

Česká zemědělská univerzita v Praze
Technická fakulta

Vodík jako zdroj energie
bakalářská práce

Vedoucí práce: RNDr. Jan Sedláček, Ph.D.

Autor práce: Liubou Kameneva

PRAHA 2016

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Liubou Kameneva

Obchod a podnikání s technikou

Název práce

Vodík jako zdroj energie

Název anglicky

Hydrogen as an energy source

Cíle práce

Z dostupné literatury popsat fyzikálně chemické vlastnosti vodíku, fyzikálně chemickou podstatu energie z vodíku, obecně charakterizovat možnosti využití energie z vodíku, uvést pozitiva a negativa využití energie z vodíku, porovnat výhody a nevýhody energie z vodíku s klasickými zdroji.

Metodika

1. Na základě studia dostupných materiálů vypracovat bakalářskou práci dle předložené osnovy. Předpokládá se rešeršní práce bez vlastních experimentů.

Doporučený rozsah práce

25 – 30 stran

Klíčová slova

Fyzikálně chemické vlastnosti vodíku, fyzikálně chemická podstata energie z vodíku, možnosti využití, náklady, přínosy, eventuální ekonomické zhodnocení.

Doporučené zdroje informací

- 1) HALLIDAY, D. et. al.: Fyzika. VUTIUM, Brno 2003, 1198 s. ISBN 80-214-1868-0
- 2) MECHLOVÁ, E., KOŠTÁL, K. et. al.: Výkladový slovník fyziky. Prometheus, Praha, 1999, 588 s. ISBN 80-7196-151-5
- 3) HALPERN, A.: 3000 Solved Problems in Physics. McGraw-Hill, New York, 1988, 751 pp. ISBN 0-07-025734-5
- 4) JARDINE, J.: Physics through Applications. Oxford University Press, Oxford, 1991, 247 pp. ISBN 0-19-914280-7

Předběžný termín obhajoby

2015/16 LS – TF

Vedoucí práce

RNDr. Jan Sedláček, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra fyziky

Elektronicky schváleno dne 13. 3. 2015

prof. Ing. Martin Libra, CSc.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 30. 6. 2015

prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.

Děkan

V Praze dne 30. 03. 2016

Prohlášení

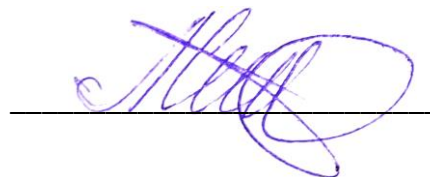
„Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: „Vodík jako zdroj energie“ vypracovala samostatně a použila jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědoma, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Jsem si vědoma, že moje bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí.

Jsem si vědoma, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.“

V Praze dne 31. března 2016



Poděkování

Na tomto místě bych chtěla poděkovat vedoucímu bakalářské práce, RNDr. Janu Sedláčkovi, Ph.D., za ochotu a vstřícný přístup.

Abstrakt: Cílem této bakalářské práce bylo na základě shrnutí chemických a fyzikálních vlastností vodíku popsat podstatu energie z vodíku, možnosti a způsoby její získání, klady a zápory hlavních technologických řešení vodíkové energetiky a jejich současný stav.

Práce se kromě toho věnuje přehledu způsobů výroby, skladování, přepravy a následného využití vodíku, jako energetického nosiče a pravděpodobného prostředku pro budoucí ukládání energie. Přes rešerší technologických řešení, dostupných již nyní ale také výhledově perspektivních do budoucna, a taktéž skrz pohled na ekonomické ukazatele vodíkové energetiky se práce pokouší najít odpověď na otázku, zda můžeme opravdu spoléhat na vodíkovou energetiku, jako na jistý způsob zabezpečení energetických nároku lidstva v blízké budoucnosti.

Klíčová slova: Vodík, energetika, zdroje, obnovitelné, akumulace, technologie.

Hydrogen as an energy source

Abstract: The aim of the bachelor thesis was to describe the essence of hydrogen energy, options and methods of its obtaining, the pros and cons of the main technological solutions of hydrogen energy, based on the summary of the physical and chemical hydrogen properties.

Besides that, the thesis is also dedicated to an overview of the production methods, storage and transportation, and also the hydrogen usage as an energy carrier and a potential resource for future energy storage. Though retrievals of technology solutions available nowadays, as well ones seem perspective for the future, considering the economic aspects of hydrogen energy, the thesis attempts to answer the question of whether we can actually rely on hydrogen energy, as on a certain way of fulfilling energy needs of mankind in the near future.

Key words: Hydrogen, energy, sources, renewable, storage, technologies.

Obsah

Seznam obrázků	8
Úvod	9
Vodík v energetice – současnost, vize, perspektivy.	9
Cíl práce, metodika a zdroje dat	11
Vlastní výsledky řešerše	12
Základní údaje o vodíku, jeho vlastnostech, výskytu v přírodě, sloučeninách, způsobech výroby, skladování a transportu.	12
Vodík jako prvek	12
Vodík jako látka	13
Výskyt vodíku.....	13
Laboratorní příprava vodíku.....	14
Průmyslová výroba vodíku.	14
Skladování vodíku.	18
Transportování vodíku	19
Vodíková energetika – technologický pohled.	21
Podstata vodíkové energie	21
Získávání vodíkové energie	22
Příklady fungujících vodíkových projektů.	25
Ekonomické zhodnocení.....	30
Vodíková energetika – ekonomický pohled.....	30
Produkce.....	30
Přeprava a skladování	32
Využití.....	33
Vodíková energetika – výzvy a perspektivy.	36
Závěr.....	39
Vodík nebo?	39
Bibliografie	41
Příloha	

Seznam obrázků

Obrázek 1: Schéma vodíkového hospodářství	10
Obrázek 2: Palivový článek – schéma.....	23
Obrázek 3: Komerční vyzrállost hlavních vodíkových technologií	26
Obrázek 4: Schéma uhelno vodíkové elektrárny GreenGen	26
Obrázek 5: Schéma vodíkového distribučního systému SPERA	27
Obrázek 6: Instalace hybridního vodíkového zařízení GIACOMINI	28
Obrázek 7: Vnitřek vodíkové čerpací stanice	29
Obrázek 8: Vodíkové hospodářství.....	30
Obrázek 9: Zastoupení různých způsobů výroby vodíku ve světovém měřítku.....	31
Obrázek 10: Struktura světové spotřeby vodíku.....	33
Obrázek 11: Účinnost palivového článku	35
Obrázek 12: Komerční vyspělost integrovaných vodíkových řešení.....	36
Obrázek 13: Koncept energetických uzlů, který propojuje nezávislé obnovitelné zdroje energie s ostatními formami energie a vodíkové hospodářství.....	37
Obrázek 14: Ekonomické, technologické a sociální aspekty budoucnosti vodíkové energetiky.	38

Úvod

Vodík v energetice – současnost, vize, perspektivy.

Energetika je páteř ekonomiky. Růst ekonomiky vykazuje stále větší energetické nároky, nehledě na pokračující úsporné trendy. Zdrojem energie jsou v současnosti přírodní obnovitelné, ale hlavně neobnovitelné zdroje a suroviny. Tyto zdroje jsou v principu vzájemně nahraditelné a jejich volba je v konkrétních případech ovlivněna dostupností, cenou a dalšími vedlejšími náklady, jako je bezpečnost pro populaci a životní prostředí. V posledních letech pozorujeme zásadní změny v energetice, především ve vyspělých zemích ale i ve zbytku světa. Nové, zásadní faktory, jež začínají silně ovlivňovat světovou energetiku, jsou změny klimatu, postupné vyčerpávání levných zdrojů energie a očekávaný růst cen energií a v neposlední řadě s tím související otázky energetické bezpečnosti a soběstačnosti jednotlivých ekonomických celků. Sílí volání po alternativních, dlouhodobě udržitelných, ekologicky čistých a bezpečných technologiích získávání energie.

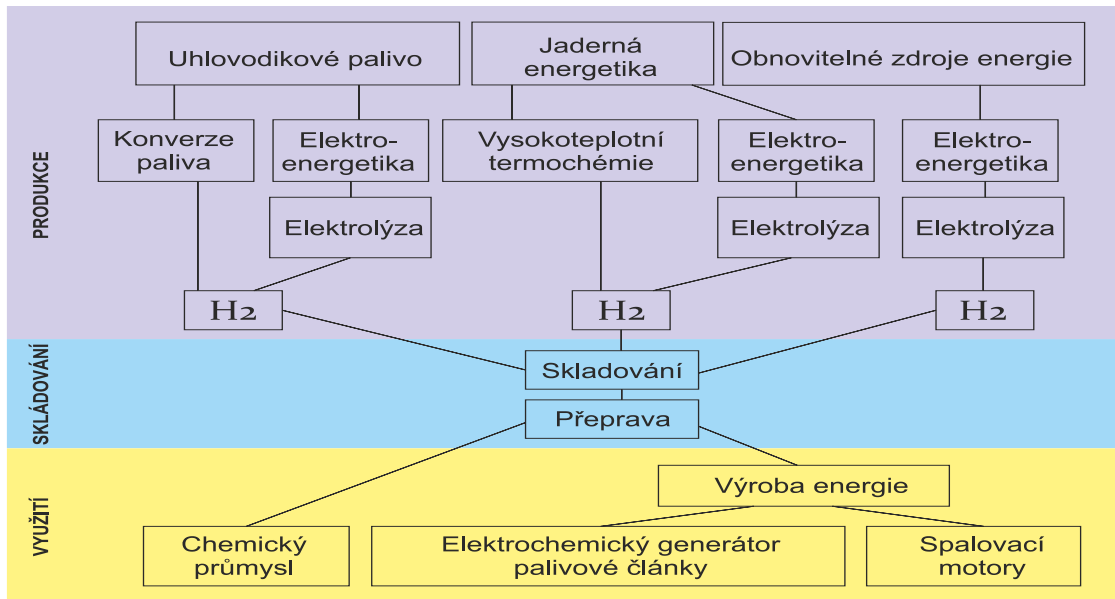
Ke konci minulého století byly studovány různé možnosti řešení tohoto problému, které se mohou rozdělit do dvou základních kategorií: snižování spotřeby a nové technologie přeměny energie. V energetice i v dopravě se objevil podobný problém – přes dílčí úspěchy ve snižování energetické náročnosti (zvyšování účinností elektráren, snižování spotřeby paliva u automobilů) je nárůst počtu spotřebitelů takový, že se výše zmíněné úspěchy neprojevily v takové míře, aby nárůst spotřeby energie výrazně zpomalily.

Vodík jako jedna z nadějných alternativ je již dlouhodobě v centru pozornosti (A NATIONAL VISION OF AMERICA'S TRANSITION TO A HYDROGEN ECONOMY — TO 2030 AND BEYOND, 2002). Dle České vodíkové technologické platformy (HYTEP – Hydrogen Technology Platform) vodíkové hospodářství je možné definovat jako soubor technologických řešení pro uspokojování energetických potřeb, jejichž společným jmenovatelem je vodík. Hned v úvodu je třeba zdůraznit, že vodík není klasické palivo, ale energetický vektor neboli nosič energie (Dlouhý, 2007). Vodík jako nosič energie se dá využít v mnoha aplikacích, ať už energetických, pro výrobu elektřiny a tepla, v dopravě pro pohon automobilů, nebo pro přenosná zařízení typu notebook, mobilní telefony apod.

Unikátní vlastnosti vodíku předurčují jeho eventuální klíčovou roli v energetice budoucna. Během následujících dekád použití vodíku v energetice může přinést vyřešení téměř všech těchto výzev – snížit závislost na fosilních palivech, snížit nežádoucí emise do atmosféry, zabezpečit celkovou lepší dostupnost energetických zdrojů. V neposlední řadě očekávaný boom vodíkového průmyslu bude stimulovat další technologická odvětví a tím zásadně přispěje k celkovému ekonomickému

růstu. Jako nejperspektivnější aplikace pro vodíkové hospodářství se jeví doprava ale hlavně, decentralizované energetické systémy.

Obrázek 1: Schéma vodíkového hospodářství



Vodíkové hospodářství současnosti je zjednodušeně vyobrazeno na obrázku 1. Tato práce se věnuje popisu fyzikálně chemických vlastností vodíku, podstatě energie z vodíku a dále způsobům produkce, přepravy a skladování vodíku. V práci byly zkoumány také možnosti využití vodíku pro výrobu energie, a to jak z technologického, tak i z ekonomického pohledu. Dále jsou uvedeny příklady fungujících vodíkových energetických komplexů, perspektivy a úskalí rozvoje vodíkové energetiky. V závěru této práci se pokusíme na základě zkoumání současného stavu vodíkových energetických projektů odpovědět na otázku, zda má vodík jako budoucí možný ústřední energetický vektor perspektivu.

Cíl práce, metodika a zdroje dat

Cílem této bakalářské práce bylo na základě shrnutí chemických a fyzikálních vlastností vodíku popsat podstatu energie z vodíku, možnosti a způsoby její získání, klady a zápory hlavních technologických řešení vodíkové energetiky a jejich současný stav. Při zpracování práce jsem v teoretických pasážích vycházela z rešerše odborné literatury, ať už v tištěné či internetové podobě, dále různých internetových článků, týkajících se vodíkových technologií v energetice a příbuzných témat. Po sběru dat a informací jsem provedla jejich třídění, analýzu a vyhodnocení. Posléze následovala komparace údajů, uváděných v jednotlivých zdrojích a pokus o vyhodnocení těchto dat a interpretaci získaných poznatků.

V části o ekonomických ukazatelích jednotlivých vodíkových technologických řešení pro mě byly stěžejní především tyto odborné publikace: DECOURT, Benoit, Bruno LAJOIE, Romain DEBARRE a Olivier SOUPA. 2014. HYDROGEN - BASED ENERGY CONVERSION: More than storage: system flexibility. Gravenhage (Netherlands): SBC Energy Institute. (<http://www.sbc.slb.com/SBCInstitute/Publications/Hydrogen.aspx>)

a MORDKOVIČ, V.Z. 2006. Трезвый взгляд на водородную энергетику (Trezvyj vzgljad na vodorodnuju energetiku). Chimija i žizň. Moskva: Chimija i žizň, (5), 8-11. (http://files.school-collection.edu.ru/dlrstore/0c814d79-8194-6881-b969-6e462aaf13ed/08-11_05_2006.pdf).

Musela jsem také použít oficiální stránky dodavatelů nebo provozovatelů jednotlivých vodíkových řešení s cílem získat konkrétní ekonomické údaje o efektivitě a účinnosti těchto zařízení.

Ve všech částech své práce jsem čerpala zejména z internetových zdrojů, např. z oficiálních stránek Amerického ministerstva energetiky (DOE), portálu České vodíkové platformy HYTEP, Ministerstva průmyslu a obchodu ČR a řady dalších odborných publikací, analýz a studií, veřejně dostupných na internetu. Přitom jsem se snažila o kritický a zdrženlivý přístup ke zdrojům, jejíž důvěryhodnost není zaručena respektovanými národními nebo mezinárodními autoritami.

Vlastní výsledky rešerše

Základní údaje o vodíku, jeho vlastnostech, výskytu v přírodě, sloučeninách, způsobech výroby, skladování a transportu.

V této kapitole pro připomenutí shrneme základní údaje o vodíku známé z chemie, fyziky, geologie a astrofyziky. Většina těchto vědomostí jsou již delší dobu známá a v zásadě „tabulkové“ údaje. Nicméně je dobré je mít v souhrnu a po ruce pro pochopení dalších aspektů této práce.

