

# VODÍKOVÉ HOSPODÁŘSTVÍ A MOŽNOSTI VYUŽITÍ VODÍKU K REGULACI OBNOVITELNÝCH ZDROJŮ ENERGIE

Aleš Doucek<sup>a,b</sup>, Daniel Tenkrát<sup>b</sup>, Petr Dlouhý<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Ústav jaderného výzkumu Řež a.s.

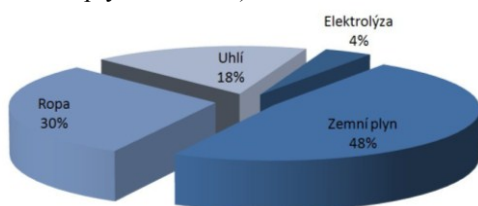
<sup>b</sup>Vysoká škola chemicko-technologická v Praze

Článek se zabývá souhrnným popisem vodíkového hospodářství a naznačuje možnosti pro využití vodíku v nejbližší budoucnosti. Vodíkové hospodářství je soubor technologických řešení pro uspokojování energetických potřeb, jejichž společným jmenovatelem je vodík. Ten zde nevystupuje jako klasické palivo, ale energetický vektor. V druhé části je pak diskutována možnost využití vodíku k regulaci obnovitelných zdrojů energie.

Došlo 13. 4. 2010, přijato 10. 12. 2010

## 1. Úvod

Vodík může být vyráběn mnoha způsoby z širokého spektra vstupních surovin. V celosvětové produkci vodíku dominuje v současné době výroba z fosilních zdrojů. Denně je na světě vyprodukováno přibližně 1,4 mld. Nm<sup>3</sup>, neboli 127 tis. tun vodíku. Obrázek 1 ukazuje zastoupení různých zdrojů využívaných v dnešní době (využívají se zejména tyto technologie: parní reforming zemního plynu, parciální oxidace ropných frakcí a zplyňování uhlí).



**Obr. 1** Rozložení zdrojů, z nichž se v současné době získává vodík

Využívání takto vyrobeného vodíku může pomoci lokálně snížit produkci některých zdraví poškozujících látek, globálně by však vedlo pouze k méně hospodárnému využívání primární energie a s tím souvisejícímu nárůstu produkce oxidu uhličitého. Proto je nezbytné hledat jiné způsoby výroby vodíku. Jednou z možností je jeho výroba z obnovitelných zdrojů. Pomocí nich se získává hlavně elektrolýzou vody nebo zplyňováním či pyrolýzou biomasy [1].

Pro výrobu vodíku z vody se jako vhodné jeví také některé vyvíjené jaderné reaktory čtvrté generace. Vysoká teplota chladiwa na výstupu z reaktoru je postačující pro vysokoteplotní elektrolýzu i některé perspektivní chemické cykly.

### 1.1. Stručný přehled výrobních technologií vodíku

Pro potřeby tohoto článku uvádíme pouze některé, nejrozšířenější, případně v současné době nejperspektivnější technologie výroby vodíku.

#### 1.1.1 Parní reforming, parciální oxidace, zplyňování

Parní reformování je v současnosti nejlevnějším a nejrozšířenějším způsobem výroby vodíku [2].

Principy výroby vodíku se liší podle charakteru vstupní suroviny. Pokud technologie vychází ze zemního plynu a lehkých ropných frakcí hovoříme o tzv. parním reformování, pokud je surovinou těžký topný olej o parciální oxidaci. Termochemické zpracování uhlí je označováno jako zplyňování.

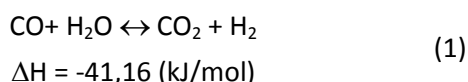
Při **parním reformování** jsou výchozí látky rozkládány při teplotách přibližně 800 °C a při tlacích do 4 MPa vodní parou za použití vhodných katalyzátorů. Parní reforming probíhá v primárních reformovacích pecích. Jako katalyzátor se používá oxid nikelnatý na alumině. Plyná směs obsahuje po primárním reformingu ještě přibližně 8 % methanu. Tento zbytkový methan vstupuje do sekundárních reformovacích (šachtových) pecí. Rovněž ty jsou naplněny katalyzátorem na bázi oxidu nikelnatého. Zde je část plynu spálena přivedeným vzduchem. Tím dojde ke zvýšení teploty na 1000 až 1200 °C. Za těchto podmínek methan reaguje s kyslíkem za vzniku vodíku, oxidu uhelnatého a částečně i oxidu uhličitého. Použitím této metody lze tedy získat směs vodíku a oxidu uhelnatého [19].

**Parciální oxidace** oproti tomu probíhá při teplotách 1200 až 1500 °C a tlaku mezi 3 a 4 MPa bez přítomnosti katalyzátoru. Není tedy zapotřebí vstupní suroviny odsířit. Jako vedlejší produkt vznikají při parciální oxidaci saze.

