

Strategická výzkumná agenda rozvoje vodíkového hospodářství v ČR

Únor 2010

Strategická výzkumná agenda vodíkových technologií

Únor 2010

Česká vodíková technologická platforma (HYTEP – Hydrogen Technology Platform)

IČO: 75103630

Husinec-Řež č.p. 130
250 68

Sídlo v areálu ÚJV Řež a.s., v budově Energetika



Zpracováno v rámci projektu Česká vodíková technologická platforma v programu OPPI Spolupráce

Návrh zpracovala pracovní skupina HYTEP na základě expertních zpráv členů platformy

Ing. Luděk Janík (ředitel HYTEP)

Ing. Aleš Doucek (ÚJV Řež a.s.)

Ing. Petr Dlouhý (ÚJV Řež a.s.)

Výsledný dokument byl dopracován na základě připomínek členů HYTEP.

1	Úvod	1
2	HYTEP	1
3	SVA	3
3.1	Metodologie zpracování	3
3.2	Vymezení oblasti zájmu	3
4	Motivace pro využívání vodíku jako energetického vektoru	4
4.1	Ropa - světové zásoby a jejich rozložení.....	5
4.2	Vliv využívání ropných produktů na životní prostředí	7
5	Legislativa.....	9
6	Priority výzkumu a vývoje	10
6.1	Výroba vodíku	10
6.1.1	Zhodnocení současného stavu	11
6.1.2	Parní reforming zemního plynu	11
6.1.3	Elektrolýza klasická	14
6.1.4	Elektrolýza vysokoteplotní.....	15
6.1.5	Termochemické cykly štěpení vody	17
6.1.6	Možnosti výroby vodíku pomocí JE.....	17
6.2	Skládování a distribuce vodíku.....	19
6.2.1	Konvenční způsoby skladování	19
6.2.2	Stlačený vodík	19
6.2.3	Kapalný vodík	19
6.2.4	Alternativní způsoby skladování	20
6.2.5	Cílové parametry.....	22
6.3	Palivové články.....	24
6.3.1	Články s polymerní elektrolytickou membránou	25
6.3.2	Životnost a spolehlivost součástí palivového článku	26
6.3.3	Možnosti zvyšování životnosti	27

6.3.4	Kritická místa.....	27
6.3.5	Shrnutí.....	27
6.4	Spalovací motory na vodík.....	28
6.4.1	Kombinace vodíkového spalovacího motoru a palivového článku.....	30
6.5	Využití vodíku.....	31
6.5.1	Vodík jako chemická surovina.....	31
6.5.2	Vodík jako energetický vektor.....	31
6.5.3	Využití vodíku v dopravě.....	31
6.5.4	Využití vodíku v energetice.....	35
6.5.5	Využití vodíku pro drobné mobilní aplikace.....	36
7	Strategické směry a cíle pro rozvoj využívání vodíku jako energetického nosiče	38
7.1	Poslání – základní směřování a principy v oblasti H ₂ technologií.....	38
7.1.1	Konkrétní krátkodobé cíle HYTEP (do 2015):.....	39
7.1.2	Konkrétní střednědobé cíle HYTEP (do 2030):.....	40
7.1.3	Dlouhodobé cíle HYTEP (do 2050)	40
7.2	Prioritní oblasti výzkumu a vývoje	40
8	Závěr.....	42
9	Literatura.....	43

Použité zkratky

HYTEP	Česká vodíková technologická platforma
TP	Technologická platforma
JTI	Joint Technology Initiative
FC	Palivový článěk
VaV	Vývoj a výzkum
ÚJV	Ústav jaderného výzkumu
VŠCHT	Vysoká škola chemicko-technologická
VSLIB	Technická universita v Liberci
VŠB – TUO	Vysoká škola báňská, technická univerzita Ostrava
SVA	Strategická výzkumná agenda
IAP	Implementační akční plán
MPO	Ministerstvo průmyslu a obchodu ČR
MŠMT	Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy
MŽP	Ministerstvo životního prostředí
FP6	Šestý rámcový program EU
FP7	Sedmý rámcový program EU
SF	Strukturální fondy
RP EU	Rámcové programy EU
LHV	Výhřevnost
HHV	Spalné teplo
CGH	Skleníkové plyny
LH	Kapalný vodík
JE	Jaderná elektrárna
Nm ³	Normální metr krychlový (101,325 kPa, 20°C, suchý plyn)

1 Úvod

Tento dokument je významným výstupem České vodíkové technologické platformy (HYTEP), jejímž posláním je podpora vývoje vodíkových technologií a zavádění vodíkového hospodářství v ČR. Vznik HYTEP byl iniciován Ministerstvem průmyslu a obchodu v roce 2006, přičemž k únoru 2010 bylo členem 13 organizací, představujících páteř výzkumu vodíkových technologií, zahrnující vysoké školy, výzkumné ústavy a průmyslové podniky.

Cílem Strategické výzkumné agendy pro oblast vodíkových technologií je identifikovat současný stav ve využívání vodíku jako energetického nosiče a zejména stanovit cíle, kam by měl výzkum a využívání vodíku v ČR směřovat. Zásadním aspektem je vazba na vnějšího prostředí, zejména stav v EU, kde existuje významná podpora využívání vodíku. Ta byla vyjádřena mj. vyčleněním oblasti vodíkových technologií do samostatné skupiny v rámci výzkumných projektů 7. rámcového programu (do Fuel Cell Hydrogen Joint Undertaking). Spolupráce se zahraničními subjekty je nepostradatelná už jen z toho důvodu, že Česká Republika měla minimálně 15letý skluz oproti vyspělým státům EU, přičemž tento rozdíl se v posledních letech daří úspěšně zkracovat díky využití prostředků např. ze Strukturálních fondů EU, RP EU, nebo programů na podporu vědy a výzkumu MPO a MDČR.

Česká Republika má velkou příležitost využít svůj silný průmyslový potenciál, který na první pohled nesouvisí s využíváním vodíku jako nosiče energie, ale v praxi se ukazuje jako velmi významný. Příkladem je rozvinutý chemický a energetický průmysl, který skýtá významný okamžitý zdroj vodíku, dále pak dlouholeté zkušenosti s vývojem elektrovozů (trolejbusy), které klasické automobily postrádají. Dalších podobných příkladů je celá řada. Příznivá je i poloha ve středu Evropy, představující můstek mezi východními zeměmi a starými členskými státy EU.

Pro pochopení strategických cílů obsahuje dokument stručnou charakteristiku jednotlivých vodíkových technologií.

2 HYTEP

Česká vodíková technologická platforma je zaměřena na podporu vodíkových technologií. Zájem je směřován zejména na aplikace v dopravě, energetice a spotřební elektronice, tedy ty aplikace ve kterých je vodík využíván jako energetický vektor, nikoliv primárně jako chemická surovina (což je jeho tradiční využití v chemickém, petrochemickém, potravinářském, metalurgickém ad. průmyslu.).

Využití vodíku v dopravě je principiálně možné pro všechny její druhy (pozemní, vodní, letecká i vesmírná), což ostatně ukazují lodě, ponorky, letadla, raketoplány a další typy provozovaných dopravních prostředků poháněné vodíkem. Největší pozornost je však věnována pozemním vozidlům, zejména osobním automobilům a autobusům. Jednotlivé členské subjekty řeší několik desítek VaV projektů zaměřených na vodíkové technologie, např. první vodíkový autobus, vodíková loď v Hamburku (oba ÚJV Řež), využití odpadního vodíku z chemické výroby (VŠCHT Praha), spalovací motory na vodík (ČVUT, VSLIB) a mnohé další.

Česká vodíková technologická platforma slouží jako prostředek pro koordinaci postupu svých členů, od informace o vyhlášení výzev k podávání projektů (CZ i EU), přes pomoc při hledání partnerů až po diseminaci výsledků.

3 SVA

Cílem tohoto dokumentu je:

- Popsat současný stav vodíkových technologií
- Působit jako inspirativní, ale zároveň realistický průvodce pro definici komplexního výzkumného programu, mobilizovat zúčastněné strany a zajistit aby národní vývoj nezaostal za dalšími státy
- Stimulovat investice do výzkumu
- Poskytnout informační podporu pro politická rozhodnutí

3.1 Metodologie zpracování

Části SVA byly zpracovány expertními týmy jednotlivých členů platformy v průběhu roku 2009. Práce na SVA probíhaly v následujících krocích:

- Vymezení a diskuse strategických oblastí SVA
- Stanovení členů pracovních skupin jednotlivých oblastí
- Specifikace cílů, doporučení a nástrojů jednotlivými skupinami
- Diskuse a připomínkování jednotlivých částí
- Vytvoření uceleného celku SVA editory a zpracování připomínek počátkem roku 2010
- Zveřejnění dokumentu

3.2 Vymezení oblasti zájmu

Vodíkové hospodářství je ucelený koncept technologií sloužící k uspokojování energetických potřeb člověka. Z pohledu výzkumu a vývoje lze tento koncept rozdělit do několika samostatných technologických oblastí, které lze řešit samostatně. Rozvoj v každé z uvedených oblastí je však zároveň limitem pro koncept jako celek. Těmito oblastmi jsou :

- Výroba vodíku
- Skladování a distribuce
- Užívání vodíku

4 Motivace pro využívání vodíku jako energetického vektoru

Problematika energetického využívání surovin provází lidstvo od nepaměti. Problémy spojené s vyhledáváním a dostatečně účinným využíváním energetických zdrojů si s sebou neseme i v moderní době, rozsah spotřeby energie v současné době je oproti minulosti mnohonásobně větší. Nejen, že je potřeba celkově velké množství energie, ale je také nutné, aby byla k dispozici tam, kde je jí v daném čase potřeba.

Výroba elektrické energie z fosilních paliv a jejich využívání v dopravě s sebou přináší vedle nesporných výhod i mnohé nedostatky. Mezi nejzávažnější patří především zvýšená zátěž pro životní prostředí, způsobená exhalacemi škodlivých látek jako jsou NO_x, SO₂, suspendované částice atd. Neustálé zvyšování spotřeby energie na jedné straně a vysoký nárůst intenzity dopravy (především automobilové) představují globální problém, kterým je nutné se zabývat.

