

SOUČASNÝ STAV A VYUŽITÍ VODÍKOVÝCH TECHNOLOGIÍ

PETRA DVOŘÁKOVÁ RUSKAYOVÁ,
ANNA TOCHÁČKOVÁ a MARTIN ŠILHAN

Centrum Výzkumu Řež s.r.o., Hlavní 130, 250 68 Husinec-
Řež

Petra.Ruskayova@cvrez.cz

Došlo 25.6.20, přijato 5.10.20.

Klíčová slova: vodík, technologie, palivový článek,
elektrolýza

Obsah

1. Úvod
2. Současné vodíkové technologie
 - 2.1. Výroba vodíku
 - 2.2. Využití vodíku
3. Budoucnost vodíkových technologií
4. Aplikace vodíkových technologií
 - 4.1. Využití v dopravě
 - 4.2. Využití v teplárenství
 - 4.3. Využití pro výrobu elektrické energie
 - 4.4. Průmyslové využití
5. Závěr

1. Úvod

Cílem publikace je seznámit čtenáře s potenciálem vodíku coby významného energetického nosiče. Zvýšení jeho významu lze očekávat s postupující dekarbonizací dopravy a rozšířením obnovitelných zdrojů v energetice a jejich spojením s vodíkovými technologiemi. Výhodou

moderních vodíkových technologií je plná lokální bezemisnost a potenciální bezemisnost v rámci životního cyklu, pokud je vodík vyroben v nízko- nebo bezemisním zdroji, popřípadě, pokud je vznikající CO₂ zachycen a uložen. Masivnímu nasazení technologií dnes brání jejich vysoká cena, nízká životnost nebo neexistence harmonizované technické legislativy v celé EU. Ve střednědobé budoucnosti očekáváme širší nasazení vodíkových technologií v sektorech energetiky, dopravy a průmyslu především z důvodu očekávaného poklesu cen elektrolyzérů z důvodu velkosériové výroby.

2. Současné vodíkové technologie

2.1. Výroba vodíku

Vodík je možné vyrábět mnoha různými způsoby (viz tab. I), avšak některé tyto technologie produkují vysoké množství skleníkových plynů².

Parní reforming zemního plynu je nejrozšířenější a obvykle nejlevnější technologií průmyslové výroby vodíku. Jedná se o chemickou reakci methanu s vodní párou. Jako katalyzátor se nejčastěji používá NiO na aluminiovém nosiči. Nevýhodou parního reformingu je produkce 7 kg CO₂ na 1 kg H₂ (cit.³). Z nízkoemisních technologií výroby vodíku je dnes nejvíce využívána elektrolyza vody.

Elektrolýza vody

Elektrolýzu vody rozlišujeme podle provozní teploty na nízkoteplotní a vysokoteplotní a podle typu použitého elektrolytu na: alkalickou (AEL), s protonově selektivní membránou (PEM) a s pevnými oxidy (SOEC). K elektrochemickému rozkladu vody dochází pomocí stejnosměrného elektrického proudu, vyvíjí se tak vodík a kyslík⁴. Nejstarším typem je alkalická elektrolyza s nejvyšší úrovní připravenosti technologie (TRL 9)⁵, kde

Tabulka I
Technologie výroby vodíku¹

Technologie	Teplota [°C]	Tlak [MPa]	Účinnost [%]
Parní reforming zemního plynu	500–950	0,3–2,5	65–80
Parciální oxidace	<1500	3–8	60–80
Zplyňování uhlí	1000–2000	0,1–3	40–80
Elektrolýza vysokoteplotní	700–1000	0,1	90–95
Elektrolýza nízkoteplotní	<100	0,1	80–92
Siřičito-jodový thermochemický cyklus	800–1000	0,1	40–52
Zplyňování biomasy	800–1000	0,1–0,5	35–50

je elektrolyt tvořen roztokem KOH, popř. NaOH, o koncentraci 20–40 hm.% (cit.⁶) a zprostředkuje transport OH⁻ iontů mezi elektrodami. Elektrody jsou tvořeny perforovaným kovem – slitinou s vysokým obsahem niklu, nebo ocelí a katalytickým kovem (viz tab. II). Prostory obou elektrod jsou odděleny přepážkou, která slouží k oddělení kyslíku a vodíku⁶. AEL je komerčně zralá a poměrně levná technologie, proto je v průmyslu často využívanou variantou elektrolyzy vody. Její nevýhodou je nižší čistota vodíku, energetická náročnost a horší odezva na požadavek zvýšení výkonu (daná nutností ohřátí velkého množství elektrolytu při studeném startu).