Při procesu **zplyňování** je uhlí částečně oxidováno vzduchem a vodní parou při vysokých teplotách za vzniku směsi vodíku, oxidu uhelnatého, oxidu uhličitého, methanu a dusíku. Téměř 30 až 40 % vstupujícího uhlí je spáleno při dosažení a následném udržování požadované provozní teploty 1200 °C. V současné době nejsou tyto technologie vzhledem k vysoké energetické náročnosti ve srovnání s předcházejícími postupy rozšířené. Není však vyloučeno, že k allotermnímu zplyňování uhlí mohou být v budoucnosti použity vysokoteplotní jaderné reaktory pracující při teplotě 950 °C, je-

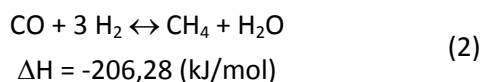
jichž použití by významným způsobem změnilo energetickou bilanci procesu (viz oddíl 1.2).

Další technologický krok výroby čistého vodíku představuje odstranění oxidu uhelnatého z reakční směsi. Nejvhodnější způsob představuje jeho konverze pomocí vodní páry za vzniku vodíku a oxidu uhličitého. Tato reakce je exotermní. Z hlediska rovnovážného složení reakční směsi je tedy výhodné pracovat při nižších teplotách. Takzvaná vysokoteplotní konverze probíhá při teplotách v rozmezí 340 až 380 °C. Jako katalyzátor slouží oxid železitý a oxid chromitý. Tyto katalyzátory jsou vysoce citlivé na katalytické jedy, zejména na sloučeniny síry. Pokud vstupní směs obsahuje více sloučenin síry (zejména z parciální oxidace těžkého topného oleje), je vhodnější použít katalyzátory na bázi kobaltu a molybdenu. Při tzv. nízkoteplotní konverzi je používána teplota v rozsahu 200 až 250 °C a katalyzátor na bázi oxidu měďnatého a zinečnatého. Rovněž tyto katalyzátory jsou velmi citlivé na obsah síry v surovinách. Po tomto kroku obsahuje reakční směs přibližně 0,3 až 0,5 obj. % zbytkového oxidu uhelnatého.



Následujícím krokem čištění reakční směsi je odstranění vzniklého oxidu uhličitého a eventuálně také sulfanu. Použit lze chemický nebo fyzikální princip. Fyzikální absorpce je prováděna především za použití N-methylpyrrolidonu (proces Purisol) nebo polyethylenglykol-dimethyletheru (proces Selexol). Proces Rectisol je prováděn za použití methanolu jako rozpouštědla.

V procesech, pro které čistota vodíku docílená těmito postupy není dostačující, je zapotřebí vodík, příp. směs vodíku s dusíkem dočistit, aby byly kvantitativně odstraněny především kyslíkaté sloučeniny. K odstranění většího množství oxidu uhelnatého (v případě použití vysokoteplotní konverze  $\text{CO} \rightarrow \text{CO}_2$ ), lze použít vypírání kapalným dusíkem. Pokud byla použita nízkoteplotní konverze, dosahuje zbytkový obsah oxidu uhelnatého pouze 0,1 až 0,3 obj. %. V takovém případě lze zbytkový oxid uhelnatý i uhličitý hydrogenovat na methan (proces methanizace) za použití exotermní reakce s vodíkem při teplotě 250 až 350 °C a tlaku 3 MPa na niklovém katalyzátoru. Methan představuje pro případné následné procesy složky výrazně méně problematickou, než např. oxid uhelnatý [18].



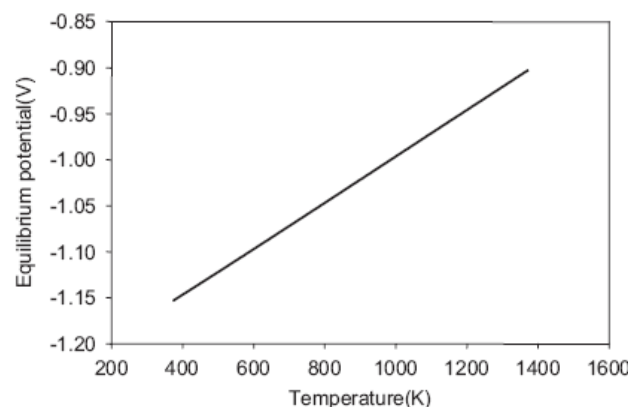
### 1.1.2 Elektrolyza vody

Elektrolyza je proces, při kterém dochází k elektrochemickému rozkladu vody vložím stejnosměrného napětí na elektrody elektrolyzáru. Průchodem elektrického proudu elektrolytem dochází k pohybu

kladných iontů k záporné elektrodě a záporných iontů ke kladné elektrodě. Na katodě poté dochází k vývoji vodíku, na anodě kyslíku. Proces elektrolyzy může probíhat za normálních teplot. Ideální (reverzibilní) napětí dekompozice je 1,229 V, reálné napětí se pohybuje v rozmezí 1,85 – 2,05 V. Tímto způsobem jsou vyrobeny asi 4 % z celkové světové produkce vodíku. Spotřeba energie je v moderních elektrolyzerech asi 4,3 – 4,8 kWh/Nm<sup>3</sup>, resp. 47,8 – 53,4 kWh/kg [14,15]. Účinnost procesu se tak pohybuje v rozmezí přibližně 70 - 80 %. K výhodám elektrolyzy patří možnost použití různých zdrojů vstupní energie a vysoká čistota vodíku. Nevýhodou může být vysoká cena elektrické energie. Konvenční elektrolyza je proto výhodná zejména tam, kde je levná elektřina a dostatek vody. Na celkové účinnosti elektrolytické výroby vodíku (při výrobě např. pro dopravu) se podílí především účinnost výroby elektrické energie, která je pro stávající zdroje 20 -30 %. Celková účinnost elektrolyzy se pak pohybuje přibližně v rozmezí 25 - 35 %.