V poslední době sílí přesvědčení, že pro dosažení trvale udržitelného rozvoje je potřeba zásadnější změna energetického systému - tento názor významně podporuje fakt, že světově významná naleziště ropy se většinou nalézají v politicky nepříteliš stabilních oblastech. S tím souvisí i skutečnost, že současné předpovědi ohledně termínu dosažení maxima těžby ropy se pohybují zhruba v rozmezí let 2015 - 2030. Negativní dopad na tuto situaci má silný hospodářský růst Indie a Číny, jejichž spotřeba ropy je již taková, že by její poptávku neuspokojil ani přímý ropovod ze Saudské Arábie. Pozitivní vliv by naopak měla případná nová naleziště, očekávaná především v oceánech či ropných pískách, jejichž společným ukazatelem jsou ale výrazně vyšší náklady na těžbu než u klasických nalezišť.

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 neprojeví v takové míře, aby nárůst spotřeby energie výrazně zpomalily.

Za této situace je pro naši civilizaci životně důležité nalézt alternativu k současným palivům; pravděpodobně nejnadějnějšími kandidáty na tento post jsou elektřina a vodík. Zásadní výhodou vodíku je široké spektrum látek, ze kterých lze vyrobit, dále vysoká výhřevnost (3x vyšší než benzín nebo nafta). Nevýhodou je především jeho plynný stav za normálních podmínek a z toho vyplývající nutnost jeho komprese nebo zkapalnění pro další využívání. Vodík se v přírodě nevyskytuje v elementární formě, ale je vázán ve sloučeninách. Tato skutečnost vede k nutnosti vložit energii k výrobě vodíku, ale na druhé straně existuje možnost jeho výroby z vody.

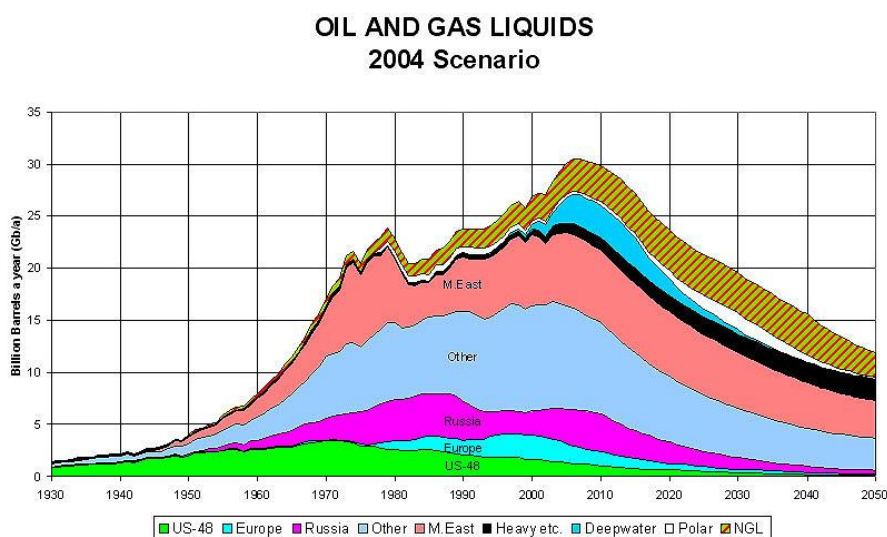
Vodíkové hospodářství je možné definovat jako soubor technologických řešení pro uspokojování energetických potřeb, jejichž společným jmenovatelem je vodík. Hned v úvodu je třeba zdůraznit, že vodík není klasické palivo, ale energetický vektor neboli nosič energie. Vodíkové technologie jsou maximálně tak ekologicky čisté jak čisté jsou primární zdroje energie a suroviny, které jsou při výrobě vodíku využity. Z těchto aspektů plyne možné využití vodíkových technologií.

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. Zařízení, která jsou schopna přeměnit chemickou energii vodíku přímo na elektřinu (a teplo) se nazývají palivové články (nezaměňovat s palivovými články v jaderných elektrárnách). Jejich principem je sloučení molekuly vodíku a kyslíku za vzniku vody. Velkou výhodou palivových článků je účinnost energetické přeměny, která činí běžně 50% (desetiny W až MW). V případě kogenerace – využití elektřiny i produkovaného tepla – je celková účinnost až 80%. Jejich nevýhodou je v současné době hlavně cena, která je vysoká především z důvodu nezrálosti technologie a absence sériové výroby. Eliminaci uvedených problémů by mělo vyřešit úsilí v průmyslových a vědeckovýzkumných institucích především v USA, EU a Japonsku.

4.1 Ropa - světové zásoby a jejich rozložení

V poslední době se velmi často objevují informace ohledně nadcházející ropné krize a možnostech jejího řešení. Důvody jsou evidentní; jednoho dne, ať už to bude za 20, 40 či 60 let dosáhneme tzv. Ropného vrcholu (Oil-Peak, nebo také Hubbertův ropný zlom). Ten neoznačuje vyčerpání ropných nalezišť, ale stav, při kterém bude cena ropy neúnosně vysoká a začne tak po ní klesat poptávka a objem její těžby. Je třeba poznamenat, že ke konečnému vytěžení zásob ropy dojde zřejmě až za několik set let, nicméně jako zdroj energie se stane ekonomicky a později i energeticky nezajímavá. Ropa však bude stále nezastupitelným zdrojem uhlovodíků pro chemický a farmaceutický průmysl.

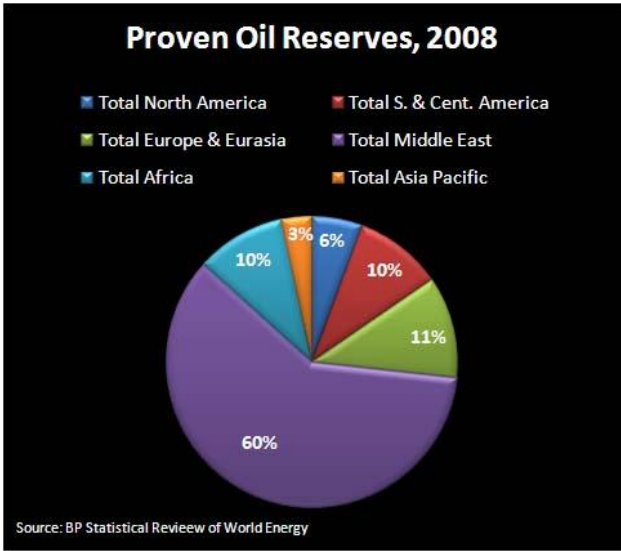


Obr. 1: Předpokládaný scénář průběhu zásob ropných rezerv (zde oil-peak 2006)

Odhad, kolik ropy ještě zbývá, je velmi složitá disciplína s mnoha proměnnými. Vyžaduje přihlédnutí k velkému množství nejrozumnějších vstupních dat s ohledem na ekonomické a politické zájmy jednotlivých států a největších ropných producentů. Podle Colina Campbella (zakladatel International Association for the Study of Peak&Gas) firmy málokdy zveřejňují skutečný stav svých rezerv kvůli komerčním důvodům. Zástupci států ze sdružení OPEC, které dohromady kontroluje přes 78 % světových ropných rezerv, dle něj často nemluví pravdu. Princip spočívá v tom, že firmy zpočátku záměrně podcení velikost nově objeveného naleziště, aby mohly do budoucna přicházet s optimistickými zprávami, které mají vliv na růst hodnoty vlastních akcií.

Mnohem vážnějším problémem je však skutečnost, že odhady rezerv zemí OPEC byly koncem osmdesátých let systematicky nadhodnocovány. Ropné rezervy na Blízkém východě stouply během tří let o 43 procent, přestože nebyla objevena žádná větší ropná ložiska. Americký úřad o ropných zásobách vydal zprávu, podle které jsou "vyčerpávány světové zásoby ropy třikrát rychleji, než jsou objevovány nové." Celosvětová poptávka po ropě, resp. ropných produktech roste. Klasickým příkladem je Čína s výrazným nárůstem počtu vozidel, stejně jako Indie.

Nutně tak podle amerických úřadů dojde k dosažení limitu a nebude dostatek ropy na uspokojení poptávky. I když se odborníci neshodují na tom, kdy dojde k vyvrcholení těžby ropy, předpovědi amerických geologů a dalších odborníků očekávají, že k tomu dojde mezi rokem 2003 a 2020. Žádná předpověď nejde dále než je rok 2020.



Obr. 2: Rozložení ověřených světových zásob ropy

Využívání ropy má dále vedle svých předností (zatím relativní dostupnost, přijatelná cena) i mnohé nečnosti. Z praktických dopadů je nejdůležitější politické hledisko - rozmístění světových zásob ropy má daleko k optimálnímu uspořádání pro vyspělé západní státy.

Pro případy, kdy se energetické zdroje staly velmi účinným politickým nástrojem, není třeba chodit do minulosti. Problémy s dodávkou ruského zemního plynu přes Ukrajinu do Polska, Bulharska a dalších států EU v zimě 2008/2009 se částečně dotkly i České republiky. Je to právě obava ze zranitelnosti státních energetických soustav, která je hlavním argumentem politických rozhodnutí podporujících alternativní paliva.

4.2 Vliv využívání ropných produktů na životní prostředí

Principiálně existují dvě skupiny vlivů využívání ropy na ŽP - vyhnutelné a nevyhnutelné. Vyhnutelné jsou takové, které jsou způsobeny lidskou chybou, případně selháním techniky a nevyhnutelné vyplývají z fyzikálně - chemických zákonitostí.

Vyhnutelné vlivy jsou zejména havárie ropných tankerů a ropovodů, při kterých dochází k masivním únikům ropy. Zůstane-li vyteklá ropa pouze na moři (*Jedna tuna ropy stačí ke znečištění 6 – 12 km² hladiny oceánu. V roce 1975 pokrývala tenká vrstvička ropy asi pětinu plochy oceánů a moří.*), je likvidace následků výrazně jednodušší než v případě kontaminace členitého pobřeží. Obecně se využívají norné stěny a směsi sorbentů, povrchově aktivních látek a detergentů, jejichž úkolem je ropu lokalizovat, koncentrovat a případně rozložit.



Obr.3: Havárie tankeru Exxon Valdez, Aljaška 1989.

Nevyhnutelné vlivy, jak bylo uvedeno výše, souvisí s fyzikálně-chemickými vlastnostmi jednotlivých látek, nejčastěji se jedná o produkty spalování. Ačkoliv se může zdát nárůst teploty o 2-3°C za posledních 150 let jako vysoký (a s ním spojené jevy jako je tání ledovců ad.), z dlouhodobého pohledu (stovky tisíc až miliony let) se jeví jako marginální.

Ropné produkty, které jsou využívány pro svůj energetický obsah, jsou nejvíce zastoupeny v oblasti dopravy. V dalším textu budou uvedeny vybrané nejdůležitější produkty jejich spalování (tučně v tab. 1) a jejich vliv na zdraví člověka, případně vliv na ŽP. Kompletní přehled všech škodlivých látek, vznikajících při dopravě, by byl nad rámec této práce, je však k dispozici u autora.