Vodík jako prvek

Vodík je první prvek periodické soustavy. Jeho atomy jsou složeny z jednoho protonu a jednoho elektronu. Jako prvek se nedá přesně zařadit do žádné určité skupiny prvků. Jeho výjimečné postavení je způsobeno tím, že ve skutečnosti první (rudimentární) perioda přirozené soustavy zahrnuje pouze dva prvky – vodík a helium, nikoliv osm nebo více prvků jako periody další. A tak v sobě vodík spojuje znaky jak první, tak předposlední (sedmé) hlavní podskupiny periodické soustavy. V jeho vztazích k prvkům I. a VII. hlavní podskupiny, tj. k alkalickým kovům a halogenům, je však pozoruhodný rozdíl: Chemické vlastnosti, jimiž se blíží alkalickým kovům, jsou – s výjimkou jeho mocenství – u vodíku podmíněny zcela jiným okolnostem než u alkalických kovů, kdežto vlastnosti, v nichž se projevuje jeho příbuznost s halogeny, mají stejné příčiny jako u halogenů. Můžeme tedy vodík krátce charakterizovat takto: *Vodík je halogen, který pro své zvláštní postavení jako první člen celkové řady prvků vykazuje ve svém chemickém chování určitou vnější příbuznost s alkalickými kovy.*

Vodík se vyskytuje ve **třech izotopech** (atomech jednoho prvku s odlišným počtem neutronů), a sice jako **protium** ^1H (lehký vodík - 99,985 %), **deuterium** ^2H (0,015 %) a **tritium** ^3H (0,0001 %). Tritium je radioaktivní s poločasem rozpadu 12,32 roku.

- Chemické vlastnosti vodíku vyplývají ze stavby jeho atomů a z jeho postavení v periodickém systému. Při slučování vodíku se elektronový obal jeho atomů může upravit dvojím způsobem:
- Přibráním jednoho elektronu nabude atom vodíku elektronový obal vzácného plynu helia, čímž se atom vodíku mění na aniont H^- .
- Ztrátou jediného elektronu se atom vodíku mění na proton, kationt vodíku H^+ bez elektronového obalu.

Jedná se o prvek, který tvoří největší počet sloučenin. Ve sloučeninách vystupuje v oxidačním stavu +I a -I. Téměř se všemi prvky tvoří vodík binární sloučeniny, hydridy, s různým typem vazby. S alkalickými kovy a kovy alkalických zemin tvoří tuhé bezbarvé, silně reaktivní iontové hydridy (hydrid sodný NaH se explozivně rozkládá vodou, hydrid rubidný RbH a cesný CsH jsou samozápalné i na suchém vzduchu).

S většinou přechodných kovů a se všemi lanthanoidy a aktinoidy tvoří hydridy kovové (intersticiální), s ostatními prvky vznikají kapalné nebo plynné hydridy kovalentní nebo

přechodné. S beryliem a hořčíkem tvoří vodík zajímavé hydridy BeH_2 a MgH_2 se středovými dvouelektronovými vazbami, tyto hydridy se vyznačují schopností tvorby polymerních řetězců.

S řadou prvků vodík netvoří binární sloučeniny, tyto prvky s velice nízkou afinitou k vodíku jsou v periodické tabulce někdy označovány jako vodíková mezera. Mezi typické prvky vodíkové mezery patří např. mangan, železo, kobalt, stříbro a zlato. Je to také významný biogenní prvek. Je jedním ze základních „stavebních kamenů“ všech organických látek a potažmo – všech živých organizmů.

Atomový vodík je velmi aktivní a reaguje s celou řadou látek již při nízkých teplotách. Je to velmi silné redukční činidlo. Pokud nedochází k okamžité reakce, vodík ve stavu zrodu se rychle slučuje do molekulárního vodíku H_2 . Tím se vytváří dvouatomové molekuly, které obsahují jednoduchou kovalentní σ -vazbu. V důsledku dvojí možné vzájemné orientace jaderných spinů jednotlivých atomů vodíku může vznikat molekula s paralelní orientací spinu (ortho-vodík) nebo s antiparalelní orientací spinu (para-vodík). Para-vodík je energeticky chudší, a proto přednostně vzniká při nízkých teplotách.

Vodík jako látka

Vodík jako látka H_2 je bezbarvý plyn bez chuti a zápachu. Je lehčí, než vzduch. Hustota [g cm^{-3}] 0,00008988, teplota varu $-252,8\text{ }^\circ\text{C}$. Kritická teplota vodíku je $-239,96\text{ }^\circ\text{C}$. Nad touto teplotou existuje pouze v plynném stavu. Za extrémních podmínek (velmi vysoký tlak a nízká teplota) může vodík mít pevný stav dokonce i kovovou supravodivou formu. Vodík má vysokou tepelnou vodivost. Ve vodě se rozpouští relativně špatně, naproti tomu je dobře rozpustný v celé řadě kovů, např. v Ni, Pt a obzvlášť dobře v Paládiu. Molekulový vodík je relativně stabilní a díky vysoké hodnotě vazebné energie (432 KJ) poměrně málo reaktivní. Za normálních teplot přímo reaguje jen s některými aktivními kovy, například s vápníkem (Ca) s vytvářením hydridů a také s fluorem a chorem. Zapálený vodík reaguje s kyslíkem za vzniku vody. Za vhodných podmínek se vodík přímo slučuje se sírou, bromem, jodem a dusíkem. S ostatními prvky obvykle reaguje nepřímě. Plynný vodík je hořlavý, hoření však nepodporuje, se vzduchem tvoří výbušnou směs.

Výskyt vodíku

Vodík není jen první prvek periodické tabulky. Pravděpodobně je to první prvek, jenž vznikl ve vesmíru. Po dostatečném vychladnutí původní hmoty, složené převážně z kvarků a gluonů, vznikají těžší částice – protony a neutrony. Kolem sté vteřiny existence vesmíru teplota a energie, obsazená v hmotě již nestačí pro rozpad jader a proměnu protonu na neutron a to pak umožňuje vznik prvních lehkých prvků, především, vodíku a helia (Wagner, 2002).

Vodík je nejrozšířenějším prvkem ve vesmíru, vyskytuje se jak ve všech svítících hvězdách, tak v mezigalaktickém prostoru a to prakticky jen v atomární formě. Podle současných měření se podílí ze 75 % na hmotě a dokonce z 90 % na počtu atomů přítomných ve vesmíru.

Na Zemi se vodík vyskytuje ve formě sloučenin a to zejména ve formě vody H_2O , jejíž celkové množství je cca 1,4 bil. km^3 , a také ve formě organických a anorganických sloučenin.

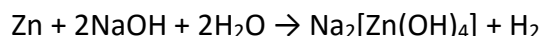
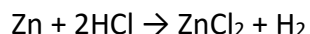
Plynný vodík se na Zemi vyskytuje jen vzácně a to v sopečných plynech a v atmosféře ve výškách nad 100 km, odkud se postupně vyprchává do volného vesmíru.

Na konci XX století se objevují hypotézy řady vědců, především v Rusku, že jádro Země je složené ne z železoničkové slitiny ale z hydridů různých kovů (Mg,Fe). Vodík z těchto hydridů se postupně uvolňuje a prosakuje skrz magmat a zemskou kůru na povrch (Larin, 1993). Jako potvrzení této své teorii V. N. Larin a další uvádí přítomnost většího množství vodíku ve vulkanických plynech a geotermálních vodách v některých regionech, především, na Islandu a ve Střední Asii. Pokud by tato hypotéza byla skutečně pravdivá, Země by disponovala prakticky neomezeným a relativně lehce dostupným množstvím vodíku. V současnosti tato teorie není experimentálně potvrzena a zůstává pouhou hypotézou.

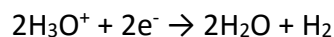
Celkový podíl vodíku v zemské kůře, podle aktuálních propočtů, činí 0,88 % její hmotnosti. Celkové množství vodíku v zemské kůře včetně hydrosféry a atmosféry je kolem $2,37 \times 10^{18}$ kg.

Laboratorní příprava vodíku.

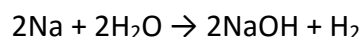
- V laboratoři se může vodík připravovat reakcí neušlechtilých kovů s kyselinami nebo hydroxidy v tzv. Kippově přístroji:



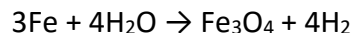
- Dále můžeme vodík získat elektrolýzou vody, která obsahuje malé množství H_2SO_4 nebo NaOH pro zvýšení vodivosti. Elektrolýza se provádí v Hoffmanově přístroji, kde se vodík vylučuje na katodě:



- Další výrobní metodou je reakce s1 a s2 prvků s vodou:



- Posledním významnějším postupem je reakce vodní páry se železem:



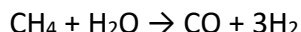
Průmyslová výroba vodíku.

Vodík může být vyráběn mnoha způsoby z širokého spektra vstupních zdrojů. V celosvětové produkci vodíku dominuje v současné době výroba z fosilních paliv (Dicks, 1996). Celková roční produkce vodíku se nyní pohybuje okolo 500 miliard m^3 , přičemž jeho spotřeba ročně roste asi o 3,5 % (World Hydrogen, 2010).

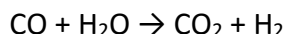
- **Parní reforming zemního plynu**

V současné době nejrozšířenější způsob výroby vodíku (cca 90 % celkové produkce). Proces má dvě fáze: v první se za přítomnosti katalyzátoru do vodní páry při teplotách 500–950 °C a tlaku 0,3–2,5 MPa přivádí metan (dominantní část zemního plynu). Směs

metanu a páry reaguje za vzniku vodíku a oxidu uhelnatého a menšího podílu oxidu uhličitého:



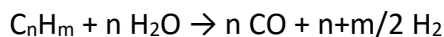
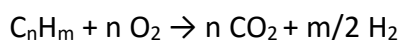
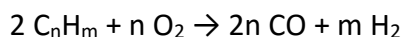
Poté následuje navyšování množství produkovaného vodíku konverzí CO z reforméru s další přidanou párou. Reakce probíhá již za nižších teplot:



Účinnost produkce vodíku je závislá na poměru páry a uhlíku ve směsi a pohybuje se okolo 80 %. Značnou nevýhodou je produkce vysokého množství oxidu uhličitého – na 1 kg vodíku se vyprodukuje 7,05 kg CO₂. Tento způsob je v současné době nejlevnější, dle údajů DoE (USA) je cena 1 kg vodíku, vyrobeného tímto způsobem je mezi 2–5 USD (Ruth, 2011).

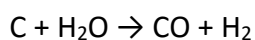
- **Parciální oxidace ropných frakcí**

Požívají se plynné nebo kapalné frakce z různých procesů zpracování ropy, nejčastěji se ale zplyňují těžké ropné frakce vakuové zbytky, zbytky z termického a katalytického štěpení. Surovina (obecně C_nH_m) se zplyňuje kyslíkem a vodní parou při teplotách 1 300–1 500 °C a tlacích 3–8 MPa:



Parciální oxidací různých surovin se vždy tvoří plynná směs obsahující CO, CO₂, H₂O, H₂, CH₄ a ze sirných sloučenin vzniklý H₂S a COS. Účinnost procesu je kolem 50 %. Tímto způsobem vyrobený vodík vyžaduje další čištění. Proces je využíván hlavně pro zpracování těžkých vedlejších produktů, vzniklých při výrobě v rafineriích. Tyto produkty většinou nelze samostatně prodat a tak výroba vodíku z nich je ekonomicky značně výhodná.

- **zplynování uhlí**

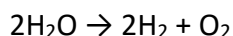


Nejstarší metoda výroby vodíku. Uhlí je ohřáto na teplotu 900–1000 °C, kdy se přemění na koksárenský plyn. Tento plyn obsahuje jako spalitelné složky vodík, metan, oxid uhelnatý a malé množství nenasycených uhlovodíků. Obsah vodíku je až 60 %. Plyn se poté smíchá s párou a přidá se katalyzátor obvykle na bázi niklu. Tento způsob se běžně používá v tzv. parogenerátorech již v polovině XIX století. Výroba je levná, cena 1 kg vodíku je kolem 2–2,5 USD, ale při tom vzniká velké množství CO₂, jež je potřeba nějakým způsobem zachycovat. V současnosti je již v provozu elektrárna GreenGen v Číně, jež vyrábí elektřinu z vodíku, vyrobeného zplynováním uhlí. Vznikající při tom

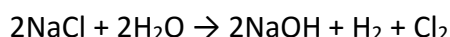
CO₂ je zachycován a následně ukládán (Xu, 2014). Výstavba podobné elektrárny FutureGen v americkém Illinois byla rozhodnutím americké administrativy zastavena začátkem roku 2015 kvůli nedostatku financí (Daniels, 2015).

- **Elektrolýza vody**

Elektrolýza je proces, při kterém stejnosměrný proud při průchodu vodným roztokem štěpí chemickou vazbu mezi vodíkem a kyslíkem:



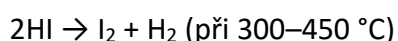
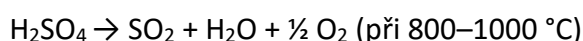
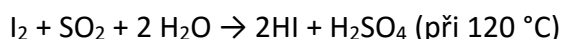
Vodík vznikající na katodě je jímán a následně skladován. Proces může probíhat za pokojových teplot a pro jeho chod je nutná pouze elektrická energie. Touto metodou výroby vodíku se dosahuje velmi čistého vodíkového plynu, který už není třeba dále dočišťovat. Účinnost procesu se pohybuje v rozmezí 80–92 %. Vzhledem k energetické náročnosti procesu je tato technologie závislá na ceně zdroje elektrické energie. Spotřeba elektrické energie na výrobu 1 m³ vodíku je v dnešní době asi 5,2 kWh. Celkový podíl elektrolytického štěpení vody na celosvětové produkci vodíku je asi 4 %. Cena vodíku při použití běžné elektřiny se pohybuje kolem 6–7 USD za jeden kilogram H₂. Jako pobočný produkt vodík vzniká při výrobě hydroxidu sodného (NaOH) pomocí elektrolýzy vodného roztoku NaCl:



Další možnost, jak zvýšit účinnost elektrolýzy je vysokoteplotní nebo parní elektrolýza. Do elektrolyzátoru vstupuje vodní pára a vodík. Vystupuje z něj obohacená směs, která obsahuje 75 % vodíku a 25 % páry. Následně je vodík z páry oddělen v kondenzační jednotce. Celková účinnost vysokoteplotní elektrolýzy, včetně výroby potřebné energie, může dosahovat až 45 % (Schultz, 2003).

- **Termochemické cykly štěpení vody**

Při termochemickém štěpení vody je voda rozdělena na kyslík a vodík pomocí série chemických reakcí, které jsou iniciované teplem, nebo v případě hybridních cyklů kombinací tepla a elektřiny. Prakticky se používá tzv. siřičito-jódový termochemický cyklus.



Vstupní surovinou je pouze voda a vysokopotenciální (s vysokou teplotou média) teplo. Výstupními surovinami jsou kyslík s vodíkem a nízkopotenciální teplo. Všechny vstupní suroviny jsou v kapalném skupenství. Jód a oxid siřičitý jsou recyklovány a opakovaně použity. Účinnost tohoto výrobního cyklu se pohybuje v mezi 40–52 % (50 % při 950 °C). Nevýhodou cyklu je nutnost vysokých vstupních teplot a agresivita kyseliny sírové a jodovodíkové. Další variantou termochemického štěpení je hybridní

termochemický cyklus kyseliny sírové. Vstupní suroviny jsou voda a oxid siřičitý a za přispění elektrické energie vzniká vodík a kyselina sírová, která se dalšími reakcemi rozpadá na vstupní suroviny a kyslík. Je to nejjednodušší ze skupiny sírových procesů. Účinnost tohoto procesu je okolo 40 %. Celý proces je velmi energeticky náročný, a proto je nejlépe použitelný vedle velkého energetického zdroje, jako například, nukleární elektrárna. Cena kilogramu vodíku, vyrobeného v S-I cyklu při použití energie z atomové elektrárny je odhadována kolem 1,74 USD (Schultz, 2003).