### 1.1.3 Vysokoteplotní elektrolyza

Pro vysokoteplotní elektrolyzu, nazývanou též někdy parní elektrolyza, je charakteristické, že část dodávané energie tvoří elektrická energie, a část je přivedena ve formě tepla. Do elektrolyzáru vstupuje směs páry a vodíku (asi 10% hm. vodíku). Vodík udržuje reduktivní prostředí na katodě a je nezbytný pro fungování elektrolyzy [16]. Ionť kyslíku prochází membránou a po oxidaci na anodě je odváděn ze systému. Výstupní proud obsahuje asi 90 % hm. vodíku (zbytek pára). Voda je pak oddělena v kondenzační jednotce. Část vodíku se vrací zpět do systému. Provozní podmínky procesu vyžadují teploty v rozmezí 600 – 1000 °C. Výhodou je zvýšení účinnosti procesu díky snížené spotřebě elektrické energie z důvodu snížení rovnovážného napětí a snadnějšímu překonání aktivační bariéry na povrchu elektrody. Závislost rovnovážného napětí na teplotě je znázorněna na Obr. 2. Celková potřebná energie pro elektrolyzu mírně roste kvůli nutnému ohřevu páry, avšak celková účinnost vysokoteplotní elektrolyzy může dosahovat až 45 % [3].

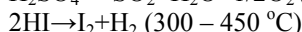
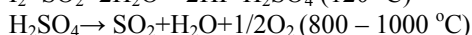
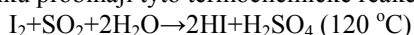


Obr. 2 Závislost rovnovážného potenciálu na teplotě [16]

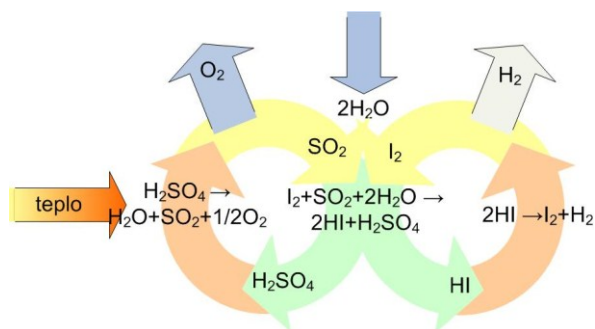
### 1.1.4 Termochemické cykly

Termochemické cykly jsou známy již více jak 35 let; intenzivně byly studovány na přelomu 70. a 80. let 20. století (v době ropné krize, tedy v době hledání ekonomické výroby alternativních paliv). Při termochemickém štěpení vody je voda rozdělena na kyslík a vodík pomocí série chemických reakcí, které jsou iniciované teplem, nebo v případě hybridních cyklů teplem a elektrickou energií. Jsou to cykly uzavřené, tj. použité chemické látky jsou v průběhu reakcí recyklovány a znovu vstupují do procesu. Doplněnou vstupní surovinou je pouze voda a výsledným produktem vodík a kyslík.

Jedním z nich je siřičito-jódový termochemický cyklus (Obr. 3), který byl vyvinut v General Atomics (San Diego, USA) v polovině 70. let 20. století. Je předním kandidátem levné a účinné výroby vodíku pomocí jaderné energie. Vstupní surovinou je voda a vysokopotenciální teplo; výstupními surovinami jsou kyslík a vodík a nízkopotenciální teplo. Všechny vstupní suroviny jsou za provozních teplot tekuté. Při produkci vodíku probíhají tyto termochemické reakce:



V prvním kroku, který je znám jako Bunsenova reakce, reaguje vstupující voda s jódem a oxidem siřičitým za vzniku kyseliny sírové a jodovodíku. Jedná se o exotermickou reakci, kdy se z reakce odvádí teplo o teplotě 120 °C. Nejvíce tepla (a o nejvyšší teplotě, 800 – 1000 °C) vyžaduje endotermický rozklad kyseliny sírové. Rozklad jodovodíku vyžaduje teploty nižší (450 °C).