Výfukové plyny jsou směsí chemických látek, jejichž zastoupení je závislé na koncepci a provozním zatížení motoru a na typu použitého paliva. Nejvýznamnější látky z hlediska vlivu na životní prostředí a zdraví člověka, které vznikají při spalování fosilních paliv v tepelných motorech, jsou uvedeny v Tab. 1.

Látka	Emitované množství [g.kg ⁻¹ paliva]			
	Benzínový osobní automobil s katalyzátorem	Naftový osobní automobil	LPG osobní automobil	Naftové nákladní vozidlo nad 3,5 t
CO ₂	3500	3464	3030	3183
CO	10,58	4,06	121,0	9,31
NO _x	3,31	18,16	36,80	30,56
N ₂ O	4,5	0,17	0	0,19
CH ₄	0,31	0,08	1,02	0,06
VOC	1,07	0,54	26,4	2,66
PM	0 / 0	1,63	0	1,1
SO ₂	1,02	-	-	-
PAH	260 / 143,8	1277	49,46	241,9

Tab. 1: Průměrné hodnoty emisí vybraných látek podle kategorie (Zdroj: CDV)

Jako emise z dopravy je třeba zahrnout také otěry z povrchů silnic, mechanických částí motorů, ložisek, brzdových destiček atd.

V březnu 2007 byla představena nová zpráva EEA „Doprava a životní prostředí 2005“. Ze zprávy vyplývá prudký nárůst dopravy na území EU. Zatímco emise skleníkových plynů z jiných sektorů klesají, emise z dopravy narostly v evropských zemích mezi léty 1990 – 2003 o 22 %. Zpráva EEA dále předpokládá, že mnoho evropských měst nebude schopno v blízké budoucnosti schopno dodržet limity kvality ovzduší.

5 Legislativa

Činnost vodíkové platformy, na rozdíl od ostatních oborových odvětví, se výrazně liší v tom, že legislativa ČR vůbec nezná a neřeší problematiku využívání vodíku jako energetického vektoru. Je tedy nutné tento problém urychleně napravit, což je jedním z nejdůležitějších úkolů HYTEP. Nejvýznamnějším příkladem tohoto stavu je zákon 311/2006 Sb. O pohonných hmotách, který, kromě dalších záležitostí, specifikuje jaké chemické látky lze využít jako palivo. Vodík, ačkoliv je součástí každé uvedené látky, zde není zakotven a není jej tedy možné přímo využívat. Projekt prvního vodíkového autobusu a vodíkové čerpací stanice posloužil jako „legislativní ledoborec“ a umožnil zahájit procesy, vedoucí k možnosti využívání vodíku jako energetického vektoru.

Evropská unie využívání vodíku přímo podporuje, což se projevilo mj. ve vydání závazné směrnice, kterou jsou členské státy povinny přijmout do své legislativy a která přímo specifikuje jak je možné vodík využívat. Ministerstvo průmyslu a obchodu ČR připravilo v součinnosti s Českou vodíkovou technologickou platformou novelu zákona o pohonných hmotách, která tento problém řeší, nicméně nebyla dosud projednána v parlamentu ČR.

Podobný problém se vyskytl se schvalováním vodíkových vozidel, což je problematika spadající pod gesci Ministerstva dopravy ČR. HYTEP s využitím zkušeností od zahraničních partnerů připravilo podklady pro MDČR a umožnilo tak nastavit pravidla pro schvalování H₂ vozů.

Po technické stránce, zejména s ohledem na bezpečnostní aspekty, je nutné dodržovat technické předpisy, vyjádřené většinou technickou normou. V ČR žádná podobná norma neexistovala, HYTEP tedy ve spolupráci s Českým normalizačním institutem vytvořil a vydal normu ČSN ISO 14687-1 Vodíkové palivo – specifikace produktu. Tvorba dalších norem bude následovat.

Legislativní procesy nejsou zdaleka tak přitažlivé jako např. vývoj vlastního vodíkového vozidla, nicméně jejich existence je zásadním předpokladem pro další rozvoj H₂ technologií. Ustanovení vodíku jako legálně použitelného paliva je v současné době zřejmě nejdůležitějším úkolem HYTEP a jejich členů.

6 Priority výzkumu a vývoje

Oblast vodíkových technologií lze rozdělit do tří základních kategorií, kterými jsou výroba vodíku, skladování a distribuce vodíku a využití vodíku. Následující kapitoly popisují priority výzkumu a vývoje v těchto skupinách a jsou dále děleny do podskupin.

6.1 Výroba vodíku

Udržitelná výroba vodíku je považována za rozhodující faktor pro vývoj celého odvětví. Vodík může být vyráběn mnoha způsoby. V současnosti v celosvětové produkci vodíku dominuje parní reforming zemního plynu následovaný zplyňováním uhlí. Tyto dva způsoby výroby vodíku jsou však založeny na fosilních palivech, což je vzhledem k jejich vyčerpatelnosti neudržitelné. Dále produkují skleníkové plyny a bez efektivního zachycování oxidů uhlíku negují výhody vodíku.

Další možností je výroba vodíku z obnovitelných zdrojů. Z nich se vodík získává pomocí elektrolýzy, vysokoteplotního rozkladu vody anebo zplyňováním či pyrolýzou biomasy. Ekonomický potenciál obnovitelných zdrojů však drasticky omezuje nízká hustota energie, často ještě zatížena nízkou účinností a velkým rozdílem mezi instalovaným a skutečným výkonem, který je způsoben nesouvislým tokem energie (např. větru nebo slunečního záření). Pěstování biomasy nebo výstavba alternativních zdrojů elektrické energie v relevantním množství by znamenala velký záběr půdy, k dalším problémům patří nesouvislé a především nezaručené dodávky energie. Proto by si vysoká závislost na těchto zdrojích vyžádala záložní systémy pracující s více spolehlivými zdroji nebo velké energetické zásoby. Omezující hranice obnovitelných zdrojů nejsou ve velikosti jejich přírodních toků (ve skutečnosti jsou obrovské), ale v jejich přirozeném rozšíření a s tím spojenými problémy koncentrace a přeměny těchto toků v energetické služby v přijatelné cenové relaci.

Zmiňované nedostatky nemá výroba vodíku v jaderných zařízeních, která se tak jeví jako jedna z dlouhodobě udržitelných možností jeho produkce. Například při výrobě vodíku parním reformingem zemního plynu by došlo k významnému snížení emisí CO_2 o více než 30 % a při použití elektrolýzy nebo termochemických procesů by nebyly emise CO_2 žádné (pomineme-li emise spojené s výstavbou zařízení). Jaderné zařízení neprodukuje ani jiné skleníkové či toxické plyny. V pokročilých reaktorech lze dosahovat velmi vysokých výstupních teplot a tím vyšší tyto tepelné účinnosti procesu výroby vodíku.

První skupinou technologií pro výrobu vodíku jsou ty, které využívají fosilní paliva jako zdroj vodíku. Druhou pak tvoří technologie, využívající jako zdroj vodíku vodu.

6.1.1 Zhodnocení současného stavu

V současné době je na území České republiky instalována celková kapacita výroby vodíku 410 t/den (údaje k roku 2008). Rozhodující podíl vyrobeného vodíku je spotřebován při výrobě amoniaku a hydrogenaci vyšších uhlovodíků, zejména při výrobě benzínu. Mezi další technologie podílející se významně na spotřebě patří redukce kovů a organických látek, ztužování tuků a svařování.

Následující tabulka uvádí souhrnný přehled výrobců vodíku v rámci ČR.

Závod	Projektovaná výroba	Vlastní spotřeba	Přebytek-spalování
	t/den	t/den	t/den
Chemopetrol a.s. Litvínov	259,20	250,55	8,64
Česká rafinérská a.s. Litvínov	43,19	26,09	17,10
Česká rafinérská a.s. Kralupy	19,20	19,20	0,00
Kaučuk a.s. Kralupy	26,52	0,00	26,52
BorsodChem MCHZ Ostrava	41,04	41,04	0,00
DEZA Val.Meziříčí	2,06	2,06	0,00
Paramo a.s. Kolín	3,24	3,24	0,00
Synthesia a.s. Semtín	0,65	0,34	0,26
Spolchemie a.s. Ústí	3,88	1,38	2,49
Spolana a.s. Neratovice	10,94	0,95	9,99

Tab. 2: Souhrnný přehled výrobců vodíku v rámci ČR

Hodnotám uvedeným v tabulce ve sloupci přebytek-spalování odpovídá maximální množství vodíku, které by bylo možno odebírat při 100 % využití plánované výrobní kapacity.

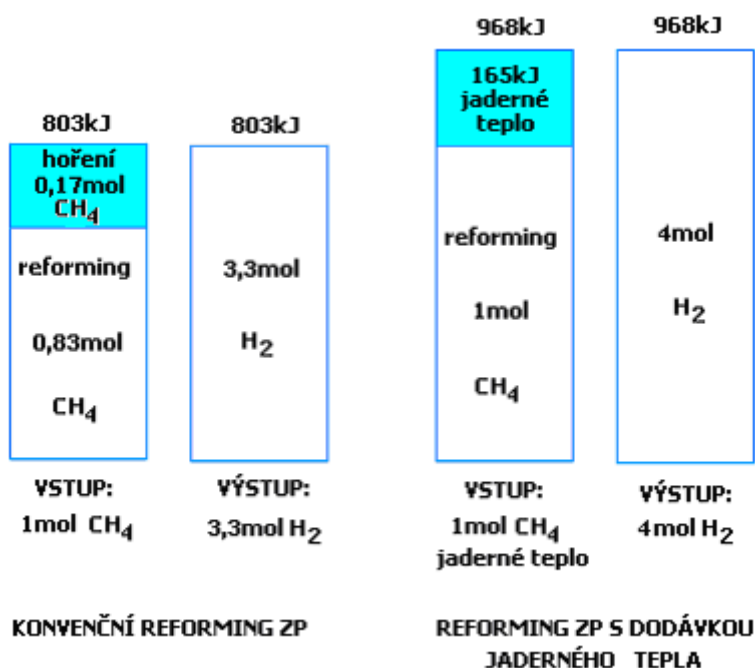
Ve stručnosti lze konstatovat, že v současnosti je z kapacity výroby vodíku 191 300 Nm³/h (410 t/den) instalované na území České republiky využíváno v souhrnu přibližně 161 000 Nm³/h (345 t/den). Při plném využití výrobních kapacit by tedy vznikal přebytek vodíku v celkovém objemu 30 300 Nm³/h (65 t/den). Přebytečný vodík je v současnosti spalován, popřípadě nejsou instalované kapacity zcela využívány. Tento přebytek představuje kapacitu produkce vodíku prakticky okamžitě a s minimálními investičními náklady dostupnou pro spotřebu.