- **Výroba vodíku z BIO zdrojů**

Výroba vodíku z biomasy je možná jak termochemickým tak biochemickým způsobem. Při termochemickém způsobu, který je podobný zplynování uhlí, je biomasa zahřívána bez přístupu kyslíku na teplotu 500–800 °C. Vznikající směs plynů obsahuje určité procento vodíku a dále zejména oxid uhličitý a metan. Dále je možná druhá fáze, ve které jsou zbylé organické pevné látky a metan převedeny pomocí vodní páry na oxid uhelnatý a vodík při 600–1000 °C v kombinaci s dalším zvýšením výtěžku vodíku pomocí převedení oxidu uhelnatého na oxid uhličitý a vodík. Cena takto vyrobeného vodíku je kolem 5–7 USD za kilogram.

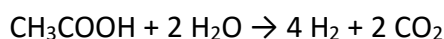
Mnohem perspektivnější se jeví **biochemická** nebo **biotechnologická** výroba. Při přímé biofotolýze dochází ke štěpení vody na kyslík a vodík za působení slunečního záření a enzymů, které jsou produktem mikroorganismů. Výroba vodíku přímou biofotolýzou využívá fotosyntetického systému mikrořas k přeměně solární energie na energii chemickou, potřebnou ke štěpení molekul vody za vzniku vodíku. Pro proces je nutné anaerobní prostředí s obsahem kyslíku do 0,1 %, neboť enzymy produkované mikroorganismy jsou na přítomnost kyslíku velmi citlivé. Přímá biofotolýza nepracuje s biomasou, vstupní látkou je pouze voda, která je levná a snadno dostupná. Nevýhodou je nízká účinnost okolo 5 %, která byla i přes pokročilý výzkum zvýšena v laboratorních podmínkách na maximálně 15 % (Bičáková, 2010). Existuje i tzv. nepřímá biofotolýza, jedná se o složitější proces skládající se z několika kroků: produkce biomasy fotosyntézou, koncentrace biomasy, anaerobní tmavé fermentace (viz. níže) a konverze acetátu (sůl kyseliny octové). V procesu nepřímé biofotolýzy se využívají cyanobakterií (sinice).

Dalším způsobem biologické produkce vodíku je fermentace sacharidů. Během fermentační metody dochází ke vzniku vodíku během kvašení pomocí různých druhů bakterií. V důsledku jejich metabolické aktivity nejprve dochází ke štěpení sacharidů na etanol a oxid uhličitý. Jako surovina v tomto kroku se využívají brambory, cukrová řepa, cukrová třtina apod.

V dalším kroku dochází k rozkladu etanolu a produkci vodíku a to pomocí tzv. tmavé fermentace nebo fotofermentace. Tmavá fermentace probíhá v nepřítomnosti světla za anoxických nebo anaerobních podmínek. Organické látky jsou v tomto případě využívány jako primární zdroj vodíku a také jako zdroj energie. Různé druhy bakterií využívají v nepřítomnosti kyslíku redukci protonů na vodík k uložení elektronů z oxidace organických látek:



Fotofermentace je podobný proces, probíhající s využitím energie světla:



Pro zvýšení ekonomické konkurenceschopnosti procesů se oba typy fermentací kombinují, kde odpadní acetát tmavé fermentace je dále využíván jako surovina v procesu fotofermentace. Účinnost při dvoustupňové fermentace může dosahovat až 40 % (Cheng, 2011).

Skladování vodíku.

Hlavním a dosud nejhůře vyřešeným problémem hospodaření s vodíkem je jeho skladování. Složitost tohoto problému je dána fyzikálními a chemickými vlastnostmi vodíku – nízkou hustotou, nízkým bodem varu, difuzními a reakčními schopnostmi. Vzhledem k těmto vlastnostem použitelné varianty skladování vodíku jsou do značné míry limitované momentálně dostupnými technologickými možnostmi. V současné době je vodík převážně skladován v plynné nebo kapalně formě.

- Pro **skladování vodíku v plynné fázi** se obvykle používají ocelové bezešvé lahve z nízkouhlíkaté nebo legované oceli. Běžně jsou používány lahve v objemech od několika litrů až do 300 l. Typickým provozním tlakem je 350 bar, v nejnovějších aplikacích potom 450 až 700 bar (současný technologický limit je 1000 bar). Stlačování vodíku je velmi energeticky náročné, energetické výdaje na stlačování dosahují 30 % palivové energie samotného vodíku (Dlouhý, 2007).
- **Kapalný vodík** musí být skladován při teplotě $-253 \text{ }^\circ\text{C}$ a tato podmínka vytváří zvýšené nároky na použité materiály a vysoké energetické nároky na zkapalnění. Zkapalňování vodíku je technologicky i energeticky náročný proces. Energie potřebná ke zkapalnění dosahuje přibližně 40 % energie v palivu. Pro uskladnění se používají vícevrstvé nádoby s velmi dobrými izolačními vlastnostmi s maximálním přetlakem 5 barů. Tyto nádoby musejí být vybaveny přetlakovým mechanismem, kterým je regulován maximální přípustný přetlak. Při skladování vodíku v kryogenních nádobách dochází vlivem přestupu tepla z okolí k postupnému odpařování a tedy zvyšování tlaku uvnitř této nádoby. Aby nedošlo k destrukci nádrže, musí být přebytečný tlak regulován odpouštěním odpařeného vodíku. Pro běžně používané nádrže dosahují ztráty až 3 % z obsahu na den. V některých aplikacích je takto unikající vodík jímán a stlačován do přídavných tlakových lahví.
- Jako perspektivní do budoucna, avšak v současnosti jsou stále ve fázi laboratorních nebo technologických pokusů jsou **alternativní metody ukládání** vodíku. Využívá se většinou schopnost vodíku pronikat do struktury nebo vázat se na povrch určitých materiálů. Jedním z nejperspektivnějších způsobů uchování vodíku je v jeho sloučeninách s některými kovy. Zejména **hydridy na bázi lehkých kovů** (Mg, Ca, Li, Na, Al) jsou schopny v sobě absorbovat značná množství vodíku. Tyto hydridy se

obvykle vyrábějí syntézami kovů s plynným vodíkem za vysokých teplot a tlaků. Absorpce vodíku do materiálů na bázi kovů je exotermní reakce, je tedy při ní vyvíjeno teplo. Opačný děj – desorpce, tedy uvolňování vodíku z materiálu, je naopak reakce endotermní (je třeba dodat hydridu teplo, aby uvolnil vodík). Za normální teploty jsou hydridy stabilní, nerozkládají se a jsou tedy relativně bezpečnými zásobníky vodíku. K jejich rozkladu dochází až za vyšších teplot, přičemž se uvolňuje plynný vodík. Současný vývoj směřuje k nalezení hydridů s nízkými teplotami rozkladu a vysokými objemy vázaného vodíku.

Mezi další způsoby skladování, jež jsou stále ve fázi výzkumu, zmíníme **adsorpci vodíku na vysokoporézním grafitu** nebo uhlíkatých nanotrubicích a **difuzní plnění skleněných mikrokuliček** (Dlouhý, 2007).

V současné době z důvodu nedořešené otázky skladování je většina vyrobeného vodíku používána přímo v místě výroby.

Transportování vodíku

Doprava vodíku je další z problémů, který k vodíkové energetice patří. V současnosti je to asi nejdražší na přepravu energetická surovina (v řadě: jaderní palivo, ropa, uhlí, plyn, elektřina). Důvody jsou technologické a fyzikální: vodík má asi třetinovou výhřevnost na jednotku objemu oproti zemnímu plynu. Tzn., že pro přesun stejného množství energie je potřeba přepravit trojnásobně více vodíku než zemního plynu. K tomu musíme připočítat již zmíněnou komplikovanost a náročnost skladování. Na druhou stranu, kvůli nižší hustotě vodík může být přepravován potrubím mnohem rychleji, a tím kompenzovat svoji menší energetickou kapacitu. Kromě toho, celkové náklady na přepravu s rostoucí délkou potrubí rapidně klesají a při vzdálenostech více než 1000 km jsou nižší, než náklady na přepravu elektřiny (Alexeeva, 2011).

V současnosti se vodík transportuje pomocí dálkových plynovodů nebo v tlakových nádobách.

- **Přeprava plynovody** je vhodná v místech kumulace mnoha výrobců a spotřebitelů. Nejdelší asi 400 km. dlouhé vodíkové potrubí spojuje Antverpy a Normandii (Simbeck, 2002). Druhá největší síť „vodíkovodů“ je v Německu, její celková délka je přes 200 km a kapacita kolem 50 mil. m³ za hodinu. Další, ale menší síť s podobnými parametry fungují v USA, Francii, Velké Británii a jiných zemích. Celkem ve světě je přes 16000 km vodíkových plynovodů. Hlavními problémy „vodíkovodů“ je koroze a křehnutí materiálu pod vlivem vodíku a vysoké požadavky na těsnost zařízení (kvůli velké difúzi vodíku) (Šváb, 2006). Ve Velké Británii nebo v Rusku byly provedeny pokusy s přepravou vodíku přes stávající potrubí pro přepravu zemního plynu, které prokázaly použitelnost existujících technologií pro přepravu vodíku (Dodds, 2012).

Do budoucna zcela převratným se jeví nápad kombinované kabelové potrubní přepravy kapalného vodíku a elektrického proudu, který by měl využívat supravodivosti měděných nebo hliníkových kabelů ponořených do kapalného vodíku (16–28 K)

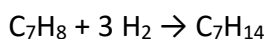
dopřívajícího při 0,8–1,5 MPa. Kabely bude veden střídavý proud s výkony do několika tisíc MW na vzdálenost asi 100 km (Superconductive cable system, 1969).

- **Přepřava v tlakových nádobách** může probíhat v **plynném nebo v kapalném stavu**. Tento způsob přepřavy je finančně nákladný a je používán nejčastěji pro občasné odběratele nebo maloodběratele.

Pro přepřavu v **kapalném stavu** se tradičně používají dvouplášťové vakuové zásobníky. Kvalita izolace musí být taková, aby vodík v kapalném stavu vydržel po dobu několika dní. Zásobníky obvykle mají objem 60 m³ a jsou vyprazdňovány tlakováním (řízeným odpařováním). Přepřava kapalného vodíku je vhodná pro středně velké odběratele (tisíce m³ denně). V Evropě se tento způsob přepřavy používá např. ve Francii – 10 t/den, Německu – 3 t/den a Holandsku – 5 t/den (Šváb, 2006).

- **Při přepřavě ve svázané formě** se vodík nachází ve sloučeninách, ze kterých může být následně relativně snadno uvolněn. Tyto sloučeniny musí plnit několik požadavků, a to zejména
 - a) Zachovávat fázový stav při určeném rozsahu teplot
 - b) Mít vysokou hustotu vázaného vodíku
 - c) Umožňovat snadné uvolnění vázaného vodíku
 - d) Být ekologicky nezávadnými

Jako nosiče je možné využít různé sloučeniny s vysokým obsahem vodíku, například amoniak (čpavek) a organické uhlovodíky. Největší potrubí přepřavující čpavek je mezi Ruskem a Ukrajinou. V tomto případě se nosič používá, tak říkajíc, jednorázově. Jsou i technologie, ve kterých se nosič používá opakovaně, tj. po uvolnění (většinou katalytickém) vodíku se vrací do původního stavu. Jako příklad uzavřeného technologického řešení uvedeme práci Indického národního výzkumného ústavu pro environmentální technologie (NEERI). Dle jimi navrženého technologického systému SPERA Hydrogen System je vodík přepřavován a skladován ve svázané formě tekutých organických hydridů (LOH) zejména, methylcyclohexanu, který vzniká hydratací toluenu:



Methylcyclohexan (MCH) je stabilní tekutá látka, která může být přepřavována jak potrubím tak i v tancích. V místě spotřeby je následně pomocí katalyzátoru (Pt/Al₂O₃ nebo S-Pt/Al₂O₃), vyvinutému NEERI, z MCH je uvolňován plynný vodík. Účinnost celého systému SPERA je dle údajů NEERI kolem 98 % ("SPERA Hydrogen" System for Large Scale H₂ Storage & Transportation and H₂ Supply Chain Concept Concep, 2014).

Další slibnou technologii ukládání vodíku vyvíjí vědci Technické univerzity v Dánsku (Pazdera, 2005). Vyvíjí tablety z mořské soli plněné čpavkem. Tak je vodík možno skladovat po takovou dobu, po jakou je třeba. Amoniak je z tablety uvolněn pomocí

katalyzátoru, ten dokáže z molekuly uvolnit volný vodík. Jakmile je tableta prázdná, je jí údajně možno po jednoduchém „dobití“ opakovaně použít.

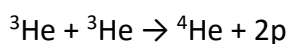
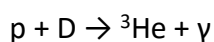
Vodíková energetika – technologický pohled.

V této kapitole se podíváme na současný stav vodíkové energetiky ve světě z hlediska technologického a také trochu ekonomického. Vodík představuje jednu z významných surovin chemického průmyslu a jako takový je dnes odbornou komunitou vnímán především. Výzkum energetického využití vodíku se již několik desetiletí ubírá jiným směrem – připravuje vznik vodíkové ekonomiky. Tím se myslí soubor chemických a dalších technologií a procesů zaměřených na efektivní výrobu a využití vodíku především jako zdroje čisté energie – energie bez škodlivých emisí a jako náhradu fosilních paliv.

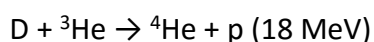
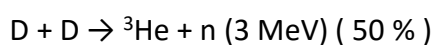
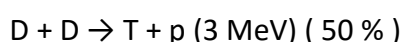
Podstata vodíkové energie

Z podstaty a vlastnosti vodíku jako chemického prvku a látky umíme získávat energii z vodíku dvěma způsoby: s použitím termonukleárních nebo chemických reakcí.

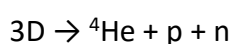
- Při **termonukleárních reakcích s účastí vodíku** dochází při vysokých teplotách (kolem 14 mil. K) a tlaku ke slučování atomových jader. Například syntéza (fúze) jádra helia ze 4 jader vodíku v tzv. protonovém cyklu, jež probíhá ve hvězdách (Encyklopedie fyziky, 2011):



v pozemských podmínkách z hlediska požadavků na dostupnost paliva, energetický zisk a technickou uskutečnitelnost jsou proveditelné tyto termonukleární reakce:



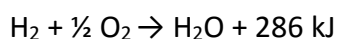
Celá sada reakcí se dá sumarizovat jako



V principu lze tedy použít jako palivo pouze deuterium a výsledný produkt bude helium. Avšak tyto reakce jsou zatím uskutečnitelné pouze v podmínkách vodíkové pumy. Desetiletí trvající výzkum tzv. „studené“ nebo „řízené“ termonukleární fuze ve žhavém plazmatu se zatím, bohužel, nijak nepřiblížil praktickému využití (Weinzettl, 1998). Dle dostupných zdrojů nelze očekávat reální technologickou realizaci průmyslově použitelné řízené termonukleární fuze dříve než v roce 2030. Prudký pokles cen fosilních paliv, který začal v roce 2015 a pokračuje i nyní pochopitelně dál snižuje

investice a zájem o tento zdroj energie. Proto tento teoreticky velice perspektivní a čistý způsob produkce energie z vodíku zatím ponecháme a soustředíme se na možná méně vzrušující ale o to použitelnější a praktičtější způsob získávání energie z vodíku.

