkem, pro testování a pro vědecké účely. HRS lze zařadit do infrastruktury čerpacích stanic na běžná paliva. První veřejná HRS v České republice byla původně plánována na rok 2018 [13]. Tento plán však nebyl dodržen a žádná veřejná plnicí stanice zatím nestojí. Momentálně jsou postaveny dvě neveřejné čerpací stanice na vodík – v areálu společnosti Spolana a.s. v Neratovicích, na které již byly odzkoušeny technologie plnění vodíku, a od roku 2020 v areálu ÚJV Řež u Prahy. Společnost Bonett Bohemia, a.s. v září 2020 podepsala se společností Orlen Unipetrol, a.s. smlouvu na postavení 3 HRS. Tyto plnicí stanice budou postaveny na čerpacích stanicích Benzina v Litvínově, v Praze a v Brně. HRS v Praze na Barrandově a v Litvínově by měly být uvedeny do provozu v průběhu roku 2021. Do budoucna se připravuje také výstavba HRS v Plzni a v Praze na dálnici D10 ve směru na Mladou Boleslav [14]. Vzhledem k tomu, že se jedná o finančně nákladné investice, bude třeba využít kromě státních fondů ČR i fond z programu pro propojení Evropy CEF (Connecting Europe Facility) [15], který zprostředkovává Evropská unie [13,16,17].

V České republice byl 6. 5. 2020 aktualizován národní akční plán čisté mobility (NAP-CM) předložený Ministerstvem průmyslu a obchodu spolu s Ministerstvem dopravy a Ministerstvem životního prostředí. Tento plán byl vytvořen z důvodu vystavení směrnice EU (2014/94/EU) [19], která zavazuje členské státy k vytvoření politického rámce, podporující rozvoj alternativních paliv v dopravě, a tím podpoří šíření a uplatnění alternativních paliv v dopravním sektoru. Na základě tohoto plánu by mělo dojít ke splnění unijních dokumentů, které byly schváleny v předchozích letech. Mezi tyto dokumenty spadá například závazek k novým emisním cílům oxidu uhličitého pro osobní, lehká užitková a nákladní vozidla. Dalším unijním cílem je povinnost dosáhnout 14% podílu obnovitelných zdrojů energie v dopravě [16].

V tabulce 1 je znázorněn předpokládaný nárůst vodíkových vozidel a infrastruktury do roku 2030 dle studie „Využití vodíkového pohonu v dopravě v České republice“ aktualizované v roce 2019, která je začleněna v NAP-CM. Pro dosažení tohoto rozvoje bude potřeba využívat finančních prostředků z Evropské unie na podporu čisté mobility. Momentálně má Česká republika v provozu dvě neveřejné HRS, jedno FCEV vozidlo a jeden prototypový autobus využívající spojení elektromotoru s vodíkovými palivovými články (FCEB) značky Škoda. Nákladní vozidlo využívající vodíkové články zatím v ČR není žádné [17].

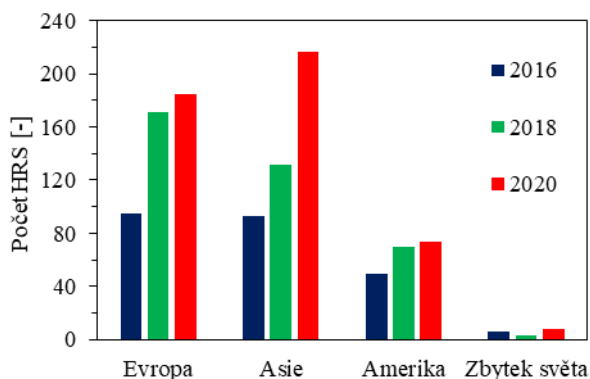
Množství vodíkových plnicích stanic ve světě roste každým rokem. V prosinci 2016 bylo ve světě 244 HRS [13].