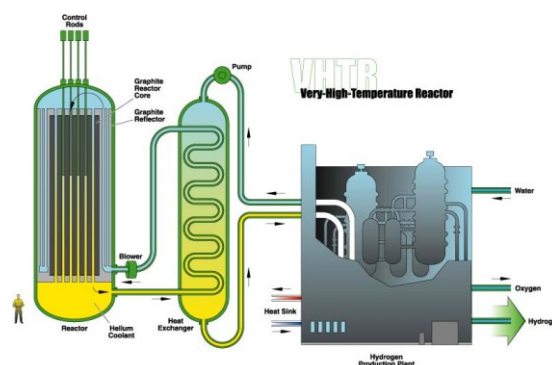
Obr. 3 Principiální znázornění siřičito-jódového termochemického cyklu [4]

Účinnost takto komplexního cyklu není jednoduché stanovit. Účinnost celého výrobního cyklu vodíku se pohybuje v rozmezí 40 - 52 % (50 % při 950 °C). S dalším nárůstem teplot roste i účinnost cyklu.

Oproti elektrolýze má vyšší účinnost, protože nedochází ke ztrátám při výrobě elektrické energie. Nevýhodou cyklu je požadavek vysokých vstupních teplot a agresivita kyseliny sírové a jodovodíkové, což vede k vysokým nárokům na chemickou odolnost použitých materiálů. Problematická bude kontrola podmínek reakcí v průmyslovém měřítku (v laboratorních podmínkách byla tato otázka již zvládnuta) [5].

## 1.2. Propojení s jadernou energetikou

V roce 2003 vybralo „Mezinárodní fórum pro IV. generaci“ (Generation IV International Forum) 6 návrhů na tzv. jaderné reaktory generace IV. Ty se vyznačují zejména jednoduchostí, vyšší účinností, menší nebo téměř žádnou produkcí radioaktivního odpadu, vysokou mírou bezpečnosti (inherentní bezpečnost na základě fyzikálních principů) a také nízkou mírou rizika zneužití pro výrobu jaderných zbraní. Významnou roli budou hrát reaktory IV. generace také ve výrobě vodíku (vysokoteplotní elektrolýza a termochemické cykly), uplatní se ale i k výrobě elektřiny, tepla nebo k odsolování vody. U modelu chlazeného tekutým sodíkem je navíc velkou výhodou uzavřený palivový cyklus – reaktor bude moci využívat vysoce radioaktivní odpady z použitého paliva dnešních jaderných elektráren. Vysokoteplotní reaktory chlazené heliem (VHTR) budou schopny účinně vyrábět vodík termochemickou cestou. První demonstrační projekty jsou očekávány kolem roku 2015, komerční využití pak kolem roku 2040.



Obr. 4 Very-High Temperature Reactor (VHTR)[6]

## 2. Energetické využití vodíku

Vodík je principiálně možno využít dvěma způsoby. Chemickou energií, která je v něm uchována, je možno uvolnit buď jeho spálením ve spalovacím motoru, případně turbíně, nebo využít jeho výjimečných vlastností a přeměnit jej přímo na elektrickou energii v palivových článcích. Ačkoli první z možností je v dnešní době poměrně dobře zvládnutá, druhá nabízí, i přes nutnost překonat některé vývojové překážky, zvýšení účinnosti využití energie až o desítky procent.

### 2.1. Vodíkové spalovací motory

Možnost práce spalovacího motoru na vodík byla zkoušena od 20. let minulého století (vzducholodní motory, Ricardo a Maybach). Vodík hoří velmi rychle řetězovou rozvětvenou reakční kinetikou. Jeho plamen je v důsledku vysoké výhřevnosti stabilní i při velmi chudé směsi, což lze využít pro omezení emisí oxidů dusíku. Nevýhodou spalování vodíku je malá objemová výhřevnost směsi daná nízkou hustotou vodíku. Zejména použití chudých směsí vyžaduje proto přeplňování a vstřík vodíku do válce až během sání, nejlépe ke konci sacího zdvihu. Vývoji spalovacího motoru na vodík se

dnes věnují i některé významné evropské a světové automobilky.

## 2.2. Palivové články

Palivový článek (dále také PČ) je zařízení, které při elektrochemické reakci přeměňuje chemickou energii kontinuálně přiváděného paliva s oxidačním činidlem na energii elektrickou. Oproti tepelným strojům s generátorem elektrické energie dosahují palivové články při výrobě elektrické energie vysokých účinností a to až 60 % v laboratorních podmínkách. Reálná účinnost však dosahuje pouze 35 - 50 % dle zatížení a typu palivového článku. Vysoká účinnost je dána zejména tím, že přeměna energie je přímá, nikoliv přes mezistupně (tepelnou a mechanickou), jako je tomu např. u spalovacích motorů.

V současné době je vyvíjeno pět typů palivových článků lišících se především chemickým složením elektrolytu, provozními teplotami a možným palivem. U naprosté většiny palivových článků vystupuje jako oxidační činidlo vzdušný kyslík, výjimku tvoří jen specializované aplikace například v kosmonautice. Nízkoteplotní palivové články využívají jako palivo vodík nebo methanol, vysokoteplotní články mohou zužitkovat například i zemní plyn. Jednotlivé typy článků vzhledem k rozdílným provozním parametrům nacházejí uplatnění ve velmi odlišných aplikacích. Nízkoteplotní palivové články jsou dominantně využívány v mobilních aplikacích k výrobě elektrické energie, vysokoteplotní články naopak převládají v kombinované výrobě tepla a elektrické energie v aplikacích stacionárních.