6.1.2 Parní reforming zemního plynu

Tato technologie je v současnosti nejlevnějším a nejrozšířenějším způsobem výroby vodíku. Požadované vysoké teploty pro reakci lze získat spalováním zemního plynu; taková výroba je však zdrojem velkého množství skleníkových plynů. Proto je vhodné tuto technologii spojit s vysokoteplotním plynem chlazeným reaktorem (HTGR), čímž dojde k výraznému snížení emisí

skleníkových plynů. Spojení SMR s vysokoteplotním reaktorem bude z ekonomického hlediska srovnatelné s konvenčním reformingem zemního plynu.

Na následujícím obrázku je znázorněn idealizovaný příklad procesu SMR. Při SMR, kdy je tepelná energie dodávána spalováním části zemního plynu, vzniká z 1 mol CH₄ 3,3 mol vodíku; v případě SMR s jaderným zdrojem tepla vzniká z 1 mol CH₄ 4 mol vodíku. SMR ve spojení s jaderným reaktorem tedy vyprodukuje stejné množství vodíku, ovšem spotřeba zemního plynu je o 17,5 % nižší.



Obr.4: Schematické znázornění výhody při využití jaderného tepla pro SMR

Proces má dvě fáze; v první se za přítomnosti katalyzátoru do vodní páry (500 - 950° C, 0,3 - 2,5 MPa) přivádí metan. Směs metanu a páry reaguje za vzniku vodíku a oxidu uhelnatého a určitého množství oxidu uhličitého. Reakce probíhá za výše zmíněných teplot a tlaků v reformeru. Poté následuje navyšování množství produkovaného vodíku shift reakcí CO z reformeru s další přidanou párou. Reakce probíhá už za nižších teplot.

- 1) reformní reakce: $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$
- 2) shift reakce: $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$

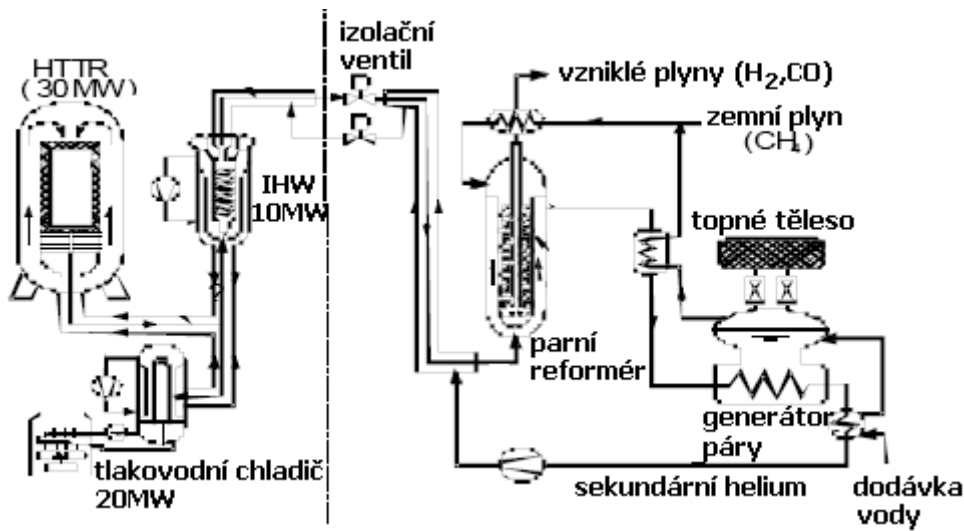
Reformní reakce (1) je endotermická a shift reakce (2) naopak exotermická (entalpie reakcí je v tab. 3). Jak již bylo napsáno výše, teplo pro endotermickou reformní reakci je v současné době dodáváno spalováním určité části zemního plynu. Z uvedeného je patrná výhoda při použití jaderného tepla jako zdroje tepelné energie (neopomenutelný je i kladný ekologický aspekt – snížení produkce CO₂).

Chemická reakce	ΔH [kJ/mol]
$\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$	-206
$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$	41

tab. 3: Entalpie parního reformingu ZP

Účinnost produkce vodíku je závislá na poměru páry a uhlíku ve směsi; pohybuje se okolo 80 %. Značnou nevýhodou je produkce vysokého množství oxidu uhličitého - na 1 kg vodíku se vyprodukuje 7,05 kg CO₂. Účinnost výroby vodíku spojením vysokoteplotního reaktoru a parní přeměny metanu by dosahovala až 80 % a současně by se snížila spotřeba zemního plynu a produkce CO₂ o více než 30 % ve srovnání s konvenčním reformingem.

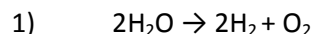
Japonský výzkumný institut JAERI vyvíjí spojení parního reformingu zemního plynu s jejich testovacím 30 MW vysokoteplotním reaktorem HTTR (viz obr. vlevo, blokové schéma na Obr. 5.). Výstupní teplota chladiva z HTTR je 950° C.



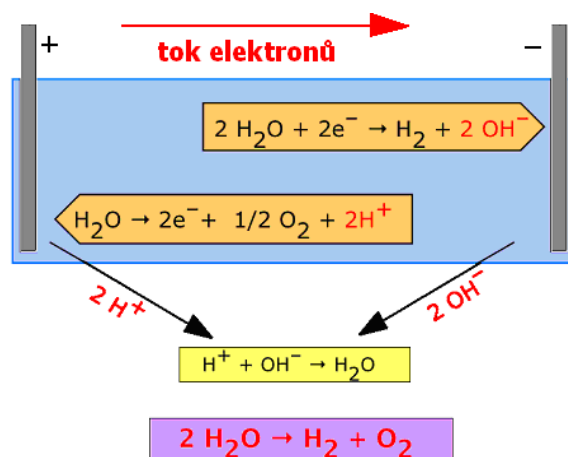
Obr.5: Blokové schéma spojení SMR a experimentálního reaktoru HTTR

6.1.3 Elektrolyza klasická

Elektrolýza (viz Obr. 6.) je proces, při kterém stejnosměrný proud při průchodu vodným roztokem štěpí chemickou vazbu mezi vodíkem a kyslíkem:



H^+ poté reaguje na katodě za vzniku plynu, který je jímán a následně skladován. Proces elektrolýzy probíhá za pokojových teplot a pro jeho chod je nutná pouze elektrická energie. Tímto způsobem jsou vyrobená asi 4 % z celkové světové produkce vodíku.



Obr.6: Elektrolyza

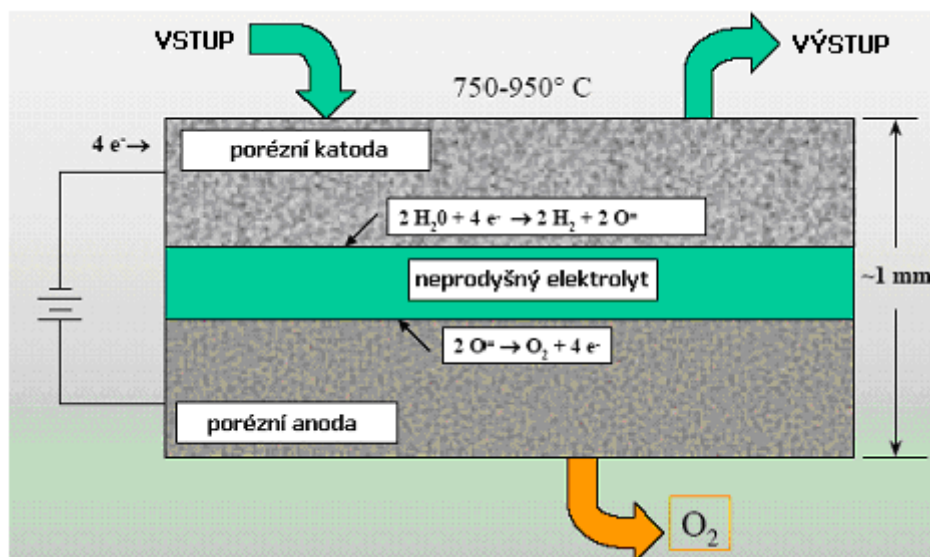
Ideální (reverzibilní) napětí dekompozice je 1,229 V ale reálné napětí se pohybuje v rozmezí 1,85 – 2,05 V (kvůli ireverzibilitě v reakčním mechanismu a nutnosti dodání části tepla ve formě elektrické energie). Účinnost procesu se potom pohybuje v rozmezí 80 – 92 % (HHV). Spotřeba elektřiny závisí na reakční entalpii a teplotě, při standardních podmínkách činí elektrická spotřeba přibližně 5 – 6 kWh/Nm³ vodíku, což odpovídá 55 – 66 kWh/kg vodíku. Minimální potřeba vody v elektrolyzáru je 0,8 l/Nm³ vodíku, v praxi je to však kolem 1 l/Nm³. Výstupem elektrolýzy je kyslík a vysoce čistý vodíkový plyn bez potřeby následných reakcí a pro většinu aplikací i bez nutnosti dodatečného dočišťování.

Konvenční elektrolýza je výhodná zejména tam, kde je levná elektřina a dostatek vody. Příkladem může být Island s jeho geotermální energií. Elektrolytické zařízení je modulární, takže může být navrženo jako velká centrální jednotka či jako malé zařízení pro lokální použití se stejnou účinností. K výhodám elektrolýzy patří možnost použití různých zdrojů vstupní energie a vysoká čistota elektrolytického vodíku. Nevýhodou jsou vysoké náklady na membránu v elektrolyzáru.

Elektrolýza může být spojena s dnešními jadernými zařízeními, např. s lehkovodními reaktory (LWR). Při této kombinaci je dosahováno celkové účinnosti 21 – 30 %, ale ve srovnání s komerční metodou výroby vodíku parní přeměnou metanu je toto řešení neekonomické. Zatímco náklady na výrobu vodíku parní přeměnou metanu jsou 1,15 – 1,4 \$/kg H₂, tak náklady na vyrobený vodík elektrolýzou z LWR dosahují 4,48 - 2,75 \$/kg H₂. V budoucnu se počítá se spojením elektrolýzy s pokročilými jadernými reaktory, čímž dojde ke snížení nákladů na výrobu vodíku.