Tab. 1 Předpokládaný nárůst množství FCEB, FCEV a HRS na území České republiky [17]

Tab. 1 Expected increase in quantity of FCEB, FCEV and HRS in the Czech Republic [17]

	2020	2022	2024	2026	2028	2030
FCEB	2	19	60	167	443	873
FCEV	80	801	3473	11221	29815	58775
HRS	3	5	8	16	41	80

Na konci roku 2018 se počet HRS zvýšil na 376 [20]. V září 2020 bylo v provozu 484 HRS [21]. Distribuce HRS po světě v letech 2016, 2018 a 2020 je znázorněna v grafu na obr. 3. Z těchto dat vyplývá, že nejmasivnější nárůst mezi lety 2018 a 2020 byl v Asii (konkrétně v Japonsku, Jižní Koreji a v Číně, viz tabulka 2), která počtem HRS předstihla Evropu. Naopak v Severní Americe se rozvoj vodíkové infrastruktury výrazně zpomalil [13,20,21].



Obr. 3 Množství HRS ke konci roku 2016, 2018 a k srpnu roku 2020 ve světě [13,20,21]

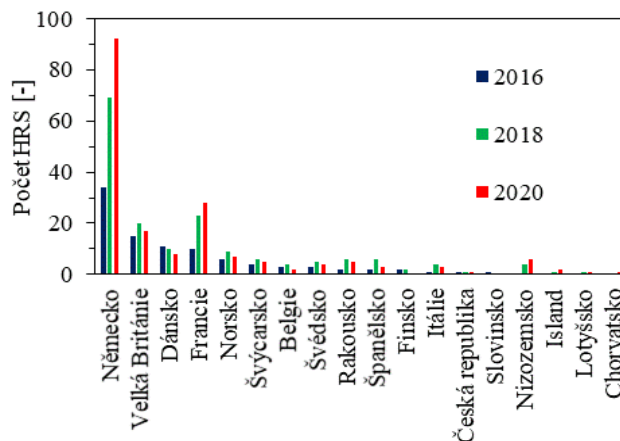
Fig. 3 Number of HRS at the end of 2016, 2018 and August 2020 in the world [13,20,21]

Množství plnicích stanic v roce 2016, 2018 a 2020 v Evropě je uvedeno na obr. 4. Je z něj patrná snaha Německa o rozvoj vodíkové dopravy, která koresponduje se zájmem německé vlády podporovat obnovitelné a udržitelné energetické zdroje [12]. Další nárůst množství HRS byl ve Francii, která se po vzoru Německa snaží snížit závislost na fosilních zdrojích energie. Naopak Velká Británie od zájmu na vodíkové dopravě ustupuje [12,13,20,21].

Vývoj počtu HRS v Asii v letech 2016, 2018 a v září 2020 je znázorněn v tabulce 2. Nejvyšší množství HRS v Asii má Japonsko, které následuje Jižní Korea s přírůstkem 26 HRS mezi lety 2018 až 2020 [13,20,21].

Množství HRS v Severní Americe v letech 2016, 2018 a v září 2020 je uvedeno v tabulce 3. Mezi lety 2018 až 2020 byly v USA postaveny pouze 4 nové HRS. Téměř dvě třetiny HRS na území USA jsou postaveny v Kalifornii, kde k září 2020 stálo 41 HRS [13,20-22].

Ve státech s dobře se rozvíjející infrastrukturou HRS pomalu narůstá i počet vozů poháněných palivovými články.



Obr. 4 Množství HRS ke konci roku 2016, 2018 a k srpnu roku 2020 v Evropě [13,20,21]

Fig. 4 Number of HRS at the end of 2016, 2018 and August 2020 in Europe [13,20,21]

Tab. 2 Množství HRS ke konci roku 2016, 2018 a k srpnu roku 2020 v Asii [13,20,21]

Tab. 2 Number of HRS at the end of 2016, 2018 and August 2020 in Europe Asia [13,20,21]

Stát	2016	2018	2020
Japonsko	80	100	140
Jižní Korea	6	14	40
Čína	3	15	33
Indie	4	2	2
Tchaj-wan	-	1	1

Tab. 3 Množství HRS ke konci roku 2016, 2018 a k srpnu roku 2020 v Severní Americe [13,20,21]

Tab. 3 Number of HRS at the end of 2016, 2018 and August 2020 in North America [13,20,21]