## 2.3. Typy palivových článků

Palivové články jsou v současnosti technologicky velmi vyspělá a bezpečná zařízení. Jejich komerčnímu rozšíření brání prozatím jejich vysoká cena daná stupněm vývoje, převážně kusovou výrobou a v neposlední řadě cenou použitých materiálů. U nízkoteplotních palivových článků je to především cena fluorovaných membrán a platiny, u vysokoteplotních potom cena materiálů schopných odolat vysokým teplotám a korozivnímu prostředí [7].

### 2.3.1 Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC, palivový článek s polymerní membránou)

Jako elektrolyt slouží iontovýměnná polymerní membrána (většinou na bázi kyselých fluorovaných polymerů), která je výborným protonovým vodičem. Pro efektivní provoz je klíčovým problémem tzv. vodní režim. Optimální stupeň hydratace membrány je podmínkou pro její dobrou protonovou vodivost. Obvyklá provozní teplota PEM palivových článků je 50 – 80 °C. Obecně je limitována stabilitou použitého polymeru, a je většinou nižší než 120 °C. Palivem je v tomto případě čistý vodík nebo methanol (používaný většinou v přenosných aplikacích). Jako katalyzátor se využívá Pt, případně Pt/Rh a jiné. Pro tento typ katalyzátorů je

významným jedem CO, proto je nutné zajistit jeho koncentrace nižší než 5 ppm. Hustota výkonu se u PEM palivového článku pohybuje těsně nad hranicí 0,1 kW/l a 0,125 kW/kg.



Obr. 5 Příklad palivového článku s polymerní membránou (Proton Motor)

### 2.3.2 Alkaline Fuel Cell (AFC, alkalický palivový článek)

Elektrolytem je 85 % hm. KOH pro články pracující při vyšších teplotách (~ 250 °C) případně 35 - 50 % hm. pro nižší teploty (< 120 °C). Elektrolyt je udržován v porézním materiálu, kterým byl původně například azbest (vesmírný projekt Apollo), dnes se používá např. porézní nikl. Výhodou tohoto typu palivového článku je možnost využití spektra (levných) katalyzátorů na bázi stříbra, kobaltu nebo platiny. Největším problémem je čistota paliva a oxidačního činidla, kdy i malé množství CO<sub>2</sub> způsobuje znehodnocování elektrolytu (reakcí CO<sub>2</sub> s KOH za vzniku K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>). CO je stejně jako v případě PEMFC katalytickým jedem [17].

### 2.3.3 Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC, palivový článek s kyselinou fosforečnou)

Tento druh palivového článku pracuje při 150 – 220 °C. Jako elektrolyt se používá 100% kyselina fosforečná, která se za daných podmínek vyznačuje nízkou tenzí par. Při nižších teplotách má H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> horší protonovou vodivost a problém CO jako katalytického jedu pro Pt se stává významnějším. Kyselina fosforečná je stabilnější než ostatní běžné kyseliny, proto je schopná pracovat v širokém rozsahu teplot.

### 2.3.4 Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC, palivový článek s tekutým uhličitánem)

Elektrolytem je většinou směs alkalických uhličitánů, které jsou zadržovány v porézním nosiči LiAlO<sub>2</sub>. Provozní teplota je od 500 °C do 700 °C; v tomto teplotním rozmezí tvoří směs uhličitánů vysoce vodivou roztavenou taveninu, ve které zprostředkovávají vodivost uhličitánové ionty. Díky vysokým teplotám není nutné používat vzácné kovy jako katalyzátory, využívá se Ni pro anodu a NiO pro katodu.

### 2.3.5 Solid Oxide Fuel Cell (SOFC, palivový článek s pevným oxidem)

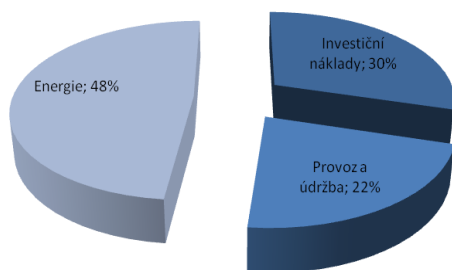
Tento typ PČ je výjimečný tím, že jeho elektrolyt je pevný, neporézní oxid kovu, nejčastěji se používá  $Y_2O_3$  stabilizovaný  $ZrO_2$ . Pracovní teplota je 600 – 1000 °C, přičemž vodivost zprostředkovávají kyslíkové aniony. Materiálem pro anodu je Co-ZrO<sub>2</sub> nebo Ni-ZrO<sub>2</sub>, pro katodu se používá LaMnO<sub>3</sub> dopovaný stronciem. Skutečnost, že elektrolyt je pevný, má velký význam pro zjednodušení systému, vyskytují se zde na rozdíl od všech ostatních typů PČ pouze dvě fáze, pevná a plynná.