- **Chemickou energii**, která je ve vodíku 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. Oxidace vodíku při klasickém spalování probíhá s uvolněním velkého množství energie:



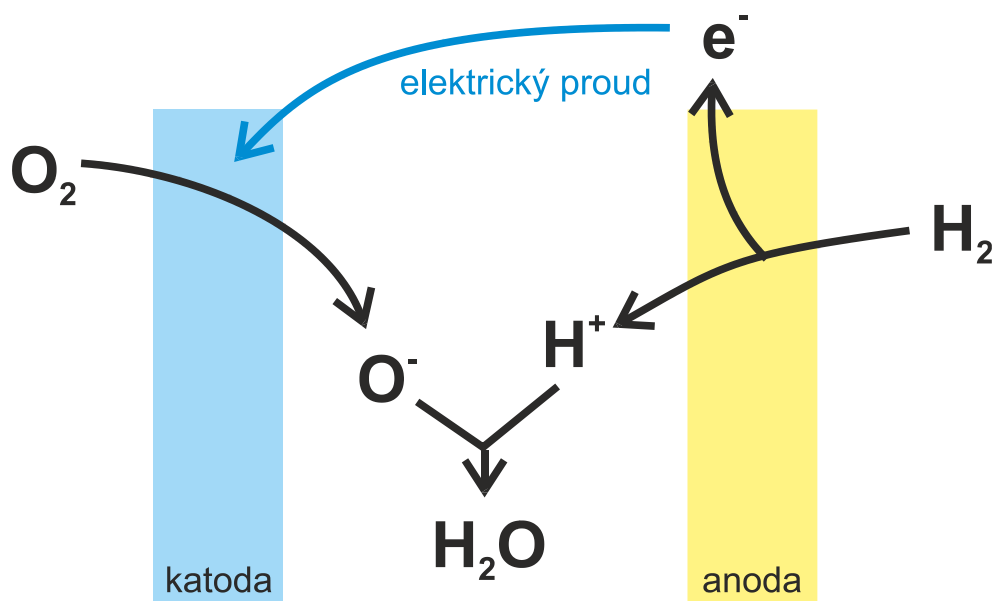
Pro srovnání, při spalování metanu se uvolňuje 890 kJ, tvrdého uhlí 394 kJ energie.

Získávání vodíkové energie

Jak již bylo zmíněno, pro získávání energie z vodíku se používají v současnosti v zásadě dvě cesty. První je **využití tepelného stroje**, ať již ve formě spalovacího motoru či plynové turbíny. V tomto případě se jedná o vyspělé průmyslové technologie dlouhodobě komerčně dostupné a využívané. Jejich základní nevýhodou je relativně **nízká účinnost** omezená z termodynamického hlediska Carnotovým cyklem. Vodík má při teplotách nad cca 40K zápornou hodnotu Jouleova-Thomsonova koeficientu a proto se navíc při expanzi ohřívá.

Mnohem perspektivnější cestou se jeví získávání energie z vodíku **pomocí palivových článků**. Palivový článek můžeme definovat jako elektrochemické zařízení, uskutečňující přímou přeměnu chemické energie vodíku a kyslíku na energii elektrickou, vodu a teplo. Tato přeměna se děje katalytickými reakcemi na elektrodách a je v podstatě založena na obráceném principu elektrolýzy vody. Princip činnosti palivového článku si můžeme vysvětlit pomocí jednoduchého schématu na obrázku 2. Palivový článek se skládá z elektrolytu, katody (modrá barva), anody (žlutá barva) a elektrického okruhu. Elektrolyt musí být iontově vodivý, v našem případě se jedná o protonový vodič. Pro elektrický proud musí být dielektrikem, elektrony tedy propouštět nesmí. Vodík je přiváděn k anodě, na které se katalyticky štěpí na protony a elektrony. Protony přechází elektrolytem ke katodě, zatímco uvolněné elektrony přechází vnějším vedením a produkují elektrický proud. Ke katodě je přiváděn kyslík, který zde katalyticky reaguje s prostoupenými protony a elektrony za vzniku vody. Na obou elektrodách **vzniká potenciální rozdíl kolem jednoho voltu**, který při zatížení článku poklesne obvykle na hodnoty 0,5–0,8 V. Aby bylo dosaženo potřebného vyššího napětí, jsou desítky článků sériově uspořádány do jednotlivých svazků stavebnicovým způsobem. Jednotlivé svazky mohou být opět libovolně propojovány sériově nebo paralelně podle požadavků na produkované napětí a proud.

Obrázek 2: Palivový článek – schéma



Svou činností se palivový článek podobá klasickým akumulátorům, ve kterých rovněž probíhá **přímá přeměna chemické energie na energii elektrickou**. Na rozdíl od nich však používá **zevnějšku dodávané palivo**, což mu umožňuje **libovolně dlouhý provoz**. Palivem do palivových článků může být vodík v plynném nebo kapalném stavu, nebo mohou být používána nepřímá, vodík obsahující paliva, z nichž je vodík uvolňován tzv. reformingovým procesem.

Proti současným energetickým zdrojům **mají palivové články řadu výhod**, z nichž na prvním místě lze jmenovat významně vyšší účinnost a **ekologický provoz**. Palivové články při přímé přeměně chemické energie na energii elektrickou vypouští mezistupně spalovacích procesů i pohybující se mechanická zařízení, jako jsou turbíny, alternátory a generátory a nabízí proto **výrazně vyšší účinnost**. Jediným odpadem při provozu vodíkových palivových článků je čistá voda (při využívání reformovaných paliv je produkováno určité množství oxidu uhličitého a dalších oxidů, jejich množství je však významně nižší než při použití tepelných strojů). Z dalších předností palivových článků lze jmenovat **nepatrné nároky na údržbu**, dále absencí pohybujících se součástí, **tichý provoz bez vibrací** a některé typy jsou schopné dodávat elektrickou energii ihned po spuštění reakce. V případě výroby elektrického proudu ve statických zařízeních mohou být umístěny přímo v místě spotřeby a mají možnost **snadného využití odpadního tepla**.

Palivových článků existuje několik druhů a většinou jsou děleny podle používaného elektrolytu (alkalické, kyselé, membránové, karbonátové) a podle pracovní teploty (nízkoteplotní, středně a vysokoteplotní). Podrobnosti jsou v tabulce 1 v příloze.

Ze všech uvedených typů palivových článků v současné době dominují a nejperspektivnější jsou **palivové články membránové**. Jako jediné se uplatňují ve všech oblastech použití: jako primární zdroje elektrické energie jsou zatím na druhém místě za PAFC, ale naprosto bezkonkurenční jsou v automobilové dopravě a jako přenosné palivové články. Alkalické články dominovaly dlouhá léta v kosmickém výzkumu, ale v posledních letech začínají

membránové palivové články pronikat i do tohoto odvětví. Další uplatnění alkalických palivových článků lze očekávat v lodní dopravě a u některých druhů pozemních dopravních prostředků. Při přímé výrobě elektrické a tepelné energie pro rodinné domy a menší objekty dominují opět membránové palivové články, k nim se začínají přidávat palivové články s vodivými oxidy. Mezi výkonnými statickými kogenerační jednotky v současné době dominují kyselé články PAFC. Ve významné míře se v různých převážně zkušebních provozech uplatňují vysokoteplotní články s tavenými karbonáty a s vodivými oxidy. Do budoucna lze očekávat, že tyto články získají zásadní převahu. Existují i úvahy o budoucím pronikání článků s vodivými oxidy do automobilového průmyslu. Jejich pomalý start při ohřevu na potřebnou pracovní teplotu by podle těchto úvah mohl být řešen hybridním způsobem při kombinaci s akumulátorem.

Palivové články se v současné době **běžně vyrábějí** v širokém rozsahu velikostí od malých článků pro napájení přenosných počítačů nebo rádiových vysílačů až po velké články a jejich skupiny určené pro elektrárny o výkonech řádu několika MW. Moderní palivové články mají tyto **klíčové přednosti**:

- Nízké opotřebení;
- Vysoká životnost (někteří výrobci udávají až desetitisíce hodin);
- Nepřítomnost pohyblivých částí a z toho vyplývající tichý chod;
- Schopnost snášet i značná přetížení (krátkodobě až stovky procent).

Na druhou stranu i palivové články nejsou prosté určitých provozních nevýhod, nebo vedlejších efektů, a to zejména vzhledem k často kontinuálnímu provozu:

- Nutnost neustále odstraňovat zplodiny chemických reakcí, jejichž množství závisí na velikosti odebíraného proudu (u článků H_2-O_2 jde o odčerpávání vody či vodní páry, u jiných článků – produktů oxidace paliva);
- Udržování optimální teploty a tlaku aktivních médií (např. u alkalických článků nesmí pracovní teplota přesáhnout $110\text{ }^\circ\text{C}$, čehož se docílí cirkulací elektrolytu přes výměník tepla s chladičem);
- Uvedení do provozu (může trvat několik minut a článek se na provozní teplotu ohřívá buď proudem, který sám za studena dodává, nebo teplem z vnějšího zdroje).

Energetická bilance palivových článku je přibližně následující: 40–45 % energie se přemění na elektřinu, 35–40 % na neužitečné teplo a 20 % na pohon systému.

Z uvedeného je zřejmé, že řádný provoz palivových článků se prodražuje díky vynucené přítomnosti různých pomocných zařízení vybavených automatickou regulací. Za dílčí nevýhody lze pokládat i skutečnost, že výkon odebíraný z 1 cm^2 elektrod je doposud dosti nízký (běžně desítky W, nejvýše asi 2 W) a nutnost přítomnosti drahých katalyzátorů u nízkoteplotních článků. Navíc technologie výroby samotných článků je vesměs náročnější a složitější, a tedy i dražší, než u klasických baterií. Proto palivové články obvykle bývají jen jednou z částí energetického systému. Ten ještě obvykle obsahuje jednotku na zpracování

paliva, měnič nebo energetický kondicionér, a případně další jednotku, která je schopna zužítkovat vyprodukované teplo.

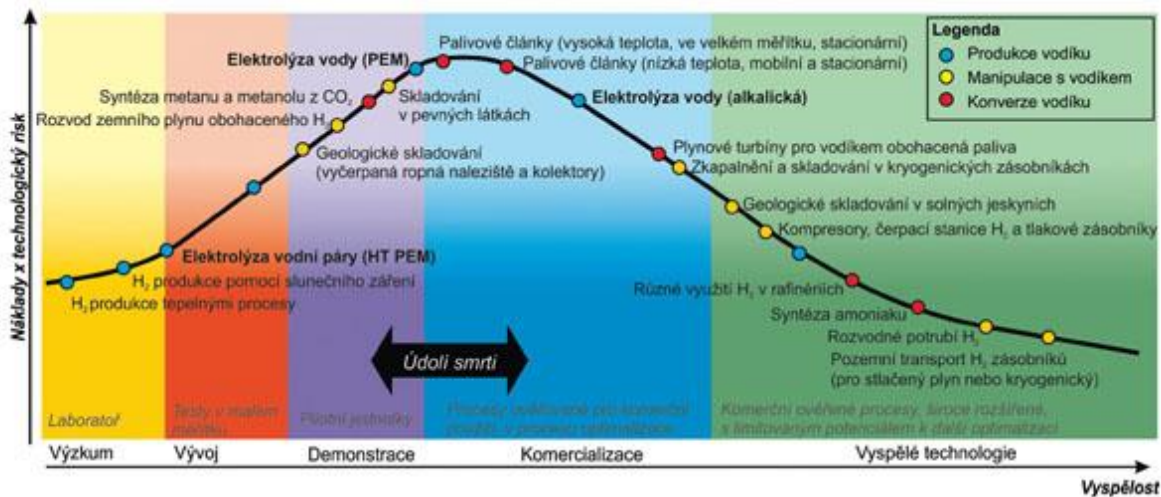
Technologie palivových článků jsou použitelné nejen jako náhrada klasických akumulátorů nebo elektrických baterií, ale také i v dopravě, ale hlavně v **systémech kombinované výroby elektrické energie a tepla**.

Konsorcium izraelských, španělských, portugalských a německých firem a výzkumných institucí (včetně např. Fraunhofer Institutu z Německa), jenž vede česká společnost ECO trend s.r.o. pracuje na projektu **mikrobiálního palivového článku** MFC4Sludge (plným názvem Microbial fuel cell technologies for combined wastewater sludge treatment and energy production). Záměrem projektu bylo získání prototypu malého zařízení na výrobu elektřiny z odpadních vod, resp. čistírenského kalu, a to na bázi mikrobiálních palivových článků doplněných hydrolyticko-acidogenní anaerobní digescí (HA-AD). V tomto článku jsou pro přímou výrobu elektrické energie použity anaerobní bakterie. V principu jde o jednoduché zařízení skládající se ze dvou elektrod a roztoku, v němž jsou umístěny anaerobní bakterie, tj. bakterie žijící v prostředí bez kyslíku. Oblast katody je od anody oddělena polopropustnou membránou – zatímco na katodě dochází k okysličování, v okolí anody musí mít bakterie přísně bezkyslíkaté prostředí. Když mikroorganismům předložíme cukry nebo některé jiné organické materiály, začnou je zpracovávat prostřednictvím metabolických procesů, přičemž uvolňují elektrony. Ty putují k anodě a po propojení elektrického obvodu skrz něj ke katodě – tak vzniká elektrický proud. Zdrojem kladných nábojů jsou vodíkové kationty z vodního roztoku, dalším produktem procesu je voda. Vědci už ale vyzkoušeli i upravený mikrobiální palivový článek, který vyrábí přímo vodík. Jako potravu se dá využít širokou škálu látek od komunálního odpadu až po odpady rostlinné výroby, především, zpracování kukuřice. Jelikož bakterie jsou schopné zpracovat organický substrát prakticky beze zbytku, účinnost takových článků se blíží 100 %. Poněkud horší je to s výkonem, který je velice nízký – z jednoho čtverečního metru aktivního povrchu článku lze získat přibližně jeden watt při napětí půl voltu. Pro zvýšení výkonu je proto třeba zvětšit plochu, pro zvýšení napětí řadit mikrobiální palivové články do série. Ve skutečnosti není nízký výkon takový problém a lze jej vyřešit při úpravách principu pro praktické využití. Kolonie bakterií mohou například růst na materiálech s velkým vnitřním povrchem, takže rozměry článku budou poměrně malé (MFC4Sludge, 2015).

Příklady fungujících vodíkových projektů.