Nízkoteplotní elektrolyzátor s protonově selektivní membránou (TRL 6)⁵ si vysloužil výraznou pozornost díky své jednoduchosti a dobrým dynamickým vlastnostem. Základem PEM elektrolyzátorů je pevný elektrolyt, který odděluje elektrodové prostory a slouží k transportu H⁺ iontů. Elektrochemické reakce zde probíhají v katalytické vrstvě plynově difuzních elektrod⁶. Tyto elektrody jsou zpravidla tvořeny porézními uhlíkovými materiály. Využívání drahých kovů jako katalyzátorů (viz tab. II) výrazně navyšuje cenu PEM elektrolyzátorů.

Nejmladší a jedinou vysokoteplotní technologii elektrolyzy vody je elektrolyza s pevnými oxidy (TRL 5)⁵. Elektrolyzátor používá pevný keramický elektrolyt, který slouží k transportu O²⁻ iontů⁶. Vysoká provozní teplota je nutná k dosažení dostatečné iontové vodivosti použitých materiálů⁷. Výhodou vysokoteplotní elektrolyzy je dodávání části energie potřebné pro rozklad vody ve formě tepla, které bývá obvykle podstatně levnější než elektrická energie, dalšími výhodami jsou absence drahých potenciálně obtížně dostupných materiálů, rychlá kinetika elektrodových reakcí a schopnost pracovat v reverzním módu. Proto se demonstrační projekty s SOEC často spojují s procesy, při kterých vzniká vyšší množství odpadního tepla. Nevýhodou této technologie stále zůstává nízká životnost a vysoká cena.

2.2. Využití vodíku

Možnou technologii využití vodíku je palivový článek (FC), který přeměňuje chemickou energii vodíku na energii elektrickou. Na FC se nevztahuje omezení tepelné účinnosti Carnotova cyklu a účinnost, vztážená na výhřevnost

paliva, běžně přesahuje 40 %. Používané palivové články se dělí na články s alkalickým elektrolytem, PEM články, články s kyselinou fosforečnou (PAFC), s tavenými uhličitany (MCFC) a s pevnými oxidy (SOFC).

Alkalické palivové články jsou obdobou AEL. Těchto článků bylo užíváno v 2. světové válce v britských ponorkách a také v projektu NASA Apollo⁸. Provozní teplota se pohybuje v rozmezí 20–90 °C a proces dosahuje účinností 60–70 % (cit.⁸). Jedná se však o již poměrně starou technologii s bezpečnostním rizikem úniku koncentrovaného roztoku hydroxidu.

PEM palivové články jsou v současnosti nejvyužívanější. Jsou kompaktní, jednoduché na provoz a mají relativně dlouhou životnost. Elektrolyt je stejný jako u PEM elektrolyzátoru. Pracují za teploty 40–80 °C a dosahují účinnosti 45–60 % (cit.⁸). Proton-výměnná membrána zajišťuje flexibilitu provozu a umožňuje jejich využití např. v osobních automobilech. Nevýhodou je vysoká citlivost na CO z důvodu přítomnosti platinových kovů.

V PAFC slouží jako elektrolyt kyselina fosforečná fixovaná v organické nebo anorganické matici. Provozní teplota PAFC je vyšší než u předchozích (150–220 °C). Výhodou procesu je, že při teplotě přes 180 °C použitým platinovému katalyzátoru nehrozí otrava CO. Účinnost se pohybuje okolo 40 %, při využití v kogeneračních jednotkách až 85 % (cit.⁸).

MCFC mají provozní teplotu 600–700 °C a jako elektrolyt využívají eutektickou směs alkalických uhličitánů. V MCFC nejsou potřeba drahé katalyzátory, nepotřebují tedy čisté palivo a jako palivo se používá spíše biomethan a syntézní plyn. Elektrolytem je nejčastěji Li₂CO₃. Výhodou těchto článků je vysoká vodivost, kterou zajišťují CO₃²⁻ ionty. Jejich účinnost se pohybuje okolo 60 %, při využití v kogeneračních jednotkách až 85 % (cit.⁸).