## 3. Ekonomické hledisko

Principiální výhodou vodíku oproti elektřině je možnost jeho skladování. Při uvažování pokročilejších metod výroby vodíku, jako je například vysokoteplotní elektrolyza, lze (alespoň částečně) využít i tepelnou energii, což má příznivý vliv na celkovou účinnost výroby vodíku. U termochemických cyklů lze akumulovat do vodíku přímo tepelnou energii, odpadají tak ztráty při výrobě elektrické energie. Při podrobnějším pohledu jsou obě zmíněné cesty pokročilé výroby vodíku z hlediska celkové účinnosti srovnatelné. Mírně vyšší celkovou účinnost termochemických cyklů vyvažuje vysokoteplotní elektrolyza nižšími nároky na řízení procesu i na použité materiály.

### 3.1. Elektrolyza vody – energetické a investiční náklady

Spotřeba elektrické energie na výrobu 1 m<sup>3</sup> H<sub>2</sub> je v dnešní době asi 4,8 kWh, tedy přibližně 53 kWh/kg. Graf na Obr. 6 ukazuje orientační podíl investičních a provozních nákladů ve výrobní ceně vodíku.



Obr. 6 Podíl nákladových složek na výrobní ceně vodíku

Z hlediska využitelné energie je vodík asi 3x hodnotnější (při započtení vyšší výhřevnosti vodíku a účinnosti přeměny energie PČ) než dnes využívaná ropná paliva. Výrobní cena vodíku, která by se v případě elektrolyzy pohybovala okolo 90,- Kč za kilogram je tedy srovnatelná s asi 30,- Kč za litr benzínu. Při současných cenách ropy a stávající daňové politice tedy platí, že využití vodíku pro dopravu je z hlediska provozních nákladů

dů mírně výhodnější než využití dnešních pohonných hmot.

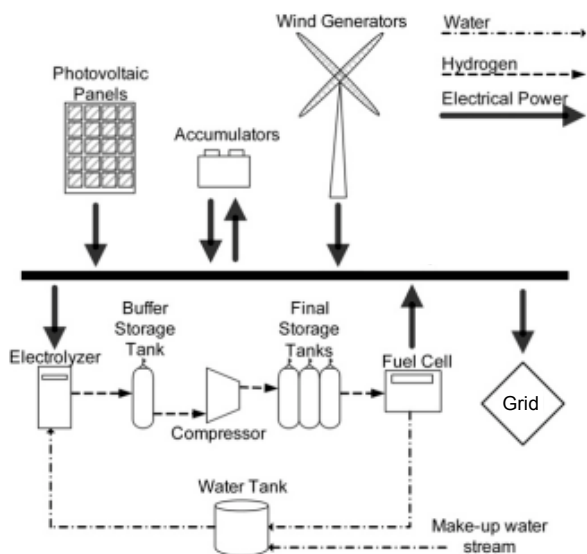
## 4. Bezpečnost a další speciální požadavky

Téměř všechna paliva jsou nějakým způsobem nebezpečná. Vysoká hustota energie, hořlavost a výbušnost jsou vlastnosti, které jsou společné všem druhům paliv. Skladování takových paliv v prostoru vozidla představuje riziko vznícení, případně výbuchu, paliva vně spalovací komory tepelného motoru nebo palivového článku. Vodík není v tomto ohledu výjimkou, přesto je jeho chování v mnoha ohledech velmi odlišné od stávajících fosilních paliv. Zkoušky však ukázaly, že při destrukci nádrže stoupá vodík díky své nízké hustotě velmi rychle vzhůru a případný požár vzniká ve větší míře vně vozidla. Ke zvýšení bezpečnosti přispívá i menší množství paliva skladovaného ve vozidlech. Bezpečnost se dá dále zvýšit vhodným umístěním skladovací nádrže (například na střeche). Je třeba připomenout, že využívání vodíku není novinka posledních let. Ve velkém množství je spotřebováván například v ropných rafinériích při výrobě benzínů, nebo v potravinářství při ztužování tuků. Relativně nové je pouze jeho používání jako energetického nosiče. Velké množství dopravních prostředků v rámci demonstračních projektů na celém světě (HyFleet:Cute [8]) denně prokazuje, že je vodík pro tyto účely dostatečně spolehlivý a bezpečný palivo.

## 5. Výroba vodíku pro regulaci obnovitelných zdrojů

Oblast obnovitelných zdrojů patří z pochopitelných důvodů již delší dobu mezi priority jak evropské, tak národní politiky. Jelikož je však výroba elektrické energie pomocí větru nebo fotovoltaických panelů poznamenána nerovnoměrností zapříčiněnou nestálými přírodními podmínkami, představují tyto zdroje značnou zátěž pro stávající přenosovou a distribuční síť. Dalším negativem je nutnost zálohovat tyto zdroje pomocí zdrojů klasických. Tyto důvody přispívají také ke zvýšení ceny energie pro konečné zákazníky.

Vodíkové technologie mohou sloužit k uskladnění energie vyrobené z obnovitelných zdrojů o nestálém výkonu přímo v místě výroby. Takto získaný vodík lze poté využít dle lokálních podmínek buďto jako palivo pro dopravu, nebo pro opětovnou výrobu elektřiny, například ve stacionárních palivových článcích nebo motorech. Jednoduché schéma popisovaného uspořádání ukazuje Obr. 7 [9] [10].