Stát	2016	2018	2020
USA	48	63	67
Kanada	2	7	7

Na konci roku 2018 bylo celkem ve světě zaregistrováno 12 952 vozidel poháněných vodíkovým systémem. Většina těchto vozů byla pro osobní dopravu. V roce 2020 se počet registrovaných vozů poháněných vodíkem oproti roku 2018 téměř zdvojnásobil a dosáhl počtu téměř 23 000. Nejvyšší množství bylo osobních automobilů využívajících palivové články (FC), kterých bylo k červnu 2020 celkem registrováno více než 18 500. Nejvíce FCEV bylo registrováno v Severní Americe (8 590) s tím, že většina vozů připadá na Kalifornii [22]. V Asii bylo registrováno 8 551 FCEV vozidel, ze kterých byla více jak polovina registrována v Jižní Koreji (5 068) a další téměř 3 500 připadají na Japonsko [22]. Na Evropu pak připadá pouze 1 407 vozů, ze kterých byla většina registrována v Německu a Francii [23].

V srpnu 2020 bylo v provozu téměř 3 000 autobusů FCEB. Naprostá většina těchto autobusů (2 800) je v pro-

vozu v Číně. Ta se zaměřuje na začlenění vodíkové dopravy do hromadné a nákladní dopravy. Celkové množství provozovaných nákladních vozů s palivovým článkem k září 2020 bylo 1 220. Z toho 1 200 bylo registrováno v Číně. Jinde ve světě se jedná primárně o prototypové testování [23].

Palivové články nalézají uplatnění také v oblasti průmyslově využívaných vysokozdvizných vozíků. Po světě jich bylo k září 2020 v provozu téměř 34 000. Z toho 33 000 v USA [23]. Za zmínku stojí také vlaky s elektropohonem poháněným vodíkovým FC. V komerčním provozu pro osobní dopravu jsou od září 2018 provozovány dva vodíkové vlaky společností Alstom Coradia iLint, které nyní jezdí v Dolním Sasku v Německu mezi městy Cuxhaven, Bremerhaven, Bremerförde a Buxtehude. Německo má dále podepsaný kontrakt na dodání dalších 14 vlakových souprav o ceně 81 mil. Eur, které by se měly začlenit do provozu k prosinci 2021 [17]. Další vlak společnosti Alstom Coradia iLint 1. prosince 2020 dokončil tříměsíční zkušební lhůtu v Rakousku na geograficky náročných trasách [24]. Dle výzkumu by finanční návratnost 20 vodíkových vlakových souprav při pořízení jedné plnicí stanice se zásobovací kapacitou 4 000 kg denně byla přibližně 9 let, za předpokladu ceny elektrické energie pod 0,06 USD/kWh a 7200 hodin provozu vlakových souprav ročně [16,24,25].

Hydrogen Council očekává k roku 2050 ve světě celkem 400 milionů osobních automobilů poháněných vodíkem, 15 až 20 milionů nákladních automobilů a 5 milionů autobusů využívajících vodíkové palivové články [7, 26].

V roce 2020 se nárůst množství FCEV výrazně zpomalil, a to zejména z důvodu koronavirové pandemie. Například v USA za rok 2020 přibylo 937 vozů. Jedná se o méně než polovinu v porovnání s rokem 2019, kdy přírůstek vozů činil 2089. Během roku 2021 za první čtvrtletí přibylo již 1030 vozů FCEV, z toho 759 v březnu, což je historicky nejvyšší měsíční nárůst [27].

3. Srovnání účinnosti

Pro srovnání účinnosti různých druhů motorů je třeba vypočítat celkovou účinnost přeměny chemické energie ve vstupu (neupravené palivo) na mechanickou energii pohybu kol vozidla. Tato účinnost se nazývá Well to Wheel (WtW). Její výpočet v sobě zahrnuje účinnost výroby paliva (Well to Tank – WtT) a účinnost automobilu (Tank to Wheel – TtW) [28].

Účinnost výroby paliva (WtT) se skládá z účinnosti procesu těžby, dopravy do rafinerií, energie potřebné k jejich separaci a z distribuce do cílových míst spotřeby. Mezi ztráty energie na vozidle (TtW) patří účinnost motoru, převodovky a dalších dílčích členů [28].