SOFC mají stejné materiálové složení a provozní teploty jako SOEC – často se jedná o identické zařízení, kde je možné „přepínat“ mezi módem palivového článku a módem elektrolyzátoru. Nevýhodami SOFC jsou nižší výkon palivového článku v porovnání s provozem v módu SOEC, vysoká pořizovací cena zařízení, nízká životnost a dlouhá doba studeného startu⁹. SOFC jsou vysokoteplotní články pracující při 800–1000 °C (cit.⁹). Vysoká teplota umožňuje jejich využití v kogeneračních jednotkách, kde mohou dosáhnout účinnosti přes 70 % (cit.⁸).

Tabulka II
Příklady jednotlivých elektrolyzátorů⁶

Parametr	Elektrolyzátor		
	AEL	PEM	SOEC
Membrána / přepážka	NiO	polymerní, např. trifluormetylsulfonová kyselina	Pevné oxidy (Gd/CeO ₂)
Elektrolyt	KOH, NaOH	polymerní, např. trifluormetylsulfonová kyselina	ZrO ₂ /Y ₂ O ₃ /Sc ₂ O ₃
Katoda	Ni, Fe, Pt/C	Pt/C	Ni-ZrO ₂ /Y ₂ O ₃
Anoda	Ni, Fe, Pt/C	Ti, Ir, Ru, Pt	La ₂ O ₃ /SrO/Co _x Fe _y O _z
Provozní teplota, °C	60–90	70–100	500–1000
Účinnost, %	62–82	67–82	<95

3. Budoucnost vodíkových technologií

PEM FC jsou zkoumány v souvislosti s nasazením např. v kogeneračních jednotkách a mají velké využití ve vodíkových dopravních prostředcích. Největšími překážkami v komerčním rozšíření PEM FC jsou stále jejich životnost a vysoká cena¹⁰.

V oblasti materiálu a komponent pro PEM FC jsou zkoumány např. nové materiály k výrobě bipolárních desek. Tradičně jsou vyráběny z grafitu, ten je však křehký a nevhodný pro sériovou výrobu¹⁰, je tedy snaha vyvinout bipolární desky z kovů. Hlavním nedostatkem kovů je náchylnost ke korozi v kyselém prostředí¹⁰. Polymerní membrány využívané v PEM FC a elektrolyzérech musí být dostatečně hydratovány, aby správně fungovaly. Dow Company a Solvay proto vyvinuly membrány s krátkými postranními řetězci¹¹. Bylo také navrženo zakomponovat do struktury membrány hygroskopické látky, například SiO₂ nebo TiO₂ (cit.¹²). Dále jsou zkoumány sulfonované uhlovodíky jakožto levná náhrada v současnosti drahých materiálů, jako např. polyetherketonová¹³ vlákna nebo polybenzimidazol¹⁴, který by měl být využíván ve vysokoteplotních PEM FC. Výzkum v oblasti elektrod se zaměřuje především na snížení množství použité Pt, případně na nalezení alternativních katalyzátorů¹⁰.

Zajímavou technologií jsou reverzibilní PEM FC, kde jedno zařízení funguje buď v módu elektrolyzáru, nebo v módu palivového článku¹⁵.

Jednou z vyvíjených vodíkových technologií jsou nízkoteplotní elektrolyzáry a palivové články z pevných oxidů (PC-SOC). Provozní teplota se u PC-SOC pohybuje mezi 400 a 700 °C (cit.⁷). Snížením provozní teploty dojde k celkovému snížení nákladů. Nižší provozní teplota zajišťuje benefity obvyklé u PEM článků, zatímco možnost využívání uhlíkatých surovin bez rizika otravy katalyzátoru CO je velkou výhodou SOFC. Mechanismus elektrochemické reakce je podobný jako u PEM, tedy transport H⁺. Největší rozdíl oproti SOFC/SOEC je v elektrolytu. PC-SOC má elektrolyt ve formě tuhého roztoku, například na bázi perovskitů. Jelikož se na vodíkové straně vyskytuje pouze vodík, je možné použít niklovou elektrodu, nejčastěji niklový cermet. U PC-SOC byla nejprve použita platino-vá kyslíková elektroda, kterou následně nahradily perovskity⁷. Při dopování různých perovskitů jinými prvky dochází ke zvýšení chemické stability, ale současně klesá protonová vodivost, nebo naopak. Výzkum se proto zaměřuje na materiály pro elektrolyt, které budou termodynamicky stabilní a protonově vodivé při provozní teplotě. Nejslibnější se zdají být perovskity BaCeO₃ a BaZrO₃ (cit.⁷).