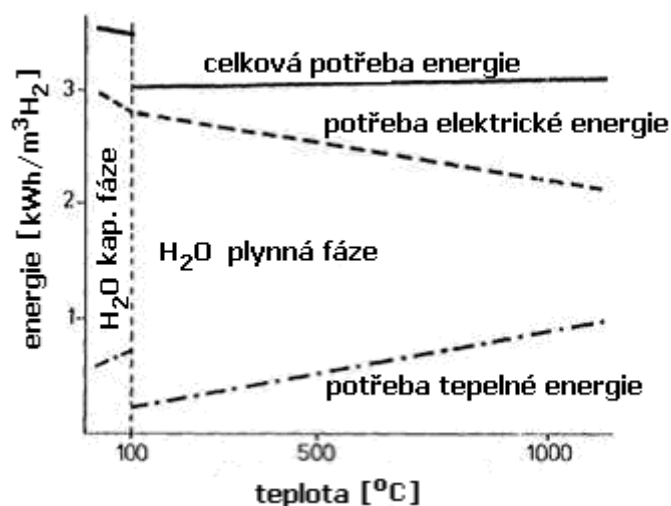
6.1.4 Elektrolýza vysokoteplotní

Pro vysokoteplotní elektrolýzu (Obr. 7.), nazývanou též někdy parní elektrolýza, je charakteristické, že část dodávané energie tvoří elektrická energie a část je přivedena ve formě tepla. Reakce probíhající v elektrolýzáru je reverzní k reakci probíhající v palivových článcích s pevnými oxidy (SOFC). Do elektrolýzáru vstupuje pára a vodík v poměru 50:50. Vystupuje z něho obohacená směs obsahující 75 % hmotnostních vodíku a 25 % hmotnostních páry. Z ní je na anodě oddělen iont kyslíku, který prochází skrz membránu (ZrO₂). Vodík je pak z páry oddělen v kondenzační jednotce.



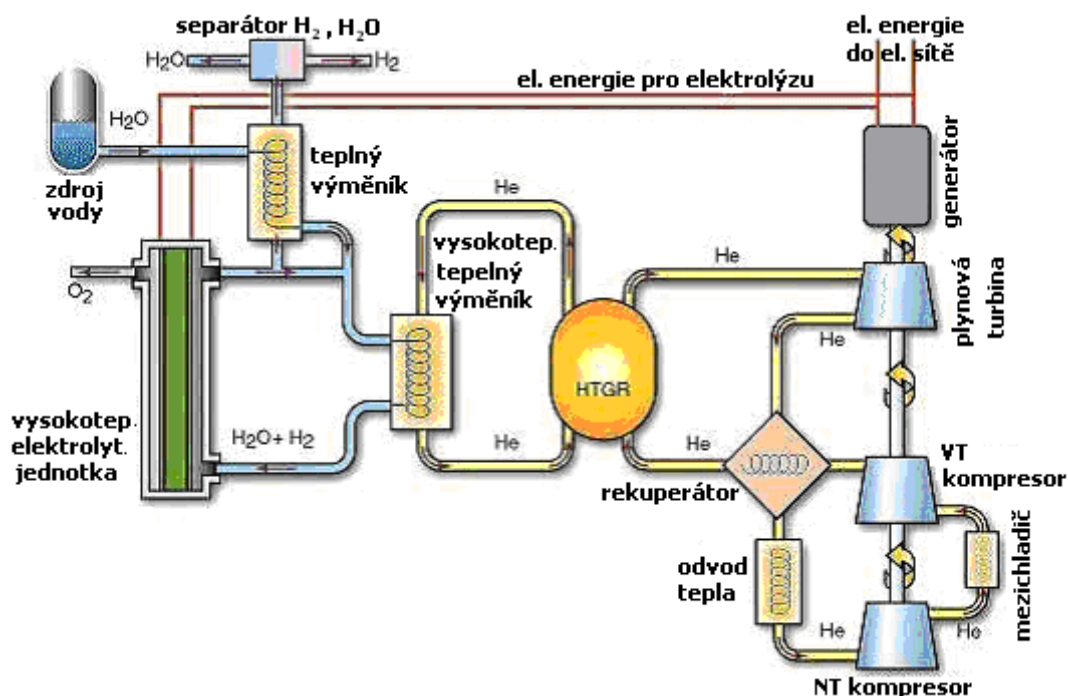
Obr.7: Vysokoteplotní elektrolýza

Výhodou je zvýšení účinnosti procesu díky snížené spotřebě elektrické energie a snadnějšímu překonání aktivační bariéry na povrchu elektrody. Z Obr. 8. je patrné, že při růstu teploty vstupní páry klesá spotřeba elektrické energie. Celková energie mírně roste, což je způsobeno právě nutným ohřevem páry. Další výhoda spočívá v cirkulaci samotných H₂O, H₂ a O₂ bez jiných chemických látek, což odstraňuje problémy s korozí.



Obr.8: : Spotřeba energie vysokoteplotní elektrolýzy na 1m³ vodíku

Tato technologie je vhodná pro pokročilé jaderné reaktory, které mají relativně vysoké výstupní teploty chladiva a vysokou účinnost přeměny na elektřinu. Spojení HTGR a HTES dá možnost vyrobit vodík s účinností srovnatelnou s reformingem zemního plynu či termochemickými procesy, ale bez spotřeby fosilních paliv a emisí skleníkových plynů (SMR) a bez korozivních problémů (termochemické procesy). Na Obr. 9. je schematicky nakresleno spojení vysokoteplotní elektrolýzy s pokročilým plynem chlazeným reaktorem. Účinnost výroby vodíku je v takovém případě 45 – 55 %. V blízké budoucnosti se předpokládají náklady na výrobu vodíku v GT-MHR 2,03 \$/kg H₂ a v AGR 2,37 \$/kg H₂.



Obr.9: Vysokoteplotní elektrolýza ve spojení s plynem chlazeným reaktorem

6.1.5 Termochemické cykly štěpení vody

Jaderné elektrárny patří mezi nejelekonomičtější zdroje pro výrobu elektřiny v základním zatížení, přispívají ke stabilitě a spolehlivosti elektrických sítí, k energetické nezávislosti, k stabilizaci cen elektřiny a v neposlední řadě k lepšímu životnímu prostředí. Ve většině případů se JE využívá výhradně pro výrobu elektrické energie, jen některá zařízení se využívají pro výrobu tepla. Aby jaderné zařízení využilo více svůj potenciál, mělo by se přistoupit k jeho nasazení i ve sféře produkce tepla: ve vytápění (teploty do 100° C) nebo ve využívání procesního tepla (rafinérie, petrochemický průmysl, výroba oceli, hliníku), odsolování mořské vody a pro výrobu vodíku.

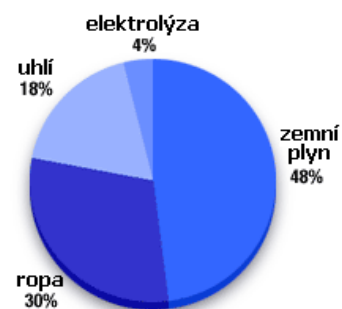
Termochemické procesy splňují dvě základní podmínky trvale udržitelného rozvoje: výroba vodíku je zásobována z „nevyčerpatelných“ zdrojů (vody) a v případě dodávky tepla z jaderných elektráren je výroba oproštěna od emisí skleníkových plynů. Účinnost výroby není omezena (jako v případě vysokoteplotní elektrolýzy) účinností výroby elektřiny. Důležité je nyní získat data termodynamiky a kinetiky chemických reakcí či chování materiálů. Tato data jsou pak základním předpokladem pro další optimalizaci procesů a výstavbu demonstračních jednotek.

Plány na velkovýrobu vodíku termochemickými procesy pomocí jaderné energie se opět stávají populárními v souvislosti s pozvolným přechodem na vodíkovou ekonomiku a s rozvojem reaktorů IV. generace. Nejslibnější spojení se jeví vysokoteplotního reaktoru s plně termochemickým S-I procesem (jak z hlediska účinnosti, tak z hlediska nákladů). I přes výzkum a malé laboratorní demonstrační jednotky bude nutné demonstrovat životaschopnost a konkurenceschopnost této technologie. Aby byl proces ekonomicky konkurenceschopný, je nutné dosáhnout celkové účinnosti procesu 50 % (i přes využití zbytkového tepla z procesu např. pro odsolování mořské vody a ekonomický zisk z prodeje kyslíku).

6.1.6 Možnosti výroby vodíku pomocí JE

Do budoucna pokročilé výrobní technologie (jako vysokoteplotní elektrolýza, S-I cyklus nebo UT-3 cyklus) slibují dosáhnout celkové účinnosti přeměny primárních energetických vstupů na energii vodíku přes 50 %. Také zásoby paliva pro jaderné elektrárny jsou dlouhodobé. Ve srovnání s jinými energetickými zařízeními vzniká malé množství odpadu. V kontrastu s obnovitelnými zdroji je jaderná síla vysoce koncentrovaný zdroj energie bez velké potřeby území. Její zdroje dostačují k zásobování jaderných zařízení na 50 - 100 let bez recyklace paliva (v rychlých reaktorech na 5000 roků). Jaderná energie je vhodná k uspokojování velkého objemu poptávek s vysokým stupněm spolehlivosti.

Obnovitelné zdroje nicméně mohou jadernou energii v mnoha směrech doplňovat (např. dodávky energie potřebné v oblastech odlehlých nebo vesnických) a tam kde je to možné pokrývat špičky spotřeby. Naopak k nevýhodám jaderné výroby patří vysoké investiční náklady, které si vyžadají nové jaderné elektrárny a výrobní zařízení pro vodík. Další otázkou je, kam s radioaktivním odpadem, který produkují jaderná zařízení. Dnes se vyhořelé palivo ještě stále skladuje v prostorách elektráren. Musí se proto nalézt vhodné skladovací prostory a při nárůstu počtu jaderných zařízení by se měla tato otázka řešit zavedením uzavřených palivových cyklů a recyklací paliva ke snížení množství izotopů s dlouhým poločasem rozpadu.



V současnosti se ve světě vyrobí přibližně 500 mld. Nm³/rok vodíku. Z výše uvedeného grafu je zjevné, že produkci vodíku dominuje využívání fosilních paliv. V úvodu této zprávy byly naznačeny výhody použití jaderné energie pro výrobu vodíku. V následující tabulce je uveden stručný přehled možností výroby vodíku pomocí JE a jejich charakteristika.