Obr. 7 Schéma integrovaného systému [11]

Elektřina získaná z obnovitelného zdroje je konvertována na vodík pomocí elektrolýzy. V současnosti připadá v úvahu zejména elektrolýza alkalická, v blízké budoucnosti lze očekávat výraznější uplatnění elektrolýzy s využitím protonvýmenné membrány [12] (obě za běžných teplot). Vodík je následně stlačován kompresorem na tlak až 350 bar a skladován ve vodíkových nádržích [13]. K opětovné transformaci vodíku na elektřinu je možné využít stacionární spalovací motory nebo palivové články. Výběr vhodného zařízení závisí zejména na ekonomických faktorech, na velikosti zařízení, ale také na požadované kvalitě stabilizace obnovitelného zdroje.

Jednou z překážek pro větší rozšíření využití solární i jiné obnovitelné energie pro výrobu elektřiny je tedy variabilita zdroje. Pro samostatné energetické systémy (stand-alone power system - SAPS), lze vyrovnání krátkodobých denních výkyvů dosáhnout využitím baterií. Pro dlouhodobější zálohování nebo regulaci větších zdrojů připojených do distribuční sítě je však využití baterií nedostatečné a nabízí se využití vodíku, který je vyráběn pomocí elektrolýzy. V následujícím textu jsou porovnány ekonomické charakteristiky zmíněných přístupů k regulaci:

1. PV/baterie: fotovoltaické moduly s uskladněním elektřiny v bateriích. Tento přístup je zde popsán zejména jako reference.
2. PV/elektrolýza: Druhý přístup využívá elektřinu z PV modulů v kombinaci s elektrolýzou zajišťující výrobu vodíku a kyslíku, zařízení na čištění a kompresi, systém skladování a zařízení na opětovnou výrobu elektřiny z vodíku (motor + generátor, palivový článek).

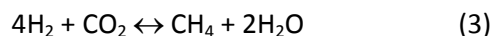
Pro první případ je účinnost uložení elektřiny do baterií a jejího opětovného získání asi 85%. V závislosti na velikosti zařízení a požadavku na kvalitu zálohování

a stabilizace je však nezbytné využít značné množství baterií (např. pro SAPS s průměrným denním výkonem 10 kWh/d [20] je to až asi 250 kWh). Využití takového množství baterií představuje značné investiční náklady. Naproti tomu, využití druhého přístupu – kombinace fotovoltaických panelů a výroby vodíku – se vyznačuje nižší účinností maximálně 40 %. Z toho plynou vyšší nároky na zdroj primární energie (PV) avšak investiční náklady jsou téměř nezávislé na množství skladované energie. Využití vodíku se tedy vyplatí zejména tam, kde je potřeba uchovávat značná množství energie po delší dobu [21].

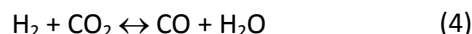
### 5.1. Vodík z regulace obnovitelných zdrojů jako zdroj methanu

Přes značné pokroky v oblasti výroby vodíku a jeho využívání v palivových článcích je jeho použití v současnosti a blízké budoucnosti spíše otázkou pilotních projektů. Rovněž směs  $\text{CH}_4/\text{H}_2$  (tzv. HYTHANE), o které se mluví jako o mezistupni mezi „klasickým“ plynárenstvím a vodíkovým hospodářstvím, pravděpodobně nenalezne uplatnění v nejbližší budoucnosti. V literatuře je pro přechodné období zmiňována i technologie využití vyrobeného vodíku pro produkci methanu. Ten má proti vodíku výhodu v tom, že není potřeba budovat dodatečnou infrastrukturu. Většina průmyslu a domácností spotřebovává ve významném množství právě methan (zemní plyn) a nejsou potřeba žádné zásahy do těchto technologií. Dále je výhodou vyšší hustota energie u methanu (potřeba nižších tlaků a objemů při transportu).

Výroba methanu je založená na tzv. Sabatierově reakci katalyzované niklem nebo rutheniem:



kde souběžně probíhá i RWGS reakce (Reverse Water Gas Shift):



Takže celý proces můžeme zapsat ve tvaru:



V tomto případě ovšem nemůžeme mluvit o výrobě methanu, ale spíše o ukládání např. sluneční energie do nosiče energie. Přínos této metody tak spočívá především v regulaci obnovitelných zdrojů a ukládání energie do stávající plynárenské sítě, tzn. vytvoření propojení mezi elektrickou a plynárenskou soustavou v rámci moderní sítě tzv. smart grid.