Dalším rozvíjejícím se odvětvím SOEC je koelektrolýza, která umožňuje alternativní způsob získání paliv a chemických látek běžně získávaných z ropy. Koelektrolýza H₂O s CO₂ vzniká syntézní plyn¹⁶. Koelektrolýza umožňuje velmi efektivní využití elektřiny a tepla, poskytuje vysokou reakční rychlost a produkovaný syntézní plyn (CO/H₂) lze přeměnit pomocí Fischer-Tropschovy syntézy a bezemisních zdrojů energie na CO₂-neutrální uhlovodíky.

Možnou aplikací koelektrolýzy je také výroba amoniaku z H₂O a N₂. Cílem demonstračního projektu Delftské

technologické univerzity je dosáhnout účinnosti procesu 65–75 %, tedy výrazně vyšší účinnosti, než má Haberova-Boschova syntéza. Tato vysoká účinnost je potřebná pro ekonomickou realizovatelnost projektu a konkurenceschopnost současné výroby¹⁷. Společnost Haldor Topsøe představila v roce 2019 projekt výroby uhlíkově nízkemisního amoniaku. Využívá se zde 50kW SOEC jednotky k výrobě syntézní směsi pro Haberův-Boschův proces ze vzduchu, vody a elektrické energie z obnovitelných zdrojů (OZE)¹⁸.

Další výzkum se zabývá např. koelektrolýzou CO₂ a glycerolu, kdy glycerol zde může snížit spotřebu elektrické energie až o 53 % (cit.¹⁹), což může vést ke zlepšení ekonomiky elektrolýzy CO₂.

Mikrobiální palivové články jsou systémy, které využívají schopnost jednobuněčných prokaryotických organismů oxidovat organické látky za produkce elektřiny. Tento koncept má zatím celou řadu nedostatků, nízké výtěžky, citlivost mikroorganismů k anorganickým látkám, potřebu velkého množství nákladných materiálů a design reaktorů. Autoři očekávají, že hlavní motivací průmyslové aplikace konceptu nebude výroba elektřiny, ale spíše schopnost efektivního odstranění oxidovatelných organických látek z odpadních vod²⁰.

4. Aplikace vodíkových technologií

4.1. Využití v dopravě

Vodík může být prostředkem k úplné dekarbonizaci sektoru dopravy²¹. Z energetického hlediska je výhodnější vodík využívat v FC než jej spalovat – poměr výhřevnost/spalné teplo u vodíku je 0,83, při oxidaci vodíku ve spalovacích motorech vzniká pára, která odvádí 17 % tepelné energie vodíku. Dalším negativním aspektem spalování vodíku se vzduchem jsou vznikající emise NO_x.

Vodíkové autobusy

Evropská unie v roce 2018 poskytla dotaci 40 mil. € na demonstrační projekt s cílem výroby 600 vodíkových autobusů, které budou v provozu ve Velké Británii, Dánsku a Litvě. Dánsko, které obdrží 13 mil. € na pořízení 200 autobusů, bude také výrobcem plnicích stanic pro všech 600 vodíkových autobusů²². Očekává se, že jedna plnicí stanice (HRS) bude schopná obsloužit až 30 autobusů nebo 400–800 osobních vozidel²³.

Nákladní automobily

Vodíková mobilita se začíná pomalu rozvíjet i v silniční nákladní dopravě. Americká firma Nikola Motor Company uvedla na trh tahač Nikola One, který na jedno natankování ujede 800–1200 km (cit.²⁴). Pilotní projekt zahrnuje výstavbu a provoz sítě HRS v blízkosti dálnic i prvotních zákazníků v Kalifornii a Arizoně²⁵. Uvedená společnost plánuje vybudovat síť 700 HRS v USA a Kanadě do roku 2028. Prvních 14 stanic by mělo být uvedeno do provozu do roku 2021, každá s kapacitou 8 t H₂/den (cit.²⁶).

Vodíkový pohon je rozšiřován i do oblasti městských služeb. Na vývoji vodíkem poháněných vozů pro sběr odpadu spolupracují tři evropské projekty, jejichž cílem je ukázat, že vozy s palivovými články nabízejí potenciálně ekologičtější a tišší alternativu k běžným nákladním automobilům s naftovým motorem. Plánován je testovací provoz 15 nákladních automobilů s FC HyRange 45 (Proton Motor Power Systems) na osmi místech v Belgii, Nizozemsku a Itálii²⁷.