Proces	Elektrochemická výroba		Termochemická výroba	
Charakter.	Elektrolýza vody	Vysokoteplotní elektrolýza	Parní reforming ZP	Termochemické štěpení vody
Požadovaná teplota [°C]	<100, při p _{atm}	>500, při p _{atm}	>700	>800 pro S-I a WSP >700 pro UT-3 a IM 13
Účinnost procesu [%]	85 - 90	90 – 95 (T>800°C)	>60, v závislosti na teplotě	>40, v závislosti na TCh cyklu a teplotě
Účinnost při spojení s LWR, ALWR [%]	~27	~30	Nevhodný, neaplikovatelný	neproveditelný
Účinnost při spojení s MHR, ALWR, ATHR, S-AGR [%]	>40	>45, závisí na výkonu zařízení a teplotě	>60, závisí na teplotě	>40, závisí na TCh cyklu a teplotě
Výhody	+ prověřená technologie	+ vysoká účinnost + možnost spojení s reaktory pracujícími se středními teplotami + redukce emisí CO ₂	+ prověřená technologie + redukce emisí CO ₂	+ potenciál vysoké účinnosti + redukce emisí CO ₂
Nevýhody	- nízká účinnost v nejbližším časovém horizontu	- vyžaduje vývoj odolných velkých HTSE jednotek	- emise CO ₂ - závislost na ceně ZP	- agresivní chemikálie - požadavek vysokoteplotních reaktorů - vývoj velkých výrobních jednotek

tab. 4: Vybrané možnosti výroby vodíku pomocí JE a jejich charakteristika

6.2 Skladování a distribuce vodíku

Pro pochopení specifik skladování vodíku, které plynou z jeho chemicko-fyzikálních vlastností, je uvedena tabulka srovnávající vodík s ostatními běžně využívanými fosilními palivy.

Palivo	T	Hustota	Měrný Objem	Násobek M.O. vztažené k benzínu	Výhřevnost	Hustota Energie	Násobek H.E. vztažené k benzínu
Druh/skupenství	[°C]	[kg/m ³]	[l/kg]		MJ/kg	MJ/litr	
Vodík 1 bar	20	0,084	11939	8354,7	119	0,01	0,0003
Vodík 250 bar	20,00	17	58,8	41,15	119	2,024	0,065
Vodík 350 bar	20,00	22,2	45,2	31,6	119	2,64	0,085
Vodík 700 bar	20,00	39	25,9	18,14	119	4,6	0,15
Vodík kapalný	-253,0	71,08	14,1	9,85	119	8,46	0,27
Propan kapalný	20,00	498	2	1,4	46,3	23,08	0,74
Benzín kapalný	20,00	700	1,43	1	44,5	31,15	1

tab. 5 Vybrané chemicko - fyzikální parametry vodíku, včetně srovnání se stávajícími palivy

Z tabulky je zřejmé, že vodík má největší měrnou výhřevnost ze všech uvažovaných paliv. Pro většinu aplikací je však mnohem důležitějším parametrem hustota energie. Ta vyjadřuje množství energie na daný objem paliva. Je přímo úměrná výhřevnosti a hustotě paliva. Kapalný vodík má přibližně desetinovou měrnou hustotu a přibližně čtvrtinovou hustotu energie ve srovnání s benzínem. Pokud uvažujeme o použití vodíku pro mobilní aplikace je technologicky mnohem jednodušší použít pouze stlačený vodík. Podle použitého tlaku (v současné době přichází v úvahu 350, 700 popř. 1000 bar) je hustota energie dokonce dvanásobně (350 bar) až sedminásobně (700 bar) nižší oproti benzínu. Obtížné uskladnění v současné době komplikuje využívání vodíku v mobilních aplikacích.

Technologie skladování vodíku můžeme rozdělit podle stupně vývoje na konvenční a alternativní.

6.2.1 Konvenční způsoby skladování

Mezi konvenční technologie patří skladování stlačeného vodíku v tlakových nádobách, případně kapalného vodíku v kryogenních nádobách.

6.2.2 Stlačený vodík

Systémy pro uskladnění vodíku ve vysokotlakých nádobách jsou jednoduchou, vyspělou a roky provozu ověřenou technologií, přičemž existuje široká síť výrobců a distributorů. Byly zpracovány bezpečnostní analýzy a v neposlední řadě existuje legislativní rámec pro provoz těchto systémů. Z těchto důvodů jde v současnosti o nejpoužívanější způsob uskladnění vodíku zejména v dopravních prostředcích.

6.2.3 Kapalný vodík

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. Pro běžné používané nádrže dosahují ztráty až 3 % z obsahu na den. 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 paliva. Ve některých aplikacích je takto unikající vodík jímán a stlačován do přídavných tlakových lahví.

Stlačování a zejména zkapaňování vodíku je energeticky náročný proces. Energie potřebná ke zkapaňování dosahuje přibližně 40 % z LHV vodíku (LHV = 119 MJ/kg). Vzhledem k vysokým energetickým nárokům na samotný proces zkapaňování je takto upravený vodík využíván v aplikacích, kde požadavek vysoké hustoty energie převažuje nad ekonomickou stránkou procesu zkapaňování. Takovým příkladem může být raketový pohon na kapalný vodík, v tomto případě je navíc vyžita nízká teplota paliva k chlazení samotného raketového motoru.

V jiných aplikacích jako je například doprava vodíku na větší vzdálenosti je možné zkapaňováním dosáhnout menších celkových nákladů oproti jiným skladovacím technologiím.

6.2.4 Alternativní způsoby skladování

Mezi alternativní metody skladování patří například :

- Systémy na bázi hydridů
 - Metalhydridy
 - Komplexní hydridy
 - Alanáty
 - Borohydridy
- Vodík adsorbovaný na nanostrukturách
- Vodík chemicky vázaný ve sloučeninách
- Vodík ve skleněných mikrokuličkách

Systémy skladování vodíku v hydridech jsou založeny na principu absorpce vodíku do materiálů na bázi kovů. Jedná se o exotermní reakci, tzn. při absorpci je vyvíjeno teplo. Opačného děje - desorpce, tedy uvolňování vodíku z materiálu je naopak dosaženo dodáním tepla. Sledovanými parametry u těchto systémů jsou především teplota, při které dochází k desorpci vodíku z materiálu, hmotnostní kapacita absorbátoru (případně celého systému), objemová kapacita a v neposlední řadě cena a složitost systému.

Následující tabulka uvádí nejčastěji studované Metalhydridy včetně vybraných fyzikálních parametrů.

Parametr	Nízkoteplotní MeHydridy				Vysokoteplotní MeHydridy	
	Ti ₂ Ni-H _{2,5}	FeTi-H ₂	VH-VH ₂	LaNi ₅ -H _{6,7}	Mg ₂ Ni-H ₄	Mg-H ₂
Teplota desorpce 1,5 bar [°C]	-3	7	15	21	267	296
Teplota desorpce 10 bar [°C]	34	52	53	73	350	362
Hmotnost Hydridu pro absorpci1kg H2 [kg]	87	75	73	90	38	20
Teoretická hm. kapacita [% hm.]	-	2.2	-	2	-	7.5
Teoretická reverz. hm. podíl [%hm.]	1,13	1,3	1.37	1.1	2.63	5
Objemová hustota [gH ₂ /l]	-	115	-	117	100	110
Doplňování	snadné	-	-	obtížné	-	obtížné
Bezpečnost	bezpečné	-	-	-	bezpečné	hořlavé

tab. 6 Metalhydridy

Vybrané alanáty a borohydridy jsou uvedeny v následující tabulkách.

Alanáty	Teoretická reverzibilní hmotnostní kapacita [%]	Desorpční teplota [°C]	Hmotnost MH [kgMH/kgH ₂]	Objemová hustota [gH ₂ /l]
Na(AlH ₄)	5.6	> 100	17.9	95
Li(AlH ₄)	7.9	> 190	12.7	94
Zr(AlH ₄) ₂	3.9	> 130	25.6	-
Mg(AlH ₄) ₂	7.0	> 130	14.3	-

tab. 7 Alanáty

Borohydridy	% hm. (teoretická)	% hm. (dosažená)	Hustota [g/cm ³]
NaBH ₄	10.9	10.6	1.07
LiBH ₄	18.2	13.8	0.66

tab. 8 Borohydridy

Mezi uhlíkaté nanostruktury je řazen vysokoporézní grafit a uhlíkaté nanotrubice. V poslední době se pozornost zaměřuje na studium nanotrubic s jednoduchou stěnou, které disponují velkým potenciálem pro skladování vodíku. Problematikou se zabývá mnoho výzkumných týmů po celém světě. Hodnoty hmotnostní kapacity adsorbovaného vodíku v nanostrukturách uhlíku se dle jednotlivých studií pohybují v rozmezí 0,4 - 7 % hm.

Skleněné mikrokuličky (HGMs - Hollow Glass Microspheres) jsou duté kuličky z křemitého skla, MgAlSi skla, polyamidu, atd. Typické rozměry jsou 25 – 200 μm při tloušťce stěny 0,5 – 20 μm. Mohou být plněny plynným vodíkem až do přetlaku 100 MPa. Plnění probíhá mechanismem difúze molekul vodíku skrze stěnu při zvýšené teplotě (200 °C) a vysokém tlaku. Uvolňování vodíku je dosaženo opětovným zvýšením teploty. Hmotnostní kapacita se pohybuje do 15 % hm. při 700 barech, objemová kapacita do 20 gH₂/l. Skleněné mikrokuličky naplněné vodíkem je možné čerpat do nádrže podobně jako tekutinu. Prázdné mikrokuličky mohou být poté opět odčerpány a znovu plněny. Skladování vodíku v HGMs je ve stádiu výzkumu a vývoje a v současnosti není známa žádná komerční realizace.

Vodík můžeme skladovat a přepravovat také ve formě sloučenin bohatých na vodík. V jednom litru vody je paradoxně více atomů vodíku než v jednom litru kapalného vodíku. Nejznámější skupinou bohatou na vodík jsou uhlovodíky. Ty je možné skladovat v tlakových nádobách při běžných teplotách v kapalném stavu jako například propan, butan, zemní plyn, atd. Benzín a naftu, jako příklad směsi vyšších uhlovodíků, můžeme skladovat v kapalném stavu přímo za běžného tlaku a teploty. Tyto sloučeniny jsou obvykle chápány jako primární zdroj vodíku. Pro koncové aplikace, které vyžadují pro svojí činnost čistý vodík, je nutné zařadit mezi nádrž a palivový článek ještě reformer paliva.

6.2.5 Cílové parametry

Abychom mohli posoudit jednotlivé možnosti uskladnění vodíku, zaměříme se na sledování několika parametrů.