Vodík lze vyrábět různými procesy, jak je popsáno v úvodu. Účinnost procesu jeho výroby primárně závisí na použité metodě. Pokud je pro výrobu vodíku použita metoda parního reformingu, je účinnost výroby vodíku 72 %. Tato účinnost je vypočítána z účinnosti parního reformingu, která se pohybuje okolo 80 %, a z účinnosti

procesu získávání zemního plynu z ložisek, která přesahuje 90 % [28,29].

Do výroby vodíku pomocí elektrolýzy je třeba zahrnout účinnost procesu těžby, dopravy i zpracování primární energetické suroviny pro výrobu elektrické energie. Pro stávající energetický mix se účinnost výroby elektrické energie pohybuje v rozmezí 30 až 35 %. Samotná elektrolýza probíhá s účinností přibližně 85 %. Celková účinnost výroby vodíku elektrolýzou se potom pohybuje v rozmezí 25 až 30 %. Tento výpočet nepočítá s využitím elektrolyzérů jako kompenzačních těles pro stabilizaci elektrické přenosové soustavy [28].

Nezávisle na způsobu výroby vodíku je třeba započítat také ztráty na stlačení, případně zkapalnění, které se pohybují v rozsahu 30 až 35 % [28].

Těžbou ropy (výdaje na těžební stroje, jejich funkci, předčištění) a její následnou rafinaci a dělením na jednotlivé produkty dojde k poklesu energetického obsahu těžného zdroje o 12 %. Přibližně 5 % energetického obsahu je spotřebováno při převážení ropy a distribuci jednotlivých ropných frakcí. WtT účinnost při využití ropných zdrojů se celkově pohybuje okolo 84 %. Předpokládá se, že účinnost procesu těžby ropy se v průběhu let bude snižovat v důsledku náročnější těžby, snižování množství ropných zdrojů a zvyšující se poptávky po palivech. Souhrn WtT účinností je uveden v tabulce 4 [28,29].

Tab. 4 Souhrnná tabulka účinností WtT pro různé energetické zdroje [28,29]

Tab. 4 Summary table of WtT efficiencies for different energy sources [28,29]

Produkt	Účinnost					
	Těžba [%]	Výroba [%]	Logistika [%]	Komprese / Nabíjení [%]	WtT [%]	
Ropná paliva	95	92	95	–	84	
Vodík	elektrolýza	25–30	95	70	17–20	
	reforming	90	80	95	70	43
	termochemický	–	55–60	95	70	30–33
El. Energie (pro baterie)	–	30–35	90	90	27–31	

Účinnost motorů se odvíjí od dvou základních kritérií. Prvním je konstrukce daného motoru. Dalším důležitým specifikačním parametrem jsou podmínky provozu. Například kopcovitost terénu, četnost rozjezdů, otáčky motoru, váha vozidla a další. Celková účinnost spalovacího motoru se potom pohybuje v rozmezí 25 až 35 % [28,30].

Nejvyšší celkové účinnosti (WtW) dosahují spalovací motory poháněné fosilními palivy (viz tabulka 5). Fosilní paliva jsou levným a efektivně získávaným zdrojem energie. Palivové systémy využívající vodík dosahují nízké celkové účinnosti. Nejnížší WtW účinnost mají spalovací motory na vodík. O něco vyšší účinnost mají motory využívající elektromotor zásobovaný vodíkovým palivovým článkem [28].

Tab. 5 Souhrnná tabulka účinností WtW [28]**Tab. 5** Souhrnná tabulka účinností WtW [28]

Palivo (koncept)	Účinnost		
	WtT [%]	TtW [%]	WtW [%]
Vodík – elektrolýza (FC + elektromotor)	17–20		6–8
Vodík – reforming (FC + elektromotor)	43	33–41	14–18
Vodík – termochemicky (FC + elektromotor)	30–33		10–14
Vodík – elektrolýza (spalovací motor)	17–20		3–5
Vodík – reforming (spalovací motor)	43	20–25	9–11
Vodík – termochemické (spalovací motor)	30–33		6–8
Elektrická energie (bateriový elektromotor)	27–31	66	18–20
Fosilní paliva (spalovací motor)	84	20–25	18–21

4. Výhody a nevýhody využití vodíku v dopravě

Vodíková mobilita má v sobě zejména z pohledu ekologie vysoký potenciál. Při jejím využití je však nutné zvážit široké spektrum potenciálních nebezpečí a problémů, které může přinést [13].