Vodíkové plnicí stanice

HRS se skládá ze základní jednotky, která musí obsahovat minimálně vysokotlaký zásobník a výdejní zařízení. V případě, že je vodík produkován přímo v místě tankování, je obvyklé, aby HRS obsahovala také středotlaký zásobník. Dalšími nezbytnými částmi jsou kompresor a chladicí systém (viz obr. 1). Kompresory vyrovnávají tlakový rozdíl mezi zásobníky (50–200 bar) a plnicím systémem (až 1000 bar)²⁸.

Pro zefektivnění stlačování vodíku je před plněním umístěna kaskáda několika nádrží s klesajícím tlakem. Aby nedošlo během tankování k přehřátí (podle protokolu SAE J2601 (cit.²⁹) by teplota v nádrži vodíkových vozidel neměla stoupnout nad 85 °C) nebo přetlakování palivové nádrže vozidla, je vodík před tankováním chlazen, v případě osobních vozidel (tlak v nádrži 700 bar) zpravidla na –40 °C (cit.²⁸).

Přes všechny komplikace s dopravou vodíku a jeho skladováním jsou HRS postupně rozmisťovány po celém světě. V současné době je celosvětově v provozu více než 300 HRS (cit.³⁰). Aktuální plány členských států EU (stanovené coby cíle dle požadavku směrnice 2014/94/EU) počítají s tím, že do roku 2025 by v zemích EU mělo vzniknout více než 750 HRS. V rámci Evropské unie je patrně nejvýznamnějším tahounem vodíkové mobility Německo (přes 80 stanic k únoru 2020, cit.³¹).

Za podpory Operačního programu Doprava by do roku 2021 v ČR měly vzniknout minimálně 4 veřejné vodíkové stanice v Praze, Brně, Ostravě a Litvínově, což zaručí minimalistické základní pokrytí ČR pro rozvinutí vodíkové dopravy³².

4.2. Využití v teplotě

Kogenerační jednotky (CHP) jsou zařízení na kombinovanou výrobu elektřiny a tepla. Technologie využívané v CHP zahrnují také FC. Jako mikrokogenerační jednotky

(μ CHP) jsou označována zařízení s elektrickým výkonem do 50 kW a jsou využívány v obytných budovách, případně menších komerčních budovách. Elektrická účinnost jednotek s PEM FC je okolo 35 %, tepelná účinnost dosahuje 57 % (cit.³³). U SOFC je uváděna elektrická účinnost 60 % a tepelná účinnost okolo 30 % (cit.³⁴).

Palivové články typu PEM jsou hojně rozšířené díky svým dobrým dynamickým vlastnostem. CHP je možné využívat jako záložní zdroje elektrické energie a tepla. Většina CHP nemá za surovinu čistý vodík, proto v jednotkách s PEM FC musí být také tzv. reformér, který převádí uhlovodíky obsažené v zemním plynu na vodík. Domácnosti tak mohou dosáhnout nezávislosti na připojení k distribuční síti elektrické energie. V ČR očekáváme zvýšení zájmu o tyto jednotky v souvislosti s několikrát avizovaným zvýšením fixních plateb za odběr elektrické energie na hladině nízkého napětí.

Na μ CHP se ve velkém zaměřuje např. Japonsko. V roce 2011 v důsledku zemětřesení, po kterém velká část Japonska byla bez dodávky elektřiny, došlo k výraznému rozvoji v tomto odvětví. Do roku 2012 bylo v Japonsku postaveno přes 25 000 jednotek. Koncem roku 2015 toto číslo stoupl na 138 000 μ CHP, z nichž 85 % využívá PEM FC a zbytek SOFC (cit.³⁵). K začátku roku 2019 bylo v zemi instalováno 292 654 kusů³⁶. μ CHP poskytují vodu o teplotě 60 °C a mohou být napájeny zemním plynem, vodíkem, propan-butanem nebo kerosinem.

4.3. Využití pro výrobu elektrické energie

V oblasti velkých stacionárních aplikací palivových článků dominují tři technologie: MCFC, PAFC a SOFC. Tato zařízení slouží jako zdroje elektrické energie nebo ke generaci tepla a elektřiny. Až 95 % z nich se nachází v Jižní Koreji a USA, nejspíše v důsledku dlouhodobých problémů s distribuční sítí³⁷. Kogenerační jednotky převažují v Asii, zatímco v USA se zaměřují spíše na FC coby záložní zdroje elektřiny³⁸.