Celá řada vodíkových technologií jsou již v současné době prakticky v provozu. Většinou se jedná o více či méně „tradiční“ technologická řešení – vodík je získáván z fosilních surovin nebo elektrolýzou, přepravován jako stlačený plyn potrubím nebo v lahvích a dále spalován. Celkový přehled stavu vodíkových technologií přináší následující obrázek (Obrázek 3):

Obrázek 3: Komerční vyzrállost hlavních vodíkových technologií



Zdroj: B. Decourt, B. Lajoie, R. Debarre a O. Soupa, Hydrogen-Based Energy Conversion Factbook , únor 2014, SBC Energy Institute

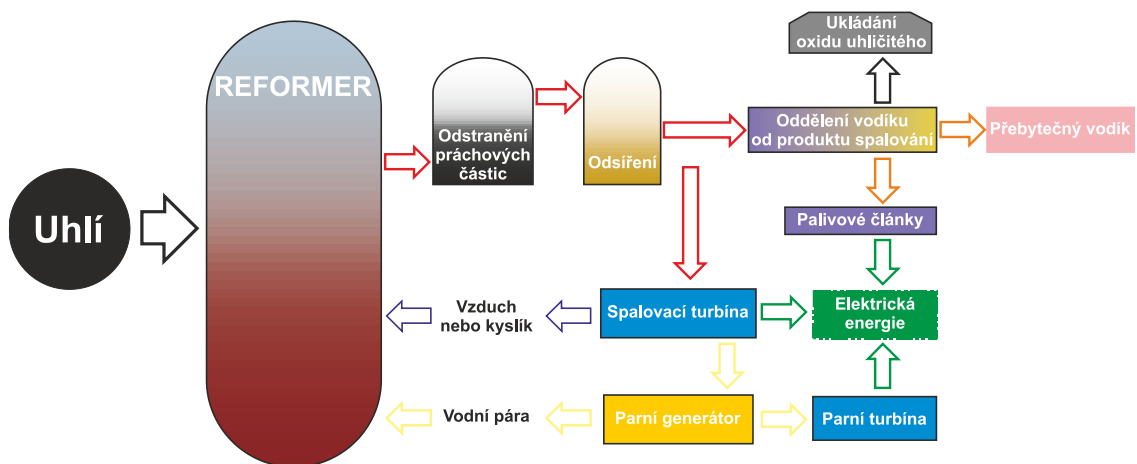
Jak je z ní patrné, máme mnoho vyspělých technologických řešení ale komplexní systémy konverzi mezi elektřinou, vodíkem a lehkými palivy jsou stále v „údolí smrti“.

Praktickou realizaci současných vodíkových technologií se dá ilustrovat následujícími příklady. Zvolili jsme skutečně fungující komplexy a to jeden velký, jeden střední a jeden menší.

Huaneng GreenGen IGCC Project

Je to tepelná elektrárna nové generaci s ambicí vyrábět elektřinu a teplo z fosilních paliv se zachycením a následným ukládáním vyprodukovaných emisí. Systém fungování popisuje následující schéma:

Obrázek 4: Schéma uhelno vodíkové elektrárny GreenGen



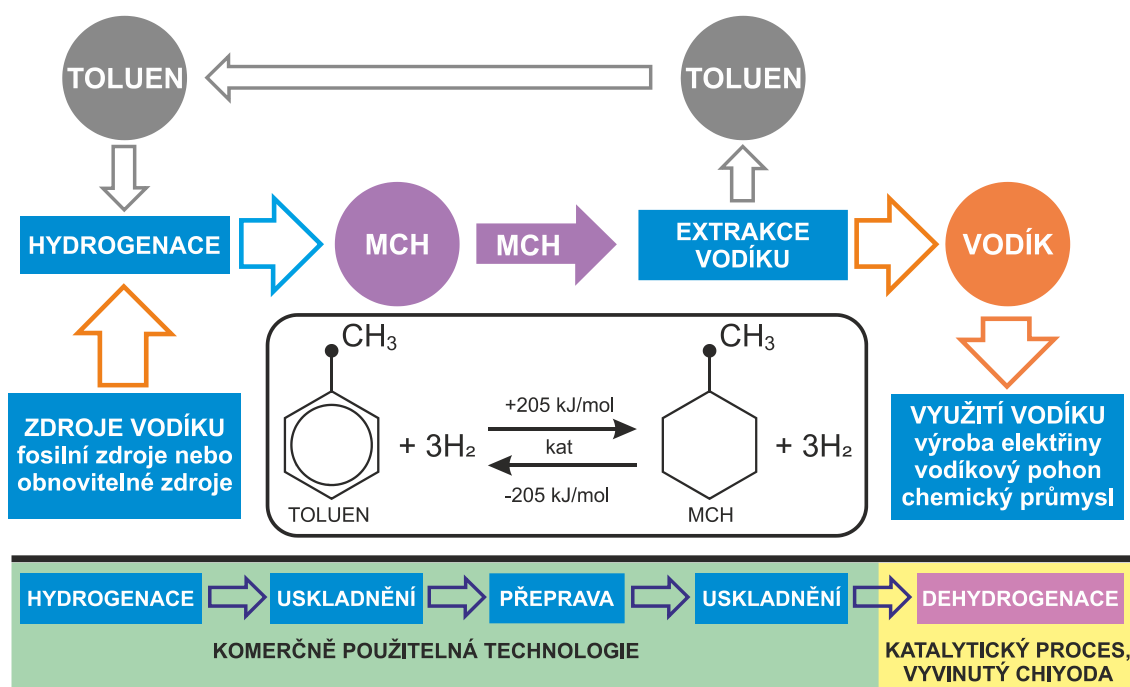
Vodík (ve směsi s jinými plyny) v této až 400 MW (ve finální fázi) elektrárně ve městě Tianjin v Číně vyráběn parním reformingem uhlí a následně spalován v turbínách. Vznikající oxid uhličitý a další vedlejší produkty jsou zachycovány a ukládány do podzemních uložišť.

V současnosti elektrárna funguje ve druhé fázi s výkonem 250 MW. Celkově elektrárna má fungovat v plném provozu do roku 2020. Výstavba podobné elektrárny FutureGen v americkém Illinois byla rozhodnutím americké administrativy zastavena začátkem roku 2015 kvůli nedostatku financí (Daniels, 2015).

SPERA Hydrogen System

Jedná se o společné technologické řešení japonské technologické firmy CHIYODA Corporation a Indického národního výzkumného ústavu pro environmentální technologie (NEERI). Dle jimi navrženého technologického systému SPERA Hydrogen System je vodík přepravován a skladován ve vázané formě tekutých organických hydridů (LOH) zejména, methylcyclohexanu, který vzniká hydrogenací toluenu. Takto vázaný vodík je možné bezpečně přepravovat a skladovat jako běžnou organickou látku.

Obrázek 5: Schéma vodíkového distribučního systému SPERA



V místě spotřeby je následně pomocí katalyzátoru, vyvinutému NEERI, z MCH je uvolňován plynný vodík. Účinnost celého systému SPERA je dle údajů NEERI kolem 98 %. V současnosti ve městě Yokohama v Japonsku je v provozu závod na výrobu a svazování vodíku s kapacitou 50 Nm³/h ("SPERA Hydrogen" System for Large Scale H₂ Storage & Transportation and H₂ Supply Chain Concept Concep, 2014). Systém je škálovatelný pro různé implementace včetně globálních systému transportování energie. Nespornou výhodou systému SPERA je možnost využití stávající transportní infrastruktury a to jak potrubní tak i pro přepravu tankery nebo cisterny.

Vodíkový kotel H₂ydroGEM® GIACOMINI

Obrázek 6: Instalace hybridního vodíkového zařízení GIACOMINI



Zdroj: (The "hydrogen" project, 2016)

Společnost GIACOMINI (The "hydrogen" project, 2016) vyvinula revoluční řešení – zcela ekologický zdroj tepla na bázi spalování vodíku – vodíkový kotel H₂ydroGEM®. Společně se systémy solárního vytápění a distribucí geotermální energie tak může společnost GIACOMINI zařídit kompletní systém vytápění, který nezatěžuje životní prostředí. Kotel H₂ydroGEM® byl vyvinut v Itálii společností GIACOMINI pod vedením významných institucí, jako jsou PSI v Curychu či Polytechnické univerzity v Miláně a Ženevě. Pro provoz využívá katalytické reakce mezi vodíkem a kyslíkem. Vodík je možné vyrábět buď přímo pomocí elektrolyzéry vody, nebo je možné použít dodávaného vodíku z jiného zdroje. energii produkuje sada palivových článků. Dle potřeby energie může kotel fungovat na 1, 2, 3 až 6 válcových komor (článků). H₂ydroGEM® je modulární: komory mohou pracovat nezávisle na sobě. Každá komora má výkon cca. 6 kW. Systém H₂ydroGEM® Box je komerčně dostupný na trhu za cenu € 47 000,- .

Unipertol plánuje výstavbu první v Česku vodíkové pumpy

Tato zpráva se objevila v médiích 11. února 2016 (V Česku se brzy objeví vodíkové technologie pro energetiku, 2016).

Obrázek 7: Vnitřek vodíkové čerpací stanice



Zdroj: (V Česku se brzy objeví vodíkové technologie pro energetiku, 2016)

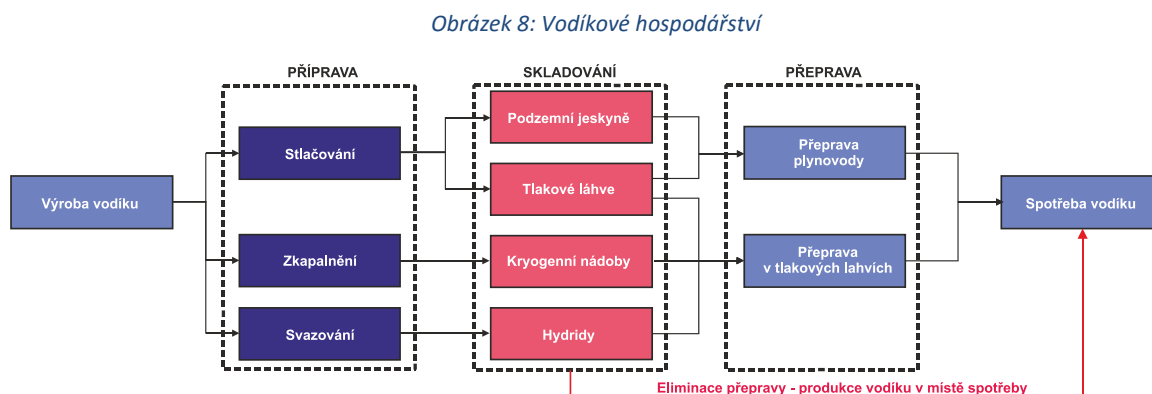
Podle jednoho z manažerů má už firma projekt na využití vodíku připraven. První pumpa se má stavět v Litvínově, vodík se k ní nebude vozit cisternou, ale půjde potrubím přímo z Chemopetrolu. Tiskový mluvčí Unipetrolu nemohl vyloučit, že v roce 2018 několik vodíkových pump nebudeme mít. Unipetrol také jedná s Ústavem jaderného výzkumu (ÚJV) Řež o půjčení vodíkového autobusu s palivovými články (tzv. Trihybusu), který ústav několik let testuje v okolí Neratovic. Autobus má jezdit mezi Litvínovem, Mostem a Chomutovem. Unipetrol chce jednat s městy a místními dopravci o rozšíření projektu, aby nezůstalo jen u jednoho autobusu.

Jak je patrné z předchozího přehledu, vodíková energetika z technologického pohledu již není v začátcích, naopak je dostatečně technologicky vyspělá a komerčně použitelná. Rozšíření vodíkové energetiky nepochybně záleží nejen na stavu jednotlivých vodíkových technologií a procesech, ale i na celkové energetické bilanci neboli mixu ve světě. Není pochyb, že vývoj a komercializace vodíkové energetiky je vázaný především na stav energetiky a ekonomiky fosilních surovin. Pokles cen ropy a zemního plynu, jenž jen v roce 2015 srazil ceny ropy celosvětově na hodnoty kolem 30 USD za barel, nepochybně zpomalí rozšíření a zlevnění vodíkových technologií. Nicméně, environmentální aspekty – pokračující globální oteplování a celkové znečištění planety vytváří nové příležitosti a perspektivu pro vodíkovou energetiku. Je to hlavně vidět v Německu a dalších zemích Severní Evropy, jež v posledních letech výrazně omezují klasickou fosilní energetiku ve prospěch energetiky obnovitelných zdrojů (Energy Transition, 2015), což vytváří novou příležitost pro rozvoj vodíkové energetiky v Evropě.

Ekonomické zhodnocení.

Vodíková energetika – ekonomický pohled.

Vodíková energetika se z logistického pohledu skládá ze tří fází: produkce, transport a použití (Obrázek 8). Každá z těchto fází, přesněji, její ekonomika ovlivňuje celkový ekonomický výsledek.



Protože se vodík vyrábí, skladuje se a přepravuje se různými způsoby, jsou náklady na tyto procesy odlišné. Pro kvalifikované srovnávání ekonomických ukazatelů vodíkové energetiky byla zavedena syntetická veličina LCOH (Levelized Cost Of Hydrogen) analogická konceptu LCOE v elektroenergetice. Jedná se o takovou cenu vodíku, která by zajistila pokrytí veškerých provozních nákladů, zaplacení investičních úvěrů a úroků z nich plus přiměřený zisk (10 % dle metodiky USA DOE) (Ruth, 2011). Tato **nivelizovaná cena vodíku** se skládá z nákladů na kapacitu na jednotku výroby, časově zprůměrovaných fixních provozních nákladů na jednotku výstupu a průměrných časových variabilních nákladů na jednotku výkonu (Reichelstein, 2013).

$$\text{LCOH } (\$/\text{kg}_h) = C_h + j_h + W_h$$

Podrobná analýza ekonomických ukazatelů je velice komplikována vzhledem k velkému množství parametrů, ovlivňujících výslednou ekonomickou bilanci. Jsou to náklady investiční, provozní, pohyby cen na suroviny a energii, cena práce, náklady na likvidaci odpadu, emise atd. Všechny tyto ukazatele se navíc neustále mění v čase. Liší se také geograficky (Ramsden, 2009).

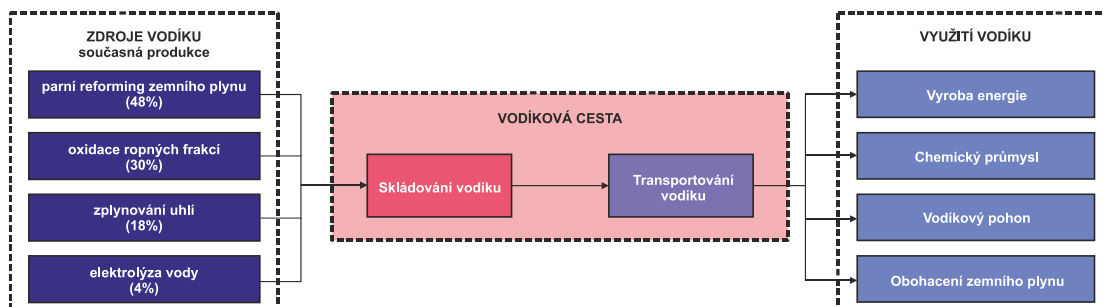
Ve světě najdeme různé kombinace technologických řešení, zpravidla ovlivněné místními podmínkami, jejichž LCOH jsou velmi různé. Tady je stručný přehled ekonomických ukazatelů vodíkové energetiky.

Produkce

Vodík může být vyráběn mnoha způsoby z širokého spektra vstupních zdrojů. Roční světová produkce vodíku je přibližně 55 milionů tun. V globálním měřítku dominuje v současné době výroba z fosilních paliv. Až 48 % vodíku je vyráběno ze zemního plynu, následuje ropa (30 %)

a uhlí (18 %). Elektrolyticky je vyráběno cca 4 % vodíku (Obrázek 9). Vzhledem k variabilitě způsobů produkce pro porovnání ekonomických výsledků se používá ukazatel Levelized Cost of Hydrogen (LCOH).

Obrázek 9: Zastoupení různých způsobů výroby vodíku ve světovém měřítku



Dle studie The Freedonia Group (World Hydrogen, 2010) se v letech 2013 až 2018 očekává nárůst celosvětové poptávky po vodíku o 3,4 % ročně. Tato poptávka zahrnuje v sobě jak požadavky energetického, tak i chemického průmyslu. Dle regionů se očekává 33% nárůst poptávky v Asijsko-Tichomořském regionu, 28% nárůst v Severní Americe a 16% – v Západní Evropě.

Z pohledu organizace výroby jsou možná dvě řešení: centralizovaná a decentralizovaná výroba. Každé z těchto řešení má své výhody a také nedostatky. Současná centralizovaná výroba zpravidla je efektivnější a levnější z důvodu kapacitních a energetických. Avšak následující nutnost nákladné přepravy výsledný produkt pro odběratele výrazně prodražuje.