4.1. Výhody

O vodíku se často mluví v souvislosti s uhlíkovou neutralitou a se snahou o ekologizaci dopravy. Využití vodíku v dopravě by mohlo pomoci při plnění závazků vůči Evropské unii, které jsou momentálně uvedeny k roku 2050 [26].

Díky variabilitě výroby vodíku je možné zamezit závislosti na jedné surovině a její dopravě, což vede ke snížení náchylnosti na nárazovou změnu ceny. Pokud je jako surovina pro jeho výrobu využita voda, jedná se o uzavřený cyklus. Výroba vodíku elektrolýzou vody může napomoci stabilizovat elektrickou přenosovou soustavu, která v budoucnosti bude podléhat výkyvům napětí z důvodu vyššího využívání energetických zdrojů s nestálou produkcí elektrické energie (větrné a sluneční elektrárny). Vodík v tomto případě může sloužit jako akumulační médium. Hlavní využití najde tato akumulační technika v zajištění energetických zdrojů pro tzv. ostrovní systémy [13,16,17].

Při využití vodíku v dopravě nevznikají žádné lokální emise CO₂, NO_x, SO₂, CO ani uhlovodíků (TOC). To může prospět oblastem s vysokým dopravním zatížením. Vozidla FCEV mají momentálně dojezd více než 500 km na jeden objem nádrže. Z technologického hlediska je třeba zmínit, že doba plnění nádrže je srovnatelná s konvenčními palivy (benzín, motorová nafta, LPG,

CNG) přibližně 3–5 minut, což dává vodíkovému pohonu výhodu v porovnání s elektromobily. Naopak výhodou elektromotoru, ať už v kombinaci s palivovým článkem nebo z baterií, oproti přímému spalování vodíku je dobrá akcelerace a vyšší WtW účinnost. Elektromotory jsou schopné okamžitě po nastartování zajistit tichou, plynulou, přesnou jízdu a dosahují vysoké TtW účinnosti [13,28].

Existují mezinárodní standardy, které definují základní požadavky na veřejné vodíkové plnicí stanice (tvar hubice, rychlost plnění, ale i minimální kapacitu nádrže). Díky tomu je vytvořena jednotná infrastruktura a lze předcházet problémům s dálkovým a mezinárodním cestováním vodíkovými dopravními prostředky. Navíc je vodík momentálně běžně obchodovaným technickým plynem a má vyřešenou základní logistiku dopravy [13].

K zavedení vodíkové dopravy v ČR je možné využít zkušeností ze zahraničí. Dále kromě automobilové a autobusové dopravy může v ČR nalézt vodíková doprava uplatnění i v kolejové dopravě. Vodíkovými vlaky s palivovými články je možné nahradit dieselové vlakové soupravy jezdící po neelektrifikovaných železničních tratích [13,31].

4.2. Nevýhody

Existují nevýhody, které mohou ohrozit zavedení vodíkové dopravy do praxe. Jedná se například o negativní předsudky ze strany veřejnosti související s nebezpečností vodíku. Vodík má mnoho nepříznivých fyzikálně chemických vlastností. Mezi ně patří široká mez výbuchu nebo například velice nízká teplota varu za normálního tlaku. S nízkou teplotou varu souvisí ekonomicky a technologicky náročné zkapalňování vodíku. Z důvodu náročného zkapalňování jsou nádrže vodíkových vozidel konstruovány na vodík v plynném stavu. Kvůli vysokému objemu plynné fáze a konstrukcí vozidla omezené velikosti tlakových nádrží je dojezdová vzdálenost vodíkových automobilů na jeden objem nádrže nižší, než je tomu u vozů na konvenční paliva. Mezi další nevýhody vodíkových automobilů v porovnání s vozy na fosilní paliva patří nižší WtW účinnost a vysoká cena. Vodíkové automobily jsou i v případě sériové výroby cenově dražší oproti konvenčním vozům se srovnatelnými parametry. Tržní cena vodíku je do budoucna také nejasná, protože v případě nárůstu zájmu by se jeho momentálně nízká cena mohla značně navýšit [13,28].