Jižní Korea dominuje v oblasti PAFC s celkovým výkonem instalací 130 MW k roku 2018 (cit.³⁷).

MCFC jsou schopny díky své vysoké provozní teplotě zpracovávat bioplyn, jsou proto využívány např. ve spojení s čistírnou odpadních vod. Většina instalací ve světě je od firmy Fuel Cell Energy³⁷. V roce 2016 představily společnosti Fuel Cell Energy a Exxon Mobile projekt na testování zachytávání CO₂ pomocí MCFC (cit.³⁹). Tento koncept si firma Fuel Cell Energy patentovala pod označením



Obr. 1. Schéma vodíkové plnicí stanice

*Combined Electric Power and Carbon-dioxide Separation*⁴⁰, kdy je zpracováván CO₂ ze spalin v MCFC jako reaktant, díky čemuž dochází k jeho separaci a transportu do plynu vystupujícího z anodového prostoru.

SOFC jsou především v Japonsku a USA, kde se na jejich výrobu zaměřuje firma Bloom Energy³⁷. Provoz velkokapacitních FC je jak v USA, tak v Jižní Koreji podporován formou dotací a legislativy. V Jižní Koreji poskytuje vláda dotace v hodnotě až 80 % investičních nákladů⁴¹. Ve veřejných budovách také musí být využíván určitý podíl elektřiny z OZE (cit.³⁷). V USA je hlavní podíl velkokapacitních FC v Kalifornii a Connecticutu³⁷. I v těchto státech existují finanční dotace, přičemž v Connecticutu musí poskytovatelé elektřiny získávat určitý podíl elektrické energie z OZE⁴², palivové články jsou však v tomto státě považovány za OZE bez ohledu na použité palivo.

4.4. Průmyslové využití

Průmysl je v ČR největším výrobcem a spotřebitelem vodíku, téměř 72 % H₂ se spotřebuje v průmyslových chemických výrobcích. Největšími odběrateli jsou petrochemický a rafinérský průmysl, kde se H₂ využívá na výrobu NH₃ a CH₃OH, odsiřování ropných frakcí a hydrogenace.

Spolek pro chemickou a hutní výrobu od roku 2017 provozuje membránovou elektrolýzu s produkcí KOH, NaOH, Cl₂ a H₂. Celkové náklady na výstavbu činily 1,9 miliardy Kč (cit.⁴³).

Pro výrobu parním reformingem jsou kromě zemního plynu využitelné i různé odpadní plyny, jako jsou důlní plyny, plyny z uhelných slojí nebo skládkové plyny, a bioplyny. V Jižní Karolině se od roku 2014 vyrábí H₂ ze skládkového plynu a je následně využíván ve vodíkové dopravě⁴⁴. Z biomasových průmyslových odpadů lze vyrábět bioplyn, který je možné využít k produkci H₂. Bioplynové stanice na pivovarnickou biomasu jsou již provozovány ve Velké Británii (2010)⁴⁵ a v Lotyšsku (2006)⁴⁶.

Green Industry Hydrogen představuje evropský projekt zabývající se instalací elektrolyzérů v průmyslových odvětvích využívajících vodík. Pomocí tohoto projektu byl instalován elektrolyzér v ocelárně Salzgitter Flachstahl GmbH⁴⁷. Obdobný projekt H2FUTURE vyvinul 6MW nízkoteplotní PEM elektrolyzér pro přímou redukci železné rudy⁴⁸.

Alternátory mnoha turbogenerátorů jsou chlazeny vodíkem. Elektrárny v ČR vodík obvykle nakupují. Nenařaditelnou alternativou k nákupu vodíku je postavit v elektrárně vlastní elektrolyzér na výrobu vodíku. Elektrárna má pro provoz elektrolýzy mnoho výhod – využívá deionizovanou vodu a levnou elektřinu přímo v elektrárně.