Nejlevněji v současnosti je vodík vyráběn ze zemního plynu (~2,26 USD/kg) (Annual Energy Outlook 2009, 2009), na druhém místě je zplynování uhlí. Avšak obě této technologii vedou ke značné produkce skleníkových plynů a z dlouhodobého pohledu se nejeví jako perspektivní. Naproti tomu, elektrolytická výroba je v současnosti několikanásobně dražší (4–30 USD/kg podle ceny elektřiny), tj. komerčně více méně nerentabilní, avšak produkuje velmi čistý vodík a nemá žádné škodlivé emise. Vhodná kombinace elektrolytické výroby s obnovitelnými zdroji energie se zatím jeví jako nejperspektivnější do budoucna. Pokud avšak nedojde k průlomu v biotechnologiích výroby. Momentálně ceny (LCOH) vodíku, vyráběného z bioethanolu jsou na úrovni 6 USD/kg s perspektivou dosáhnout ceny kolem 2 USD/kg kolem roku 2020. Podmínkou je navýšení a zlevnění výroby bioethanolu. Výhodnější zatím je výroba z biomasy, kde cena LCOH se pohybuje na úrovni 2,20 USD/kg avšak tato výroba nemá příliš prostoru pro snížení ceny a zároveň relativně silně zatěžuje životní prostředí (FUEL CELL TECHNOLOGIES OFFICE MULTI-YEAR RESEARCH, DEVELOPMENT, AND DEMONSTRATION PLAN, 2015).

Účinnost výroby vodíku se velmi liší podle způsobu jeho výroby. Při výrobě vodíku parním reformingem se dosahuje účinnosti přibližně 80 %, zemní plyn je těžen a distribuován přibližně s účinností 90 %. Celková účinnost výroby vodíku parním reformingem se tedy pohybuje kolem hodnoty 72 %. Při výrobě vodíku elektrolýzou vody je do celkové účinnosti procesu nutné započítat celý cyklus těžby, zpracování a dopravy primární energetické suroviny, přeměny

energie v palivu na elektrickou energii a samotnou elektrolýzu. Účinnost výroby elektrické energie včetně započtení energie na získávání paliva se pohybuje v rozmezí 30–35 % pro běžné stávající zdroje elektrické energie. Elektrolýza vody je potom uskutečňována s účinností přibližně 85 %. Celková účinnost potom variuje v rozmezí 25–30 % (Dlouhý, 2007).

Nejasná zůstává perspektiva výroby vodíku v jaderných reaktorech IV generaci. Podle Pavla Hejzlara, ředitele vývojového programu pro pokročilé reaktory v Massachusetts Institute of Technology, s komerčním využíváním těchto nejmodernějších reaktorů se počítá kolem roku 2030 (První reaktory IV. generace by se měly objevit do 10 let, 2007). Očekává se, že velmi vysokoteplotní reaktory (VHTR) budou moci účinně vyrábět vodík termochemickou cestou. Díky vysoké teplotě se s nimi počítá především na výrobu vodíku, popř. s produkcí elektřiny v režimu kogenerace. Účinnost je cílená na 50 %, standardní reaktor tohoto typu by měl denně vyrobit 200 tun vodíku, což znamená ročně nahradit tři milióny barelů ropy. Momentálně jde o experimentální výstavbu jednoho reaktoru nedaleko pobřežního města Weihai v Číně s očekávaným uvedením do provozu v roce 2017 (LI, 2014). Další je v plánu společnosti AREVA s možným dokončením až po roce 2020. Jak je uváděno v informačních materiálech spol. AREVA (AREVA HTGR High Temperature Gas-cooled Reactor, 2014): *„Je nutná těsná kooperace Státní správy, Kongresu USA a soukromého sektoru pro efektivní sdílení primárních rizik komercializace HTGR projektu. Sdílení rizik musí zahrnovat státní garance pro úspěšné vybudování a uvedení do provozu tohoto unikátního zařízení, jež umožní snížení závislosti USA na dovážených energetických surovinách a redukci emisí oxidu uhličitého.“* Jinými slovy: bez státní podpory a garancí komerční realizace tohoto projektu je nepředstavitelná.

Přeprava a skladování

Přeprava a skladování vodíku je spojnicí mezi výrobou a využitím. Jde o technologicky vyspělé odvětví vycházející ze zkušeností chemického a petrochemického průmyslu. Vodík se převážně ukládá ve stlačené nebo zkapalněné fázi, jak již bylo zmíněno. Hlavní „problém“ skladování a přepravy vodíku je ekonomická efektivita těchto procesů, zejména v případě nestálé produkce pomocí obnovitelných zdrojů energie (Decourt, 2014). Vzhledem ke své povaze je vodík velmi náročná na zacházení látka. Nejběžnější je skladování v tlakových lahvích, ale do budoucna se jeví jako vhodnější ukládání ve vázané formě z důvodů nižších ztrát a větší bezpečnosti hlavně při menších kapacitách.

Přeprava vodíku je v současnosti realizována zejména dvěma způsoby: potrubím a přepravou stlačeného nebo zkapalněného vodíku v tlakových nádobách. Ekonomika nakládání s vodíkem je stejně komplexní otázka, jako ekonomika jeho výroby, neboť je také ovlivněna velkým množstvím faktorů – investiční náklady na vybudování infrastruktury, ceny nemovitosti – pozemků a náklady na práci, environmentální a daňová legislativa, technologické ztráty při skladování, přečerpávání a přepravě atd. (Dodds, 2012). Pro komplexní posouzení ekonomické efektivity přepravy a skladování jsou používány obdobné LCOH indexy – Levelized Cost Of Storage (LCOS) a Levelized Cost Of Hydrogen Transported.

Dle zdrojů SBC Energy Institute a US DoE se v současné době nivelizována cena skladování vodíku (LCOS) a technologické ztráty pohybují těchto rozmezích (viz Tabulka 2):

Tabulka 2: Nivelizovaná cena (LCOS) skladování vodíku

Technologie	Stlačený v tlakových lahvích	Stlačený v podzemních solních jeskyních	Zkapalněný v lahvích	Svázaný ve formě metalických hydridů
Cena LCOS, USD/MWh	4–17	3–4	25–40	10–100
Ztráty, %	9–15	5–10	25–45	5–20

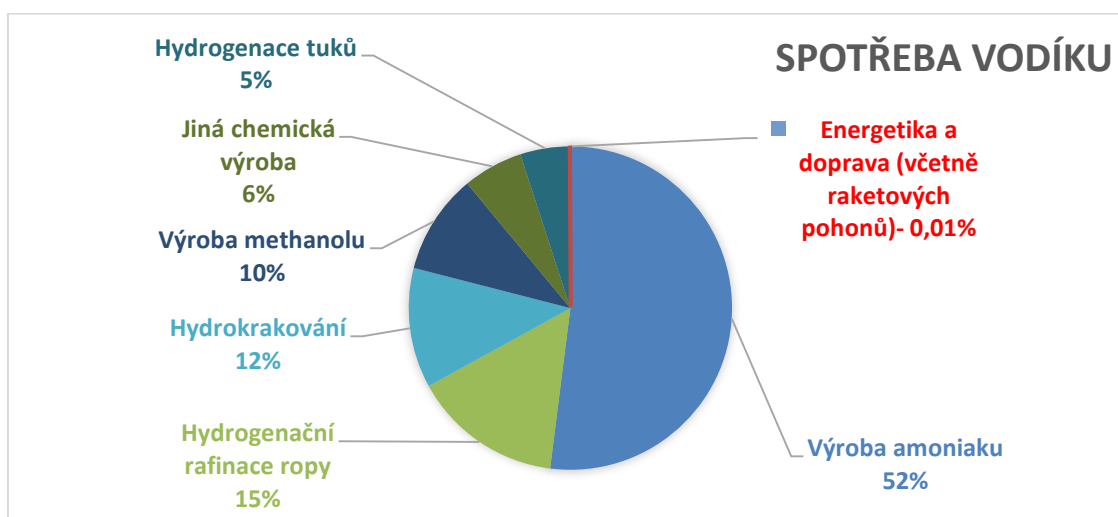
Zdroj: UCL Energy Institute, University College London

Je patrné, že efektivita nakládání s vodíkem je silně závislá na rychlosti jeho „obratu“, neboť největší náklady jsou spojené s přípravou (stlačování, zkapalnění) a uchováváním vodíku. Protože přeprava vodíku je v současnosti v podstatě přesun uskladněného vodíku na potřebnou vzdálenost je pochopitelné, že efektivita přepravy roste s množstvím přepravené látky a klesá se vzdáleností.

Využití

Naprostá většina vyprodukovaného v současnosti vodíku je použita v chemickém průmyslu a to především ve výrobě hnojiv, petrochemii, potravinářství, metalurgii. Využití vodíku pro energetické účely včetně raketových paliv je cca 0,01 % (Obrázek 10).

Obrázek 10: Struktura světové spotřeby vodíku.



Vodíku v dopravě byl již dávno využíván, ale ne jako energetická surovina, ale jako vznášející plyn. Již začátkem XX. století byl vodík běžně využíván jako plnicí plyn pro vzducholodě. Slibně se rozvíjející letecká přeprava byla náhle ukončena sérií tragických havárií – nejznámější byla katastrofa vzducholodě Hindenburg 6. května 1937, při které zahynulo 36 osob.

Jako energetická surovina lze vodík v současnosti prakticky využít dvěma způsoby: přímým spalováním v motorech, případně turbínách, nebo katalytickou oxidací v palivových článcích. V případě **přímého spalování** je nutné vzít v potaz (z ekonomického pohledu) některé termochemické vlastnosti vodíku, především, jeho nízkou energetickou hustotu při normálních podmínkách. Jeden kg vodíku sice má nejvyšší energetickou (39,72 kWh) hustotu ve srovnání s ostatními energetickými surovinami, avšak za normálních okolností jeho objemová energetická hustota je 3,31 kWh/m³. Pro srovnání objemová energetická hustota benzínu je kolem 9 800 kWh/m³.

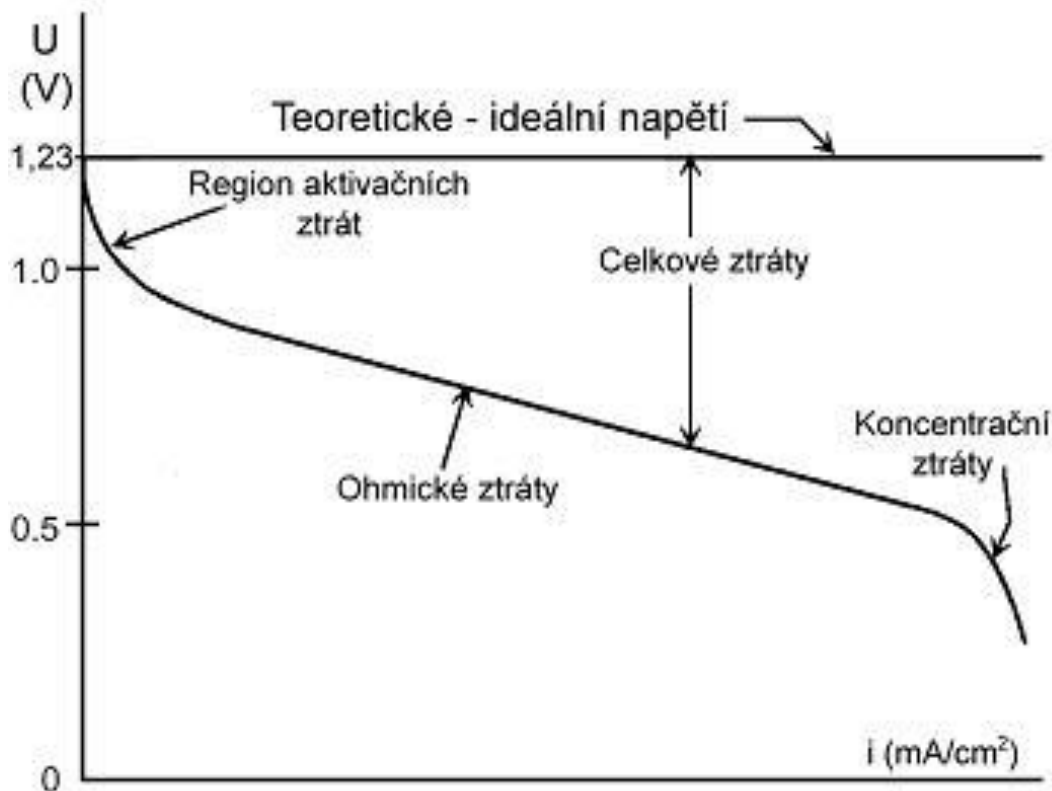
Jelikož v současnosti nejsou více méně žádné komerčně provozované energetická řešení na bázi vodíkových technologií, nelze hodnotit jejich ekonomické parametry. Chybí zejména pořizovací a provozní ceny, ověřené výpočty technologické účinnosti, délku životnosti vodíkových zařízení atd. Jako jediné použitelné kritérium se je **účinnost dostupných** technologií získávání energie z vodíku.

Upravené **spalovací motory** se již delší dobu pro spalování vodíku pokusně používají. Avšak jejich zkušební provoz prokázal, že používání vodíku pro pohon v automobilech je velmi neefektivní z několika důvodů: zaprvé, i když vodíkové spalovací motory vykazují vyšší efektivitu, než motory na tradičních pohonných hmotách, jsou o polovinu méně účinné než palivové články a zároveň vyžadují dvakrát větší nádrž pro srovnatelný dojezd. Zadruhé, a hlavně, výkon a točivý moment spalovacího motoru, poháněného vodíkem je přibližně o 30 až 40 % nižší, než u motoru na benzín, jak ukázaly testy modelu BMW Hydrogen 7. Zkušební provoz aut na vodíkový pohon ukázal i řadu dalších problémů, ať už z pohledu konstrukční adaptace spalovacího motoru, bezpečnosti, konstrukce nádrže a v neposlední řadě také docela značné emise oxidů dusíku (Simanaitis, 2012).

Pro velké vysokokapacitní instalace jsou velice efektivní **plynové turbíny**. Jde o velmi vespělou technologii s vysokou efektivitou pro výrobu elektrické a tepelné energii široce používanou v plynových elektrárnách. Tyto turbíny mohou být relativně snadno a s nevysokými náklady adaptované pro spalování směsi plynu s vodíkem nebo i čistého vodíku. Jejich účinnost může přesahovat 60 % při dlouhodobém nepřetržitém provozu.

Účinnost **palivového článku** je závislá na proudovém zatížení elektrod. Oproti spalovacím motorům má palivový článek v kombinaci s elektrickým motorem nejvyšší účinnost při nízkém zatížení (při velmi malých zatíženích se může projevit nízká účinnost měničů, případně el. motoru). S rostoucím proudovým zatížením klesá účinnost palivového článku přibližně dle závislosti zobrazené na obrázku 11. Při velmi vysokých zatíženích se účinnost dále snižuje v závislosti na technickém řešení (např. o spotřebu vzduchového kompresoru).

Obrázek 11: Účinnost palivového článku



Teoretické – ideální napětí palivového článku je 1,23 V, což odpovídá ideální účinnosti 83 %.

I když vodíkové technologie a palivové články nabízejí celou řadu vhodných aplikací, tak je možné alespoň prozatím tvrdit, že výroba elektřiny v palivových člancích představuje lepší variantu z hlediska účinnosti než spalování vodíku v motorech, kdy účinnost dosahuje úrovně okolo 60 % (Tabulka 3).