Trh s vodíkovými automobily zatím vzniká pouze v technologicky nejvyspělejších zemích, které mají zvládnutou jak legislativu, tak infrastrukturu profesionálně obsluhovaných HRS. V České republice je zprovoznění prvních dvou veřejných HRS zatím plánované na rok 2021 [13,14,16,17].

5. Závěr

Hlavní motivací pro využití vodíku v dopravě jsou jeho nulové lokální emise. Díky tomu se jedná o vhodný způsob snížení emisí pevných prachových částic a skle-

níkových plynů ve městech s vysokým dopravním zatížením. Pro fungování vodíkové dopravy je však třeba zajistit udržitelný a ekologický zdroj vodíku. Zdrojem vodíku do budoucna bude pravděpodobně elektrolýza vody, která by měla sloužit jako kompenzační systém výkyvů napětí v elektrické přenosové soustavě. Výkyvy napětí v ČR bude pravděpodobně způsobovat Německo, se kterým je naše síť přímo propojena. Důvodem těchto výkyvů bude větší využití obnovitelných zdrojů energie s nestálou produkcí elektrické energie (větrné a solární elektrárny). V České republice se pro účely dopravy prozatím uvažuje o využití přebytečného vodíku, který vzniká jako vedlejší produkt průmyslových procesů zpracovávajících fosilní zdroje energie.

Vodíkové automobily s palivovými články dosahují vysoké TtW účinnosti. Jejich celková WtW účinnost je však výrazně nižší než u spalovacích motorů využívajících konvenční fosilní paliva. WtW účinnost vodíkových vozidel s palivovými články je závislá na způsobu získávání vodíku a je nejvyšší při použití vodíku získaného parním reformingem fosilních zdrojů energie. Nejnižší celkové účinnosti dosahují vozy se spalovacím motorem na vodík.

Evropa má relativně vysoké množství HRS, ale množství vozidel s palivovými články tomu zatím neodpovídá. Například Amerika, která má méně než polovinu HRS v porovnání s Evropou, má téměř šestkrát vyšší počet provozovaných vozů poháněných palivovými články. V porovnání s Asií má Evropa pouze 12 % vozů poháněných palivovými články, a přitom má téměř 85 % počtu HRS. Z údajů o množství jednotlivých vozů poháněných palivovými články je patrné, že Čína se zaměřuje na autobusy a nákladní vozy, USA na vysokozdvizné vozíky a společně s Jižní Koreou na osobní automobily. V Evropě se předpokládá, že dojde k nahrazení diesellových vlakových souprav na neelektrifikovaných tratích za vodíkové.

V roce 2020 se světový rozvoj vodíkové dopravy výrazně zpomalil v důsledku koronavirové pandemie. I přes to NAP-CM předpokládá v České republice do roku 2030 nárůst HRS na 80, FCEV na téměř 60 000 a FCEB na téměř 900. Lze očekávat, že s masivním zavedením vodíkové dopravy bude postupně klesat pořizovací cena vozidel využívajících palivové články.

Seznam zkratk:

CCS	Carbon capture and storage	Zachytávání a ukládání oxidu uhličitého
CEF	Connecting Europe Facility	Nástroj pro propojování Evropy
CNG	Compressed natural gas	Stlačený zemní plyn
FC	Fuel cell	Palivový článek
FCEB	Fuel cell electric bus	Autobus s elektromotorem poháněným vodíkovým palivovým článkem