5. Závěr

Konvenční technologie výroby vodíku produkují vysoké množství CO₂, proto je stále větší pozornost věnována výrobě vodíku elektrolýzou vody a využití vodíku v palivovém článku. Nasazení uvedených technologií má

v současnosti obvykle dlouhou dobu návratnosti a většinou je realizováno na úrovni demonstračních projektů. V sektorech energetiky a teplárenství lze využívat kogenerační jednotky na bázi palivových článků. Pro pohon vozidel může být využita elektrická energie produkovaná vodíkovými palivovými články, v ČR však rozvoji brání nerozvinutá infrastruktura. Z vodíku a CO₂ lze koelektrolýzou vyrábět analogy ropných paliv, čímž lze dosáhnout dekarbonizace sektorů dopravy, ve kterých nelze využívat vodík přímo (např. letectví).

Prezentované výsledky byly finančně podpořeny Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy – projekt LQ1603 Výzkum pro SUSEN. Práce byla realizována na velké infrastruktuře Udržitelná energetika (SUSEN) vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0108 a CZ.02.1.01/0.0/0.0/15_008/0000293.

LITERATURA

1. Tkáč M., Stehlik K.: Chem. Listy 111, 121 (2017).
2. Holladay J. D., Hu J., King D. L., Wang Y.: Catal. Today 139, 244 (2009).
3. Soltani R., Rosen M., Dincer I.: Int. J. Hydrogen Energy 39, 20266 (2014).
4. Dincer I., Acar C.: Int. J. Hydrogen Energy 40, 11094 (2015).
5. Pinsky R., Sabharwall P., Hartvigsen J., O'Brien J.: Prog. Nucl. Energy 123, 103317 (2020).
6. Millet P., Grigoriev S., v knize: *Renewable Hydrogen Technologies: Production, Purification, Storage, Applications and Safety* (Gandía L. M., Arzamendi G., Diéguez P., ed.) kap. 2, str. 19. Elsevier, Amsterdam 2013.
7. Lei L., Zhang J., Yuan Z., Liu J., Ni M., Chen F.: Adv. Funct. Mater. 29, 1 (2019).
8. Guaitolini S. V. M., Fardin J. F., v knize: *Advances in Renewable Energies and Power Technologies* (Yahyaoui I., ed.) kap. 4, str. 123. Elsevier, Amsterdam 2018.
9. Sharaf O. Z., Orhan M. F.: Renewable Sustainable Energy Rev. 32, 810 (2014).
10. Wang Y., Ruiz Diaz D. F., Chen K. S., Wang Z., Adroher X. C.: Mater. Today 32, 178 (2020).
11. Siracusano S., Bglio V., Stassi A., Merlo L., Moukheiber E., Arico A. S.: J. Membr. Sci. 466, 1 (2014).
12. Devrim Y., Erkan S., Baç N., Erglu I.: Int. J. Energy Res. 37, 435 (2013).
13. Sultan A., Zaidi J., v knize: *Membrane Fabrication*, str. 681. CRC Press, New York 2015.
14. Yuk S., Lee D., Choi S., Doo G., Lee D.W., Kim H.: Electrochim. Acta 270, 402 (2018).
15. Paul B., Andrews J.: Renew. Sustain. Energy Rev. 79, 585 (2017).
16. Keçebaş A., Kayfeci M., Bayat M., v knize: *Solar Hydrogen Production: Processes, Systems and Technologies* (Calise F., D'Accadia M. D., Santarelli M.,