Prvním parametrem je **hmotnostní kapacita**, která je definována jako poměr hmotnosti vodíku vzhledem k hmotnosti celého skladovacímu systému, obvykle se udává v procentech [% hm.], (v anglické literatuře je označována jako *gravimetric density* [% mass]). Speciálně u systému skladování na bázi hydridů bývá tento poměr uváděn pouze jako poměr hmotnosti absorbovaného vodíku ku hmotnosti nasyceného absorbéru, tedy bez potřebné nádoby a souvisejících systémů pro absorpci a desorpci vodíku.

Dalším parametrem je **objemová kapacita**; je definována jako poměr hmotnosti vodíku ku objemu systému, jednotkou je kgH₂/m³ příp. gH₂/l (v anglické literatuře je označován jako *volumetric density*). Pro čistý vodík je objemová kapacita shodná s hustotou.

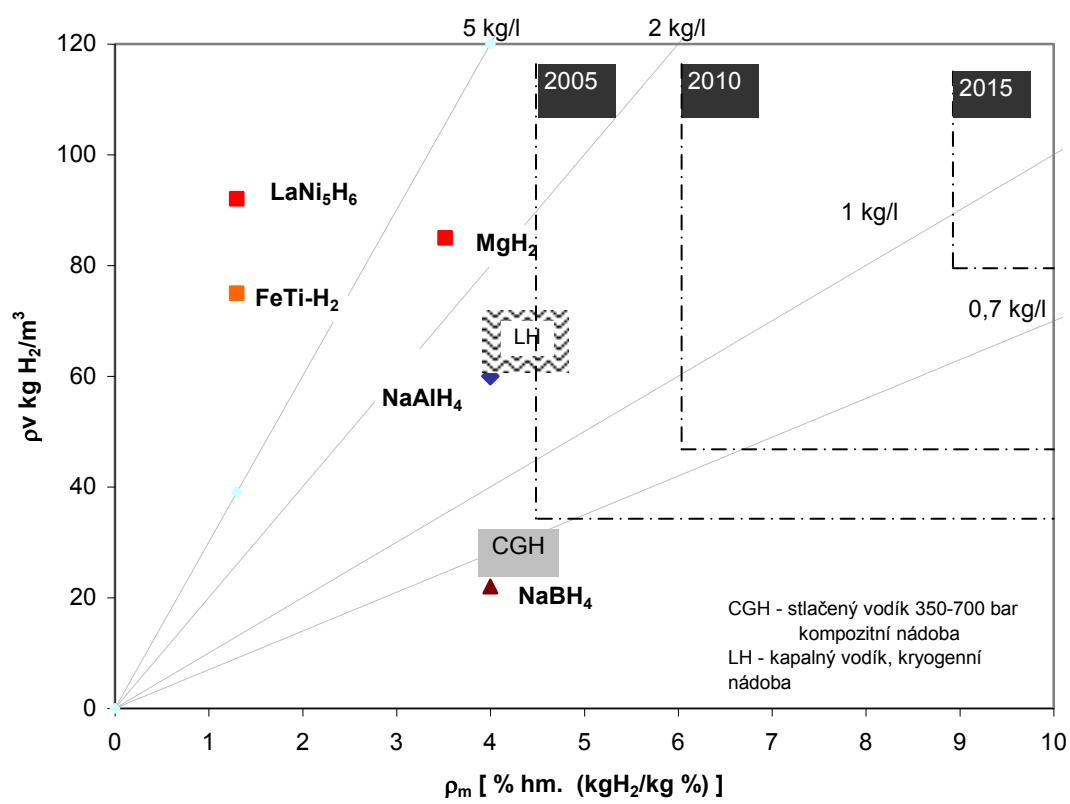
Různá paliva mají rozdílné hodnoty výhřevnosti. Pokud tedy porovnáváme systémy s různými palivy je vhodnější místo objemové kapacity sledovat parametr **hustota energie**, jednotkou je kWh/l popř. kJ/l.

Obecně uznávaným cílem jsou parametry systémů vyhlášených americkým ministerstvem dopravy U.S DOE (United States Department Of Energy), které jsou uvedeny v následující tabulce.

Parametr	2010	2015
Hmotnostní kapacita	2,0 kWh/kg	3,0 kWh/kg
	6 % hm.	9 % hm.
Hmotnost systému	99,6 kg	66,72 kg
Objemová kapacita	45 gH ₂ /l	81 gH ₂ /l
Objem systému	133,2 l	74,6 l
Cena uskladnění	4\$/kWh	2\$/kWh
Cena systému	800 \$	400 \$
Plnicí čas	1,5 kgH ₂ /min	2 kgH ₂ /min
Celkový čas plnění	4 min	2,5 min

tab. 9 Cíle DOE

Z údajů předchozí kapitoly je zřejmé, že stávající (konvenční) způsoby skladování vodíku jsou na spodní hranici cílů stanovených U.S DOE. Srovnání všech perspektivní včetně některých cílů U.S DOE shrnuje následující obrázek.



Graf 1: Srovnání skladovacích systémů

Objemová kapacita systému je u konvenčních způsobů skladování vodíku limitována především hustotou kapalného případně stlačeného vodíku, hmotnostní kapacita systému potom především hmotnostní skladovacích nádob. Konveční způsoby skladování vodíku jsou bezpečné a lety provozu ověřené systémy, jejich technologický potenciál je však téměř vyčerpán.

Alternativní způsoby skladování vodíků naopak disponují značným potenciálem a je velmi pravděpodobné, že se v blízké budoucnosti stanou dominantní a to především v mobilních aplikacích.

Pro uchovávání vodíku pro mobilní aplikace se jako nejperspektivnější jeví díky nízké hustotě a vysokému obsahu vodíku hydridy na bázi hořčíku. Díky nižší teplotě syčení i uvolňování lze očekávat vyšší využití hydridu Mg_2NiH_4 . Ukazuje se, že přidavkem katalyzátorů lze výrazně vylepšit chování této fáze při syčení i uvolňování vodíku.

Perspektivními technologiemi výroby a zpracování hydridů představují mechanické mletí (ball milling) nebo metody rychlého tuhnutí. Zvláště rychlé tuhnutí skrývá vysoký potenciál a chování slitin hořčíku vyrobených tímto postupem není z pohledu uchovávání vodíku příliš prozkoumané. První výsledky však ukazují slibné výsledky při použití těchto technologií. Z hlediska bezpečnosti i z důvodu nižší náročnosti na konstrukci zařízení je pro výrobu hydridů vhodná technologie elektrochemického syčení z vodných roztoků.

6.3 Palivové články

Palivový článek je elektrochemické zařízení, který souvisle přeměňuje chemickou energii paliva v energii elektrickou.

Palivové články tedy podobně jako baterie vytvářejí elektřinu elektrochemickou cestou a podobně jako spalovací motory souvisle zpracovávají přiváděné palivo. Na rozdíl od těchto zařízení však palivové články nepotřebují dobíjet, pracují tiše a s vysokou účinností, a pokud používají vodík jako palivo tak vytváří pouze elektřinu a vodu. Palivové články jsou konstrukčně jednoduché většinou bez pohyblivých částí, což vede k vyšší spolehlivosti a delší životnosti. Z termodynamického hlediska je velmi důležitým rozdílem to, že účinnost palivového článku není omezena Carnotovou účinností, jako je tomu u spalovacích motorů založených na tepelném cyklu.

Prvního praktického využití se palivové články dočkaly v začátcích dobývání vesmíru. Byly použity jako zdroje proudu a vody v programech Apollo a Gemini. Rozvoj technologií a materiálů v posledních letech rozšířil možnosti použití palivových článků, jež se jeví jako komerčně využitelné zejména v oblastech dopravy, stacionárních zdrojů elektřiny a tepla a v mobilních zařízeních.

V oblasti dopravy jsou palivové články jedním z nejslibnějších nástupců spalovacích motorů s ambicí podstatně snížit zplodiny z dopravy, nebo je alespoň odsunout z velkých měst.

Palivové články o výkonu v řádu stovek kW jsou v současné době používány jako kombinované systémy (combined heat and power, CHP) sloužící k produkci elektřiny a tepla v odlehlých oblastech nebo ve větších budovách, např. výrobních závodech, kancelářských komplexech, nemocnicích, hotelech, datových centrech.

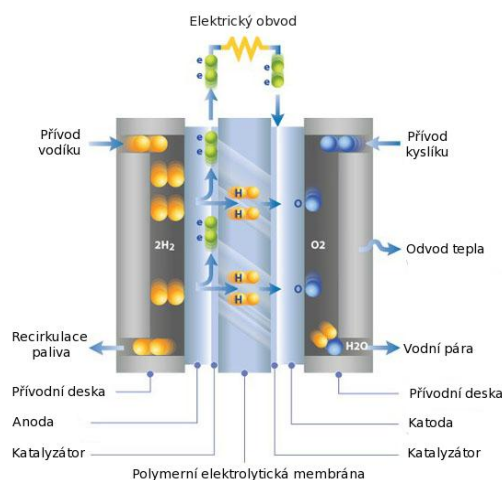
Existuje několik typů palivových článků, tabulka I. Liší se povahou použitého elektrolytu, provozní teplotou, a také způsoby využití.

	Nosič náboje	Provozní teplota	Použití
AFC Alkalický	OH^-	50 — 200 °C	Vesmírné technologie - Apollo, Shuttle
PEMFC Polymerní membrána	H^+	30 — 100 °C	Dopravní prostředky, mobilní aplikace, malé CHP systémy
DMFC Metanolvý	H^+	20 — 90 °C	Přenosná elektronika
PAFC Kyselina fosforečná	H^+	220 °C	CHP systémy o výkonu okolo 200 kW
MCFC Tavené uhličitany	CO_3^{2-}	650 °C	Velká CHP zařízení o výkonech nad 1 MW
SOFC Keramické oxidy	O^{2-}	500 – 1000 °C	Vhodné pro všechny velikosti CHP systémů

tab. 10 Typy palivových článků

6.3.1 Články s polymerní elektrolytickou membránou

Tento typ palivových článků je nejvhodnější pro použití vodíku jako paliva při aplikacích v dopravě a technologie je v současné době dostatečně pokročilá na to, aby mohla být komerčně využita. Hlavními překážkami je však cena spojená s nákladnými materiály, omezená dostupnost vodíku a problémy s jeho skladováním. Princip palivového článku je naznačen na následujícím obrázku.