FCEV	Fuel cell electric vehicle	Vozidlo s elektromotorem poháněným vodíkovým palivovým článkem
HRS	Hydrogen refilling station	Vodíková plnicí stanice
NAP-CM		Národní akční plán čisté mobility
LPG	Liquid petroleum gas	Zkapalněný ropný plyn
PSA	Pressure swing adsorption	Adsorpce za změny tlaku
TOC	Total organic carbon	Celkový organický uhlík
TtW	Tank to Wheel	Účinnost automobilu
USD	United states dollar	Americký dolar
WtT	Well to Tank	Účinnost výroby paliva
WtW	Well to Wheel	Účinnost přeměny chemické energie paliva na mechanickou energii pohybu kol vozidla

Literatura

- KOTHARI, R. et al. Comparison of environmental and economic aspects of various hydrogen production methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **2008**, sv. 12, č. 2, s. 553-563. ISSN 1364-0321.
- NIKOLAIDIS, P. a POUILLIKAS, A. A comparative overview of hydrogen production processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **2017**, sv. 67, s. 597-611. ISSN 1364-0321.
- SÜRER, G. S. a ARAT, H. T. State of art of hydrogen usage as a fuel on aviation. *European Mechanical Science*, **2018**, sv. 2, č. 1, s. 20-30.
- World gross electricity production by source, **2020**. IEA. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/world-gross-electricity-production-by-source-2018> (accessed Oct 23, 2020).
- LI, B. et al. Pressure swing adsorption/membrane hybrid processes for hydrogen purification with a high recovery. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, 2016, sv. 10, č. 2, s. 255-264. ISSN 2095-0179.
- HASSMANN, K. a KÜHNE, H.-M. Primary energy sources for hydrogen production. *international journal of hydrogen energy*, **1993**, sv. 18, č. 8, s. 635-640. ISSN 0360-3199.
- Renewable power generation cost in 2019, **2020**. International renewable energy agency.