- Lanzini A., Ferrero D., ed.), kap. 9, str. 299. Academic Press, Londýn 2019.
17. <https://www.nwo.nl/en/research-and-results/research-projects/i/58/28558.html>, staženo 22. 4. 2020.
 18. Brown T.: <https://ammoniaindustry.com/haldor-topsoes-solid-oxide-electrolyzer/>, staženo 15. 6. 2020.
 19. Verma S., Lu S., Kenis P. J. A.: *Nat. Energy* 4, 466 (2019).
 20. Logan B. E., Hamelers B., Rozendal R., Schröder U., Keller J., Freguia S., Aelterman P., Verstraete W., Rabaey K.: *Environ. Sci. Technol.* 40, 5181 (2006).
 21. FCH JU: *Hydrogen roadmap Europe: A sustainable pathway for the european energy transition*, 2019. https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/Hydrogen%20Roadmap%20Europe_Report.pdf, staženo 24. 6. 2020.
 22. *Fuel Cells Bull.* 7, 2 (2019).
 23. *Fuel Cells Bull.* 10, 2 (2018).
 24. *Fuel Cells Bull.* 1, 5 (2017).
 25. *Fuel Cells Bull.* 12, 2 (2019).
 26. *Fuel Cells Bull.* 9, 12 (2018).
 27. *Fuel Cells Bull.* 2, 4 (2020).
 28. Apostolou D., Xydis G.: *Renew. Sustain. Energy Rev.* 113, 109292 (2019).
 29. SAE: *Fueling Protocols for Light Duty Gaseous Hydrogen Surface Vehicles*, J2601_202005 (2020).
 30. Genovese M., Blekhan D., Dray M., Fragiaco P.: *J. Clean. Prod.* (2020). doi:10.1016/j.jclepro.2019.119266.
 31. *Fuel Cells Bull.* 2, 8 (2020).
 32. HYTEP: *Technologický foresight a implementační akční plán využití vodíkových technologií pro čistou mobilitu*. (2019).
 33. Dodds P. E., Staffell I., Hawkes A. D., Li F., Grünewald P., McDowall W., Ekins P.: *Int. J. Hydrogen Energy* 40, 2065 (2015).
 34. Elmer T., Worall M., Wu S., Riffat S. B.: *Appl. Therm. Eng.* 90, 1082 (2015).
 35. Ellamla H. R., Staffell I., Bujlo P., Pollet B. G., Pasupathi S.: *J. Power Sources* 293, 312 (2015).
 36. Klippenstein M.: <https://fuelcellworks.com/news/fcw-exclusive-tokyo-fuel-cell-expo-2019-300000-ene-farms/>, staženo 24. 6. 2020.
 37. Weidner E. R., Cebolla R. O., Davies J.: *JRC Technical report 115923*. Publications Office of the European Union, Lucemburg, 2019, doi:10.2760/372263
 38. E4Tech: <http://www.fuelcellindustryreview.com/archive/TheFuelCellIndustryReview2017.pdf>, staženo 24. 6. 2020.
 39. *Fuel Cells Bull.* 12, 7 (2019).
 40. Ghezel-Ayagh H., Sanderson R., Hunt J., Walzak J., Patel D.: *ECS Trans.* 30, 253 (2011).
 41. https://www.ieafuelcell.com/fileadmin/publications/NatStratandPlansforFuelCellsandInfraStruct_v10.pdf, staženo 24. 6. 2020.
 42. <https://portal.ct.gov/PURA/RPS/Renewable-Portfolio-Standards-Overview>, staženo 15. 6. 2020.
 43. <https://www.spolchemie.cz/cs/uvod/Novinky/tiskove-zpravy/2017/06/06/Milnik-v-historii-SPOLCHEMIE-nejmodernější-elektrolýza>, staženo 13. 3. 2020.
 44. SCRA: *Landfill Gas-to-Hydrogen*, 2014. https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review14/mt007_baxterclemmons_2014_o.pdf, staženo 16. 6. 2020.
 45. <https://www.europeanbiogas.eu/italy-beer-production-waste-potential-feedstock-biogas/>, staženo 18. 6. 2020.
 46. <http://technomaps.veoliawatertechnologies.com/processes/lib/pdfs/3292,Article-Jorien-final.pdf>, staženo 18. 6. 2020.
 47. <https://www.green-industrial-hydrogen.com/project/grinhy-project>, staženo 18. 6. 2020.
 48. <https://www.h2future-project.eu/>, staženo 18. 6. 2020.
- P. Dvořáková Ruskayová, A. Tocháčková, and M. Šilhan (Research Centre Řež): Current State and Use of Hydrogen Technologies**
- This review aims at the presentation of a coherent overview of hydrogen technologies and identifies areas where the authors expect the greatest progress.
- Microcogeneration units with fuel cells produce heat and electricity for residential buildings and smaller commercial buildings. Cogeneration units with power output over 50 kW often serve as a back-up power source. Hydrogen can be used to create low emission alternatives to fossil fuels. It is evident that hydrogen technologies offer a large variety of possible uses. The fuel-cell energy can be used to propel various vehicles; hydrogen can be utilized in a variety of industrial applications as well.
- Keywords: hydrogen, technology, fuel cell, electrolysis
- Acknowledgment*
The presented results were financially supported by the Ministry of Education, Youth and Sports – project LQ1603 Research for SUSEN. The work was carried out on a large infrastructure Sustainable Energy (SUSEN) built within the project CZ.1.05 / 2.1.00 / 03.0108 and CZ.02.1.01 / 0.0 / 0.0 / 15_008 / 0000293.