Tabulka 3: Účinnost různých technologií palivových článků

Typ článku	Elektrická účinnost	Celková účinnost
PEM/PEFC	30 – 36 %	90 – 95 %
DMFC	25 – 30 %	cca 90 %
AFC	25 – 30 %	60 – 80 %
PAFC	35 – 42 %	85 %
MCFC	45 – 50 %	cca 60 %
SOFC	50 – 55 %	50 – 60 %

Zdroj: www.cez.cz

Termojaderná fúze je z pohledu energetické účinnosti nejefektivnějším způsobem produkce vodíkové energie. Nehledě na velmi lákavé energetické propočty – k vyrobení 1 GW výkonu je zapotřebí cca 100 kg deuteria a zhruba 150 kg tritia – technologické bariéry znemožňují použití tohoto způsobu výroby energie a žádné řešení zatím není ani na obzoru. Výzkum termojaderné fúze sice pokročil, avšak jaderná fúze je stále velmi neprobádaná oblast. Výstavba

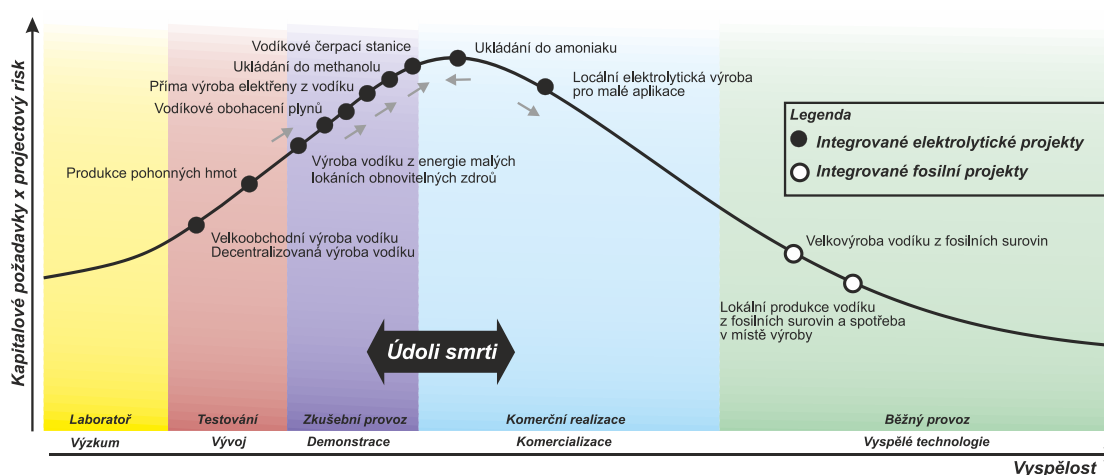
a provoz jaderných zdrojů je a bude extrémně nákladnou záležitostí. Pokud nebudou existovat silné ekonomické a technologické argumenty v jejich prospěch v porovnání s jinými zdroji, tak je jejich budoucnost ohrožená.

Vodíková energetika – výzvy a perspektivy.

Pokud jde o blízkou perspektivu vodík je považován **spíše za nosič, nikoli primární zdroj energie**. Jako nosič vodík má nepochybné přednosti ve srovnání s ostatními alternativami, a to zejména:

- Vysoká energetická hustota
- Možnost uskladnění pro pozdější použití nebo přepravu
- Výroba energie z vodíku není zatížena škodlivými emisemi.

Obrázek 12: Komerční vyspělost integrovaných vodíkových řešení.



Zdroj: B. Decourt, B. Lajoie, R. Debarre a O. Soupa, Hydrogen-Based Energy Conversion Factbook , únor 2014, SBC Energy Institute

Avšak reálný masivní nástup vodíkové energetiky není zatím na pořadu dne, nehledě na optimistické prognózy a dílčí úspěchy pokusných projektů v různých částech světa. Některé problémy stále nejsou překonány a další zatím ani nemají schůdné řešení. Komerční vyspělost jednotlivých vodíkových technologií je znázorněná na obrázku 12. Například, pokud bychom chtěli nahradit veškeré fosilní paliva v celém světě vodíkem, vyrobeném elektrolyticky, tzn., zcela převést veškerou dopravu na vodíkový pohon, potřebovali bychom třikrát navýšit světovou výrobu elektrické energie (viz tabulka 4).

Tabulka 4: Dostupné zdroje pro přechod na vodíkový pohon ve světě

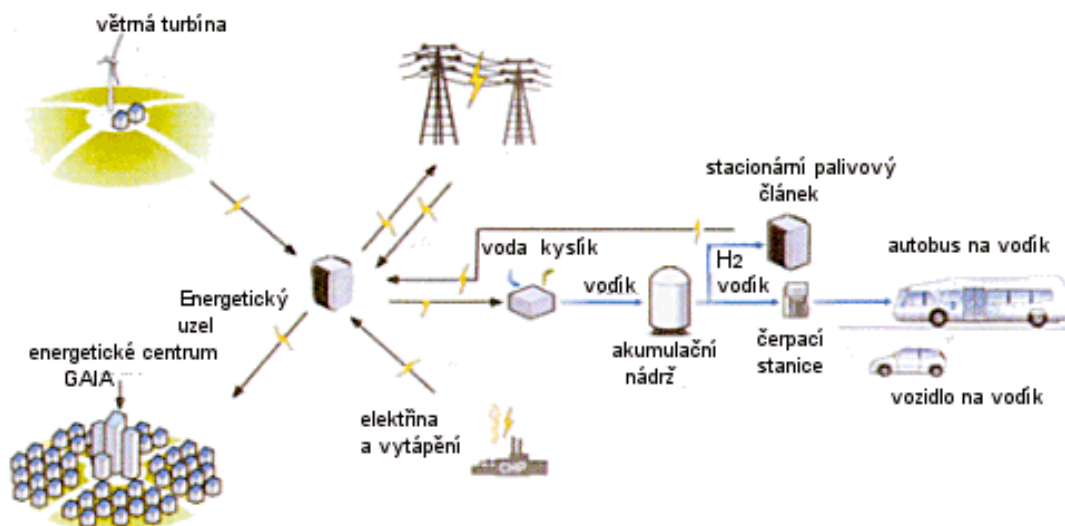
Celosvětová spotřeba pohonných hmot, mil. tun	2 200
Vodíkový ekvivalent, mil. tun	679
Množství elektřiny, nutné pro výrobu vodíku, mld. KW/h	29 700
Celková současná světová kapacita elektráren, mld. KW/h	15 500

Zdroj: V.Z. Mordkovič

Takový nárůst kapacity elektráren není v dohledné budoucnosti realizovatelný pomocí dostupných technologických řešení. Takže, pokud bychom skutečně chtěli nahradit fosilní paliva alespoň v dopravě vodíkem, budeme muset ho vyrábět také z fosilních zdrojů, což v podstatě znehodnocuje veškeré přínosy vodíku, jako čistého paliva (očekávané emise CO₂ při této výrobě mohou překročit emise při přímém použití fosilních pohonných hmot v dopravě) a navíc energetická bilance takové konverze dle různých zdrojů osciluje v současnosti v nejlepším případě kolem meze rentability (Mordkovič, 2006).

Nicméně nárůst, zejména v Západní Evropě, alternativních zdrojů elektrické energie a jejich povaha volají po nějakém způsobu ukládání vyrobené přebytečné elektrické energie a pro tyto účely zatím není nalezeno žádné uspokojivé řešení.

Obrázek 13: Koncept energetických uzlů, který propojuje nezávislé obnovitelné zdroje energie s ostatními formami energie a vodíkové hospodářství.



Zdroj: (Obnovitelný vodík, 2004)

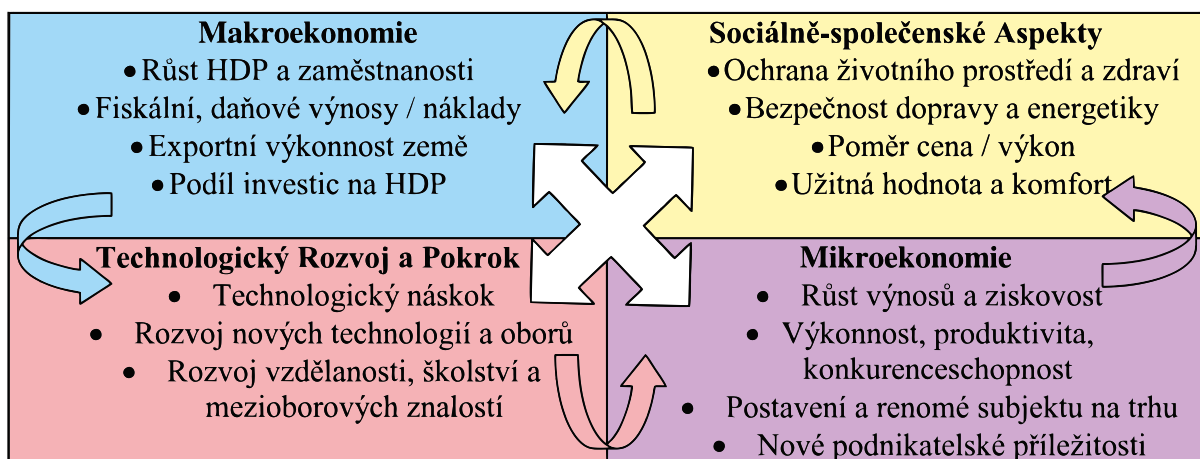
Vodík je tady stále ve hře. Již v roce 2011 došlo v Německu k uvedení do provozu první „hybridní elektrárny“ kombinující větrnou elektrárnu s výrobnou vodíku a následnou zpětnou produkcí elektřiny z tohoto zdroje (HYBRID POWER PLANT, 2011). Toto je příklad kombinovaných řešení, jež, dle předpokladu, mají vyřešit otázku regulace výkonu větrných a solárních elektráren (obrázek 13).

Podle některých analýz a názorů budou v r. 2050 významnou úlohu hrát vodíkové pohony založené na technologii palivových článků. Tento názor má oporu v některých významných argumentech, mezi které patří i skutečnost, že vodík představuje efektivní způsob uchování elektrické energie. Instalace stanic produkujících vodík z přebytečné energie by pak mohla být řešením nadbytku produkce elektrické energie z některých zdrojů, které svoji kapacitou a výkonem převyšují aktuální poptávku. Navzdory skutečnosti, že systémy výroby vodíku z přebytků vyrobené elektrické energie jsou ve svých počátečních stádiích, tak lze předpokládat, že v případě jejich realizace by mohly nabízet řešení nejpálčivějších

problémů vodíkové energetiky jako je transport a skladování. Některé modely vodíkové energetiky počítají s jednotkami s příkonem v řádu stovek MW a integrací do infrastruktury vodíkové dopravy. Takto nastíněný vývoj by ve svém důsledku mohl znamenat rozvoj výroby vodíku, ale zároveň potřebu dobudování síťové infrastruktury přepravy a skladování vodíku. Náklady na zavedení vodíkového hospodářství budou pochopitelně značné a patrně budou vyžadovat podporu, stimulování nebo aspoň garancí veřejných rozpočtů. Vodíkové hospodářství má zároveň i šanci splnit ambice ekologů a klimatologů na ekologicky přijatelný, když ne zcela čistý rozvoj klíčových sektorů hospodářství jako je energetika a doprava. Vlastním zpracováním vodíku v konečných aplikacích vzniká ekologicky nezávadná vodní pára, takže otevřenou otázkou z tohoto pohledu je jeho výroba. Příprava vodíku z fosilních paliv v rámci dostupných technologií je prakticky vždy zatížena vznikem CO₂, a tak se spíše jedná o to jaké palivo je k tomuto účelu vhodné. Elektrolýza vody je relativně energeticky náročná, a její účinnost se pohybuje na úrovni zhruba 50 %, což představuje přijatelnou ekonomickou alternativu, pouze za předpokladu přebytku energie a nutnosti její akumulace. Zařazení výroby vodíku a jeho spalování do energetického mixu budoucích energetik může reprezentovat vhodné doplnění zejména pro energetiky, které budou řešit ať už krátkodobé nebo dlouhodobé přebytky výroby elektrické energie (Köhler, 2010).

Předpokladem řešení se tak zřejmě stává proveditelný a všeobecně přijatelný model zavádění nových technologií, který by se měl vyznačovat hodnocením v následujících oblastech: makroekonomie, mikroekonomie, sociálně-společenské aspekty, technologický rozvoj a pokrok (Viz obrázek 14).

Obrázek 14: Ekonomické, technologické a sociální aspekty budoucnosti vodíkové energetiky.



Závěr

Vodík nebo?

V kontextu probíhajících proměn energetiky v Evropě (a kterým se nevyhnou ani ostatní ekonomiky světa), není vodík v současnosti vnímán jako palivo, nýbrž jako univerzální nosič energie. Vodík by tak mohl doplnit elektřinu, která dnes pokrývá velkou část zásobování energií. Elektřina vyrobená v elektrárnách protéká kabely široce rozvětvených rozvodných sítí k jednotlivým odběratelským místům a její vážnou nevýhodou je, že se musí bezprostředně po vyrobení spotřebovat. To znamená, že ji nelze uskladnit (s výjimkou rychle vyčerpateľných baterií spíše malého výkonu) a vyrobit tak do zásoby. Ale právě tak i vodík vyrobený ve vzdálených výrobních provozech je možné distribuovat potrubím nebo převážet v cisternách. Oproti elektřině, je možné vodík před transportem nebo po transportu uskladnit – a toto je jeho významná přednost, ze které pramení perspektiva pro vodíkovou energetiku, kde je vodík využíván jako akumulací a doplňkový prostředek pro elektřinu. Proto z hlediska celkové energetické potřeby společnosti by mohl vodík se svými schopnostmi stát trvalým spojencem elektřiny. Obzvláště u elektřiny, vyráběné v solárních, větrných a podobných elektrárnách, které nemohou zajistit stálý a nezávislý na vnějších podmínkách výkon se jeví možnost ukládání energie do vodíku, jako zatím jedná z nejperspektivnějších variant. Výzkumy, které v současnosti probíhají, jsou již zaměřeny na prototypy velkých stacionárních palivových článků pro aplikace v energetice. Ty by mohly jako plně decentralizované jednotky uspokojovat obrovskou poptávku průmyslu, zemědělství, sektoru služeb i domácností po elektřině, ale také po teple (kogenerací tepla a elektřiny) a mechanické energii. V těsné spolupráci se zainteresovanými průmyslovými podniky se využívání vodíku jeví v několika příštích desetiletích jako schůdné a udržitelné východisko ze slepé uličky, do které světový energetický systém přivedlo trvalé upřednostňování fosilních paliv bez ohledu na momentálně (a určitě dočasně) klesající ceny. I kdyby se ceny fosilních paliv udržely na nízké úrovni, vývoj v oblasti vodíkové energetiky by měl pokračovat, už jen s ohledem na její šetrnost k životnímu prostředí. Pro Západní země, především pro státy EU by to navíc znamenalo postupné, ale neustále snižování závislosti na dodávkách fosilních paliv a tím pádem i snižování energetické závislosti na nestabilních státech a režimech.

Na druhou stranu, praktické nasazení vodíkových technologií v současné energetice se zatím nejeví jako příliš reálné. Blokuje to celá řada technologických a ekonomických bariér, které jen tak nepůjde odstranit. Celkově se dá z prodělané práce dojít k závěru, že ***budoucnost vodíkové energetiky se v současné době jeví jako značně nejistá***. Je možné, že na svět přijde jiná převratná technologie, která vyhlídky vodíkové energetiky zcela pohrbí. Nebo je také možné, že problémy, spojené s využitím vodíku, jako zdroje energie, nebudou v dohledné době

překonány, nehledě na všeobecný optimizmus, a tak lidstvo bude muset najít jinou alternativu. Pravděpodobnější cesta asi bude kombinovat dostupné technologie a řešení s neustálým hledáním lepších a efektivnějších alternativ, jak se to ostatně děje již celou dobu naší civilizace.