## 6. Závěr

V oblasti výroby vodíku existuje mnoho cest. Preference jedné vyplývá z lokálních podmínek výroby, poptávky a především z investičních a provozních nákladů více než z celkové účinnosti procesu. Pro masivní

udržitelnou výrobu se jeví perspektivní výroba vodíku chemickými cykly, nebo vysokoteplotní elektrolýza v kombinaci s vysoko-potencionálním zdrojem tepla, kterým mohou být zejména vybrané reaktory Generace IV. Konvenční elektrolýza najde pravděpodobně uplatnění v menších lokálních zdrojích vodíku. Elektrická energie z obnovitelných zdrojů může být s výhodou využita právě pro lokální výrobu vodíku, odstraňuje komplikace s regulací energetické přenosové soustavy. Výroba vodíku se tak může stát perspektivní alternativou regulace spotřeby elektrické energie.

V České republice vzniká díky významnému zastoupení chemického, petrochemického a hutního průmyslu každodenně několik desítek tun vodíku jako sekundárního produktu. Další potenciál představují rezervy mezi instalovanou a využívanou kapacitou jednotek pro výrobu vodíku. Souhrnně je v současné době k dispozici volná výrobní kapacita přibližně 65 t H<sub>2</sub>/den. Toto množství je více než dostačující pro naplnění cíle EU pro počet vodíkových vozidel pro rok 2020. Vodík jako nosič energie je alternativou k fosilním palivům. Oblast jeho využití je tedy v automobilovém průmyslu a v lokální produkci elektrické energie a tepla.

#### Literatura

1. Doucek, A.; Prokeš, O.; Tenkrát, D.: Získání vodíku z obnovitelných zdrojů energie. *Chemické zvesti*, 61 (1) 2007
2. Dicks A.L., 1996. Hydrogen Generation from Natural Gas for the Fuel Cell Systems of Tomorrow, *J. Power Sources* 61, 113–124
3. Shin, Y. et al.: Evaluation of the high temperature electrolysis of steam to produce hydrogen, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 32 (2007)
4. Dlouhý P., 2007. Vodíkové hospodářství – Úvod, Czech Hydrogen Technology Platform, 2007 Jan 25 [cited 2010 April 05]. Available from: <http://hytep.cz/?loc=article&id=3>
5. Vitart, X. et al: Hydrogen production using the sulfur-iodine cycle coupled to a VHTR: An overview, *Energy Conversion and Management*, Volume 47 (2006)
6. Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV International Forum, *A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems*, U.S. DOE, 2002
7. Dlouhý P., Janík, L.: Palivové články [Internet], Czech Hydrogen Technology Platform, 2007 April 17 [cited 2010 April 09]. Available from: <http://hytep.cz/?loc=article&id=5>
8. <http://www.global-hydrogen-bus-platform.com/>
9. Dutton, A.G. et al., 2000. Experience in the design, sizing, economics, and implementation of autonomous wind-powered hydrogen production systems. *Int. J. Hydrogen Energy* 25, 705–722
10. Sherif S., Barbir F., Veziroglu T., 2005. Wind energy and the hydrogen economy—review of the technology. *Solar Energy* 78, 647–660
11. Giannakoudis G. et al.: Optimum design and operation under uncertainty of power systems using renewable energy sources and hydrogen storage, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 35 (2010)
12. Millet, P. et al.: PEM water electrolyzers: From electrocatalysis to stack development, *International Journal of Hydrogen Energy* (2009)
13. Šingliar, M. et al.: Možnosť uchovania energetickeho potenciálu vetra vo vodíku, *PRO-ENERGY* 3 (2008), 52
14. Hydrogenics [Internet][cited 2010 November 4]: <http://www.hydrogenics.com/>
15. <http://www3.statoil.com/hydrogentechnologies/svg03816.nsf?OpenDatabase>
16. Statoil Hydrogen Technologies [Internet][cited 2010 November 4]: Youngjoon, S. et al.: Evaluation of the high temperature electrolysis of steam to produce hydrogen, *International Journal of Hydrogen Energy* (2007)
17. De Geeter, E.: Alkaline fuel cells for road traction, *Journal of Power Sources* 80 \_1999.
18. Bouzek, K.: Výroba vodíku parním reformingem, VŠCHT 2009
19. Dlouhý, P.: Parní reforming zemního plynu a elektrolýza vody pro výrobu vodíku pomocí jaderné energie, ÚJV Řež 2008
20. Markvart T, Castañer L (editors). *Practical Handbook of Photovoltaics*. Oxford: Elsevier; 2003.
21. Richards, B.S., Conibeer, G.J.: A comparison of hydrogen storage technologies for solar-powered stand-alone power supplies: A photovoltaic system sizing approach. *International Journal of Hydrogen Energy* 32 (2007) 2712–2718

#### Summary

Aleš Doucek<sup>1,2</sup>, Daniel Tenkrát<sup>2</sup>, Petr Dlouhý<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ústav jaderného výzkumu Řež a.s.

<sup>2</sup>Vysoká škola chemicko-technologická v Praze

#### Hydrogen production and its utilization for renewable energy sources regulation

The scope of the paper is to describe processes and economy of hydrogen production and utilization and possible future trends. Hydrogen, regarded as perspective fuel of future, should serve as a suitable energy carrier with its unique properties. The aim of the second part is to introduce hydrogen as a tool for regulation of renewable energy sources with special focus on photovoltaic energy.