- <https://www.irena.org/publications/2020/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2019> (accessed Oct 23, 2020).]
8. Energy prices 2020, **2020**. IEA. <https://www.iea.org/reports/energy-prices-2020> (accessed Oct 23, 2020)
 9. VILLAFÁN-VIDALES, H. I. et al. Hydrogen from solar thermal energy. In *Solar Hydrogen Production*. Elsevier, **2019**, s. 319-363.
 10. GLENK, G. a REICHELSTEIN, S. Economics of converting renewable power to hydrogen. *Nature Energy*, **2019**, sv. 4, č. 3, s. 216-222. ISSN 2058-7546.
 11. KAYFECI, M. et al. Hydrogen production. In *Solar Hydrogen Production*. Elsevier, **2019**, s. 45-83.
 12. Die Nationale Wasserstoffstrategie, **2020**. Bundesministerium für wirtschaft und energie. https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=16 (accessed Nov 05, 2020).
 13. HYTEP.CZ Studie – Využití vodíkového pohonu v dopravě v České republice **2017**. HYTEP. <https://www.hytep.cz/images/dokumenty-ke-stazeni/Studie-Vyuziti-vodikoveho-pohonu-v-doprave-v-Ceske-republice.pdf>
 14. UNIPETROL UZAVŘEL SMLOUVU SE SPOLEČNOSTÍ BONETT O INSTALACI TŘÍ VODÍKOVÝCH STOJANŮ NA ČERPACÍCH STANICÍCH BENZINA, **2020**. bonett. <https://bonett.cz/aktuality/unipetrol-uzavrel-smlouvu-se-spolecnosti-bonett-o-instalaci-tri-vodikovych-stojanu-na-cerpacich-panicich-benzina> .
 15. The Connecting Europe Facility, **2019**. European Commission. https://ec.europa.eu/inea/sites/inea/files/cefpub/cef_implementation_brochure_2019.pdf (accessed Nov 01, 2020).
 16. Aktualizace NAP CM, **2020**. Ministerstvo průmyslu a obchodu. <https://www.mpo.cz/cz/prumysl/zpracovatelsky-prumysl/automobilovy-prumysl/aktualizace-narodniho-akcniho-planu-ciste-mobility--254445/> (accessed Sept 27, 2020).
 17. Příloha aktualizace NAP CM, **2020**. Ministerstvo průmyslu a obchodu. <https://www.mpo.cz/cz/prumysl/zpracovatelsky-prumysl/automobilovy-prumysl/aktualizace-narodniho-akcniho-planu-ciste-mobility--254445/> (accessed Sept 27, 2020).
 18. Mapa české dálniční sítě, **2020**. ceskedalnice.cz. <http://www.ceskedalnice.cz/dalnicni-sit/> (accessed Oct 01, 2020).
 19. Evropský parlament a rada evropské unie SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY 2014/94/EU. Úřední věstník Evropské unie [Online] 2014. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=CELEX%3A32014L0094> (accessed Oct 20, 2020).
 20. IEA-TECHNOLOGY-COLLABORATION-PROGRAMME AFC TCP, **2019**. Survey on the Number of Fuel Cell Vehicles, Hydrogen Refueling Stations and Targets. http://www.ieafuelcell.com/fileadmin/publications/2019-04_AFC_TCP_survey_status_FCEV_2018.pdf, (accessed Sept 27, 2020).
 21. Hydrogen Refuelling Stations Worldwide, **2020**. <https://www.h2stations.org> (accessed Sept 27, 2020).
 22. By the numbers, **2020**. California fuel cell partnership. https://cafcp.org/by_the_numbers (accessed Sept 27, 2020).
 23. International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy. <https://www.iphe.net/partners> (accessed Sept 27, 2020).
 24. Alstom's hydrogen train successfully completes three months of testing in Austria, **2020**. <https://www.alstom.com/press-releases-news/2020/12/alstoms-hydrogen-train-successfully-completes-three-months-testing> (accessed Apr 28, 2021).
 25. GUERRA, C. F. et al. Sustainability of hydrogen refuelling stations for trains using electrolyzers. *international journal of hydrogen energy*, **2020**. ISSN 0360-3199.
 26. The European green deal, 2019. European commission. https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/european-green-deal-communication_en.pdf (accessed Oct 25, 2020).
 27. FCEV Sales Data sheet, **2020**. California fuel cell partnership. <https://cafcp.org/sites/default/files/FCEV-Sales-Tracking.pdf> (accessed Dec 7, 2020).
 28. DLOUHÝ, P. a JANÍK, L. Účinnost, **2007**. <https://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/vyuziti-vodiku/637-ucinnost>.
 29. HEKKERT, M. P., HENDRIKS, F. H., FAAIJ, A. P., & NEELIS, M. L., **2005**. Natural gas as an alternative to crude oil in automotive fuel chains well-to-wheel analysis and transition strategy development. *Energy policy*, 33(5), 579-594.
 30. FIRST, J. Energetická analýza pozemní dopravy. Praha: České vysoké učení technické v Praze, **2014**.
 31. Technologický foresight a implementační akční plán využití vodíkových technologií pro čistou mobilitu - verze 2020, **2020**. HYTEP. <https://www.hytep.cz/images/dokumenty-ke-stazeni/technologicky-forsight-a-implementacni-akcni-plan-vyuziti-vodikovych-technologiei-pro-cistou-mobilitu.pdf> (accessed Nov 06, 2020).

Summary

Hydrogen for transport

Kateřina Vondráková, Tomáš Hlinčík

In recent years, efforts to use environmentally friendly resources and minimizing environmental impacts throughout the life cycle of products. The important

point is that greening and reducing emissions from energy industry and transport. If we focus on emissions from transport, these are mainly CO₂, NO_x and particulate emissions. These emissions arise mainly from the use of fossil fuels. In the transport sector, local CO₂, NO_x and particulate emissions can be reduced by introducing hydrogen mobility that does not produce these emissions and can be based on renewable energy sources. The contribution shows that the overall efficiency of the conversion of chemical energy into mechanical energy of the vehicle's wheel movement, the so-called Well to Wheel (WtW) is the highest in the case of petroleum fuels (84%). The lowest efficiency WtW is in the case of hydrogen produced from water electrolysis. When assessing the overall efficiency WtW (fuel and utilization) is the highest value (18–21 %) in the case of a combination of fossil fuel and the combustion engine. The lowest value of the total efficiency is for the combination of hydrogen produced by electrolysis of water and the combustion engine (3–5 %).