Bibliografie

"SPERA Hydrogen" System for Large Scale H₂ Storage & Transportation and H₂ Supply Chain Concept Concep: IEA H₂ Roadmap Asia Workshop. 2014. Chiyoda Corporation. Dostupné také z:

https://www.iea.org/media/workshops/2014/asiahydrogenworkshop/1.13_IEAAsiaWorkshop20140626Chiyoda.pdf

A NATIONAL VISION OF AMERICA'S TRANSITION TO A HYDROGEN ECONOMY — TO 2030 AND BEYOND: Based on the results of the National Hydrogen Vision Meeting. 2002. Washington, DC (USA): United States Department of Energy. Dostupné také z: https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/vision_doc.pdf

ALEXEEVA, O.K., S.I. KOZLOV a V.N. FATEEV 2011. Hydrogen transportation. 'Alternative Fuel Transport' international science and technology journal. (321, 18-24. ISSN 2073-1329.

Annual Energy Outlook 2009: With Projections to 2030 [online]. 2009. [online]. Washington, DC (USA): Office of Integrated Analysis and Forecasting U.S. Department of Energy [cit. 2016-03-29]. DOE/EIA-0383(2009). Dostupné z: [http://www.eia.gov/oiaf/aeo/pdf/0383\(2009\).pdf](http://www.eia.gov/oiaf/aeo/pdf/0383(2009).pdf)

AREVA HTGR High Temperature Gas-cooled Reactor: INFORMATION KIT. 2014. Charlotte, NC (USA): AREVA Inc. Dostupné také z: <http://us.aveva.com/home/liblocal/docs/nuclear/htgr/htgr-infokit-2014-03.pdf>

BIČÁKOVÁ, Olga. 2010. Možnosti výroby vodíku biologickými procesy. 18 [online]. Fakulta technologie ochrany prostředí Vysoké školy chemicko-technologické v Praze, **2010**(4), 10 [cit. 2016-02-26]. ISSN 1804-2058. Dostupné z: http://paliva.vscht.cz/data/clanky/29_moznosti_vyroby_vodik_u_biologickymi_procesy.pdf

DANIELS, Steve. 2015. FutureGen 'clean-coal' plant is dead. *Crain's Chicago Business* [online]. **2015** [cit. 2016-02-26]. Dostupné z: <http://www.chicagobusiness.com/article/20150203/NEWS11/150209921/futuregen-clean-coal-plant-is-dead>

DECOURT, Benoit, Bruno LAJOIE, Romain DEBARRE a Olivier SOUPA. 2014. *HYDROGEN - BASED ENERGY CONVERSION: More than storage: system flexibility*. Gravenhage (Netherlands): SBC Energy Institute. Dostupné také z: <http://www.sbc.slb.com/SBCInstitute/Publications/Hydrogen.aspx>

DICKS, Andrew L. 1996. Hydrogen generation from natural gas for the fuel cell systems of tomorrow. *Journal of Power Sources*. Elsevier, **1996**(61), 113–124. DOI: 10.1016/S0378-7753(96)02347-6. ISSN 0378-7753.

DLOUHÝ, Petr a Luděk JANÍK. 2007. TRANSPORT A SKLADOVÁNÍ VODÍKU: Skladování vodíku II. In: *Česká vodíková technologická platforma* [online]. [cit. 2016-03-29]. Dostupné z: <http://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/transport-a-skladovani-vodiku/620-skladovani-vodiku-ii>

DLOUHÝ, Petr a Luděk JANÍK. 2007. VODÍKOVÉ HOSPODÁŘSTVÍ. In: *Česká vodíková technologická platforma* [online]. [cit. 2016-03-29]. Dostupné z: <http://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/vodikove-hospodarstvi/654-vodikove-hospodarstvi>

DLOUHÝ, Petr a Luděk JANÍK. 2007. VYUŽITÍ VODÍKU: Účinnost. In: *Česká vodíková technologická platforma* [online]. Husinec-Řež: ÚJV Řež, a.s. [cit. 2016-03-29]. Dostupné z: <http://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/vyuziti-vodiku/637-ucinnost>

DODDS, Paul E. a Will MCDOWALL. 2012. *A review of hydrogen delivery technologies for energy system models: UKSHEC Working Paper No. 7* [online]. In: . London: UCL Energy Institute, University College London, 10-16, 22 [cit. 2016-03-29]. Dostupné z: https://www.bartlett.ucl.ac.uk/energy/research/themes/energy-systems/hydrogen/WP7_Dodds_Delivery.pdf

Encyklopedie fyziky [online]. 2011. [online]. Jaroslav Reichl, Martin Všetička [cit. 2016-03-29]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/>

Energy Transition: The German Energiewende [online]. 2015. [online]. SRN: The Heinrich Böll Foundation [cit. 2016-03-29]. Dostupné z: <http://energytransition.de/>

FUEL CELL TECHNOLOGIES OFFICE MULTI-YEAR RESEARCH, DEVELOPMENT, AND DEMONSTRATION PLAN: Hydrogen Delivery. 2015. Washington, DC (USA): Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. Dostupné také z: http://energy.gov/sites/prod/files/2015/08/f25/fcto_myrrdd_delivery.pdf

HYBRID POWER PLANT. 2011. . *ENERTRAG* [online]. Dauerthal (SRN): ENERTRAG Aktiengesellschaft [cit. 2016-03-29]. Dostupné z: https://www.enertrag.com/90_hybridkraftwerk.html?&L=1

CHENG, Jun, Huibo SU, Junhu ZHOU, Wenlu SONG a Kefa CEN. 2011. Hydrogen production by mixed bacteria through dark and photo fermentation. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. **36**(1), 450-457 [cit. 2016-03-29]. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2010.10.007. ISSN 03603199. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319910020549>

KÖHLER, Jonathan, Martin WIETSCHEL, Lorraine WHITMARSH, Dogan KELES a Wolfgang SCHADE. 2010. Infrastructure investment for a transition to hydrogen automobiles. *Technological Forecasting and Social Change* [online]. **77**(8), 1237-1248 [cit. 2016-03-29]. DOI:

10.1016/j.techfore.2010.03.010. ISSN 00401625. Dostupné z:
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0040162510000624>

LARIN, V a C HUNT. 1993. *Hydridic earth: the new geology of our primordially hydrogen-rich planet*. Calgary: Polar Pub. ISBN 09-694-5062-1.

LI, Fu. 2014. *HTR Progress in China*. Vídeň, Rakousko: VIC. Dostupné také z:
https://www.iaea.org/NuclearPower/Downloadable/Meetings/2014/2014-04-08-04-11-TM-NPTDS/2_Li01.pdf

MFC4Sludge [online]. 2015. [online]. [cit. 2016-03-30]. Dostupné z:
<http://www.mfc4sludge.eu/>

Superconductive cable system. 1969. US3643002. Přihlášeno 19. 3. 1969. Zapsáno 19. 3. 1969.

MORDKOVIČ, V.Z. 2006. Трезвый взгляд на водородную энергетику (Trezvyj vzgljad na vodorodnuju energetiku). *Chimija i žizň*. Moskva: Chimija i žizň, (5), 8-11. Dostupné také z:
http://files.school-collection.edu.ru/dlrstore/0c814d79-8194-6881-b969-6e462aaf13ed/08-11_05_2006.pdf

Obnovitelný vodík. 2004. . In: *Portál TZB-info* [online]. Praha: Topinfo s.r.o. [cit. 2016-03-31]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/2006-obnovitelnny-vodik>

PAZDERA, Josef. 2005. Nová technologie uskladnění vodíku - tablety. In: *Objective Source E-Learning* [online]. Telč: Osel,s.r.o. [cit. 2016-03-29]. Dostupné z: <http://www.osel.cz/1442-nova-technologie-uskladneni-vodiku-tablety.html>

První reaktory IV. generace by se měly objevit do 10 let. 2007. . *Česká nukleární společnost* [online]. Praha: Česká nukleární společnost [cit. 2016-03-31]. Dostupné z: <http://www.csvts.cz/cns/news07/070104g.htm>

RAMSDEN, T. a D. STEWARD 2009. *Analyzing the Levelized Cost of Centralized and Distributed Hydrogen Production Using the H2A Production Model: Technical Report*. 2. Golden, Colorado (USA): National Renewable Energy Laboratory. Dostupné také z: <http://www.nrel.gov/docs/fy09osti/46267.pdf>

REICHELSTEIN, Stefan a Anna ROHLFING-BASTIAN. 2013. *Levelized Product Cost: Concept and Decision Relevance*. Pittsburgh, PA (USA). Dostupné také z: <https://server1.tepper.cmu.edu/seminars/docs/LPC.pdf>. Carnegie Mellon University.

RUTH, Mark a Fred JOSECK. 2011. Hydrogen Threshold Cost Calculation. In: *Program Record (Offices of Fuel Cell Technologies)* [online]. Spojené státy americké: Department of energy, s. 8 [cit. 2016-03-26]. Dostupné z: https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/11007_h2_threshold_costs.pdf

SCHULTZ, K. R., L. C. BROWN, G. E. BESENBRUCH a C. J. HAMILTON 2003. *Large-Scale Production of Hydrogen by Nuclear Energy for the Hydrogen Economy*. Spojené státy americké: UNT Digital Library. Dostupné také z: <http://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc739749/>

SIMANAITIS, Dennis. 2012. HYDROGEN I.C.: PART 3: BMW. In: *Simanaitis Says* [online]. Dennis Simanaitis [cit. 2016-03-29]. Dostupné z: <http://simanaitissays.com/2012/10/11/hydrogen-i-c-part-3-bmw/>

SIMBECK, D. a E. CHANG 2002. *Hydrogen Supply: Cost Estimate for Hydrogen Pathways - Scoping Analysis*. USA: National Renewable Energy Laboratory. Dostupné také z: <http://www.nrel.gov/docs/fy03osti/32525.pdf>

ŠVÁB, Michal. 2006. TRENDY VE VÝVOJI VODÍKOVÉHO HOSPODÁŘSTVÍ VE SVĚTĚ A MOŽNOSTI UPLATNĚNÍ V ČESKÉ REPUBLICE. In: *INFORMAČNÍ PORTÁL Ministerstva průmyslu a obchodu: O PODPOŘE ENERGETICKÝCH ÚSPOR A VYUŽITÍ OBNOVITELNÝCH ZDROJŮ ENERGIE* [online]. ČR: Česká energetická agentura [cit. 2016-03-29]. Dostupné z: <http://www.mpo-efekt.cz/dokument/01.pdf>

The "hydrogen" project. 2016. . *GIACOMINI S.P.A.* [online]. San Maurizio d'Opaglio (NO) (ITALY): GIACOMINI S.P.A. [cit. 2016-03-29]. Dostupné z: <http://www.giacomini.com/en/zero-impact-conditioning>

V Česku se brzy objeví vodíkové technologie pro energetiku. 2016. . *Portál SolarniNovinky.cz* [online]. [cit. 2016-03-29]. Dostupné z: http://www.solarninovinky.cz/?zpravy/2016020805/v-cesku-se-brzy-objevi-vodikove-technologie-pro-energetiku#.Vvqdl_I94uU

WAGNER, Vladimír. 2002. Ekologické problémy hvězd aneb odkud pocházejí chemické prvky ve vesmíru. In: *Oddělení jaderné spektroskopie: Ústav jaderné fyziky* [online]. Brno [cit. 2016-03-29]. Dostupné z: <http://ojs.ujf.cas.cz/~wagner/prednasky/ekologie/osnova.html>

WEINZETTL, Vladimír. 1998. Termonukleární fúze v tokamacích. In: *VIRTUÁLNÍ KATEDRA FYZIKÁLNÍCH VĚD A INFORMATICKÉ PEDAGOGIKY* [online]. Praha: ČVUT [cit. 2016-03-29]. Dostupné z: <http://vega.fjfi.cvut.cz/docs/sfbe/tokamak/>

World Hydrogen: Industry Study with Forecasts for 2013 & 2018 [online]. 2010. [online]. (2605) [cit. 2016-03-28]. Dostupné z: <http://www.freedoniagroup.com/brochure/26xx/2605smwe.pdf>

XU, Shisen. 2014. Moving Forward With the Huaneng GreenGen IGCC Demonstration. *CORNERSTONE* [online]. **2014**(2), 5 [cit. 2016-02-26]. ISSN 2327-1051. Dostupné z:

<http://cornerstonemag.net/moving-forward-with-the-huaneng-greengen-igcc-demonstration/>

Příloha

Tabulka 1: Rozdělení palivových článků

Druh	Rozdělení palivových článků					
	Nízkoteplotní		Středněteplotní		Vysokoteplotní	
	Alkalické AFC (Alcaline Fuel Cells)	Membránové PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cells)	Přímé metanolové DMFC (Direct Methanol Fuel Cells)	Kyselé PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cells)	S tavenými karbonáty MCFC (Molten Carbonate Fuel Cells)	S pevnými oxidy SOFC (Solid Oxide Fuel Cells)
Elektrolyt	Hydroxid draselný	Iontoměničná membrána	Iontoměničná membrána	Kyselina fosforečná	Tavené karbonáty lithia, vodíku, draslíku	Oxid zirkoničitý s příměsí yttria
Pracovní teplota (°C)	60 – 100	20 – 80	20 – 130	170 – 250	600 – 650	800 – 1000
Pohyblivý iont	OH ⁻	H ⁺	H ⁺	H ⁺	CO ₃ ²⁻	O ²⁻
Elektrodové reakce	A: H ₂ +2OH ⁻ →2H ₂ O+2e ⁻ K: 1/2O ₂ +H ₂ O+2e ⁻ →2OH ⁻ Σ: H ₂ +1/2O ₂ →H ₂ O	A: H ₂ →2H ⁺ +2e ⁻ K: 1/2O ₂ +2H ⁺ +2e ⁻ →H ₂ O Σ: H ₂ +1/2O ₂ →H ₂ O	A: CH ₃ OH+H ₂ O→CO ₂ +6H ⁺ +6e ⁻ K: 3/2O ₂ +6H ⁺ +6e ⁻ →3H ₂ O Σ: CH ₃ OH+3/2O ₂ →CO ₂ +2H ₂ O	A: H ₂ →2H ⁺ +2e ⁻ K: 1/2O ₂ +2H ⁺ +2e ⁻ →H ₂ O Σ: H ₂ +1/2O ₂ →H ₂ O	A: H ₂ +CO ₃ ²⁻ →H ₂ O+CO ₂ +2e ⁻ K: 1/2O ₂ +CO ₂ +2e ⁻ →CO ₃ ²⁻ Σ: H ₂ +1/2O ₂ +CO ₂ →H ₂ O+CO ₂	A: H ₂ +O ₂ →H ₂ O+2e ⁻ K: 1/2O ₂ +2e ⁻ →O ²⁻ Σ: H ₂ +1/2O ₂ →H ₂ O
Účinnost (%) (elektrická)	45 – 60	40 – 60	40	38 – 45	45 – 60	50 – 65
Výkon (kW)	Do 20	Do 250	Do 10	50 – stovky kW	Do několika MW	Do několika MW
Používané palivo	Vodík	Vodík nebo Reformovaná paliva	Methanol (Ethanol)	Vodík nebo Reformovaná paliva	Vodík nebo Nepřímá paliva	Všechny druhy bez reformování
Možné aplikace	Kosmické lodě, lodě, ponorky	Univerzální	Přenosné články	Výroba energií	Výroba energií	Výroba energií

Zdroj: www.enviros.cz