Obr. 10: Schéma palivového článku

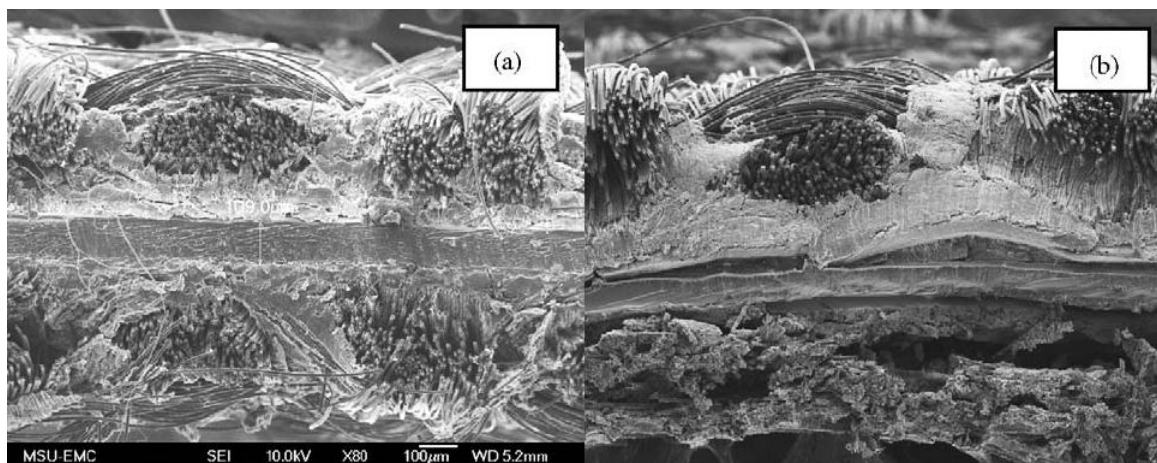
Základem palivového článku je iontovodivá polymerní membrána (proton exchange membrane - PEM) vložená mezi dvě elektrody. Rozhraní mezi elektrodou a membránou je obohaceno vrstvou katalyzátoru, který urychluje průběh chemických reakcí na elektrodách. Sestava membrány a elektrod bývá často výrobcí dodávána jako jeden celek a je označována jako MEA (membrane electrode assembly). MEA je vložena mezi desky s mikrokánálky (flow field plate, resp. bipolar plate), které k elektrodám přivádějí plynné palivo a od katody pak také odvádějí vzniklou vodu.

Vodík je přiváděn na anodu, kde na vrstvě katalyzátoru dochází k jeho disociaci na kladné ionty (protony) a elektrony. Protony procházejí skrze polymerní vrstvu, elektrony jsou nuceny procházet externím okruhem a mohou tedy konat užitečnou práci. Na katodě pak sloučením dvou kladně nabitých vodíkových iontů (protonů), dvou elektronů a atomu kyslíku vzniká voda (vzhledem k provozní teplotě palivového článku obvykle v podobě páry). Na stranu katody je přiváděn čistý kyslík nebo častěji kyslík jako součást vzduchu.

6.3.2 Životnost a spolehlivost součástí palivového článku

Ztráty při přeměnách energie v palivovém článku souvisí s materiálovými vlastnostmi jednotlivých součástí článku. V současné době se proto provádí rozsáhlý výzkum vlastností použitých materiálů membrán, katalyzátorů, elektrod. Cílem těchto prací je jednak prozkoumat používané materiály a jejich životnost v elektrochemicky agresivních podmínkách palivového článku, a také nalézt nové, alternativní materiály, které by byly vhodnější pro použití z hlediska odolnosti nebo ceny. Zejména se jedná o:

- Stárnutí membrány
- Degradace katalyzátoru
- Koroze uhlíku



Obr. 11: – Poškození membrány a elektrod palivového článku v důsledku teplot pod bodem mrazu. (a) Nepoužitá membrána s navazujícími katalytickými a difúzními vrstvami. (b) Membrána poškozená při teplotě -15 °C je takřka oddělena od katalytických vrstev.

6.3.3 Možnosti zvyšování životnosti

Životnost katalyzátoru na elektrodách palivového článku je dána vlastnostmi kovů používaných jako katalyzátory, nosných materiálů elektrod a jejich vzájemnými interakcemi. V současné době probíhá výzkum právě těchto oblastí s cílem dosáhnout lepších provozních vlastností:

- Uhlíkový podklad elektrod
- Slitiny platiny
- Nové typy ionomerů
- Iontovyměnná membrána
- Katalytická vrstva
- Difúzní vrstva
- Bipolární elektrody (desky)
- Sběrné elektrody
- Stahovací desky

6.3.4 Kritická místa

Ač se mnohé firmy chlubí svými modely na membránové palivové články, základní problematika stále zůstává nedořešena. Tou je „ideální“ iontovýměnná membrána a vhodný katalyzátor. Současné membrány většinou narážejí na problém nízké vodivosti za nižších teplot i při teplotách nad 100°C, nehledě na jejich současnou cenu. U potenciálního provozu za vyšších teplot následně vyvstává problematika vodní rovnováhy resp. celková bilance vody článku. Rovněž využití drahého katalyzátoru není optimální a často jsou firmy nuceny pro dosažení potřebných výkonů zvyšovat jeho koncentraci na elektrodách. Nelze rovněž opomenout oblasti přípravy MEA, konstrukce palivového článku a jeho dlouhodobý provoz.

Rovněž není vyřešena problematika případné recyklace použitých drahých platinových kovů z této katalytické vrstvy. Všechny uváděné skutečnosti více než jasně ukazují potřebnost systematického výzkumu vedeného k dořešení uváděného energetického zařízení.

6.3.5 Shrnutí

Palivové články představují perspektivní zdroj energie v mnoha oblastech lidské činnosti. Výhodou použití palivových článků je jejich vysoká účinnost přeměny energie, jednoduchá konstrukce bez pohyblivých částí, tichý provoz. Širšímu rozšíření ovšem stále brání vysoká cena a nedostatečná životnost některých součástí článku. Dalším zásadním problémem je distribuce paliva. Pro širší použití vodíku v dopravě bude třeba vybudovat nové vodíkové zdroje a rozvodnou infrastrukturu. Je tedy otázkou, zda mohou vodíkové pohony v budoucnu udržet krok s pohony elektrickými, pro které je již výrobní a distribuční soustava elektřiny k dispozici.

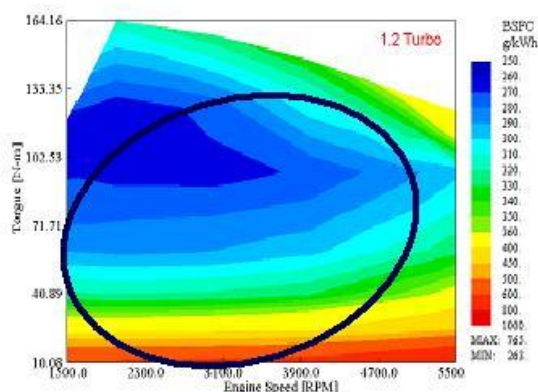
Pro zvýšení uplatnění membránových palivových článků ve všech výše uvedených aplikačních oblastech je třeba dosáhnout výraznějšího pokroku v následujících oblastech:

- Vývoj vysoce vodivých iontovýměnných polymerů s následujícími požadavky
 - Vysoká iontová vodivost v širokém rozsahu teplot dle aplikace až do cca 200 °C
 - Dostatečná tepelná odolnost a mechanická pevnost
 - Nepropustnost pro plyny, resp. další typy kapalných paliv
 - Dostatečná životnost dle použití (minimálně srovnatelná s alternativní technologií v daném oboru)
 - Nízká cena membrány
- Vývoj vysoce účinných katalyzátorů s následujícími požadavky
 - Minimalizace případně eliminace použití platiny a jiných drahých kovů
 - Výrazná odolnost vůči katalytickým jedům
 - Zaměření jak pro membránové palivové články využívající vodík, tak i jiné typy paliv jako např. methanol

6.4 Spalovací motory na vodík

Obecné vlastnosti spalovacích motorů jsou v jistém smyslu opačné než u palivových článků. Vysoké účinnosti se dosahuje až při větším zatížení, směrem k otáčkami stupňovanému výkonu účinnost opět klesá. Vysokých účinností se dosáhne při přeplňováním zvýšeném měrném výkonu. Takto vysoké účinnosti jsou však dosažitelné jen při vysokém kompresním poměru a rychlém hoření, charakteristickém pro vznětové motory.

Pro benzinový zážehový motor je dosažitelná účinnost nižší (obr.1), s použitím přeplňování lze však rozšířit relativně dobrou účinnost i do pásma nízkého zatížení, neboť pro daný výkon stačí menší motor („downsizing“). Přeplňování u zážehového motoru omezí i nepříznivý účinek škrcení směsi před motorem, které se používá z regulačních důvodů. Při použití hybridního uspořádání zde účinnost jednoznačně roste vlivem vytížení motoru při dobíjení akumulátoru a jeho následném vypnutí o dobítí („stop-and-go“ systém).



Obr. 12: Charakteristiky spalovacího motoru

Vodík hoří velmi rychle řetězovou rozvětvenou reakční kinetikou. Jeho plamen je v důsledku vysoké výhřevnosti stabilní i při velmi chudé směsi s dobrou účinností, kterou lze využít pro omezení emise oxidů dusíku.

Nevýhodou spalování vodíku je malá objemová výhřevnost směsi, daná nízkou hustotou vodíku. Zejména použití chudých směsí vyžaduje proto přeplňování a pokud možno vstřik vodíku do válce až během sání, nejlépe ke konci sacího zdvihu. Zdánlivě ještě výhodnější dodávka paliva během komprese působí podle pokusů na TU v Liberci zvýšení emise oxidů dusíku, dané podle modelu ČVUT nedostatečnou homogenitou směsi a jejím lokálním přehřátím.

Zápalnost vodíkovzdušných směsí je velmi dobrá z hlediska měrné spotřeby energie. To vede k nebezpečí zapálení směsi spaliny z vnitřní recirkulace v motoru, vedoucí k zášlehům plamene do sacího traktu, zvláště při použití nízkého kompresního poměru.

Na druhé straně obvykle rozšířená představa o nízké odolnosti vodíku proti klepání není úplně pravdivá s ohledem na výjimečně rychlý průběh hoření vodíku, který často vede k vyhoření veškeré směsi před jejím vznětem (klepáním). Dojde-li však ke vznětu, přechází klepání rychle ve velmi silnou detonaci. Míchání vodíku s dalšími pomalu hořícími palivy (jako je např. metan) má většinou kladný účinek na parametry motoru.

Dosavadní experimenty ve Výzkumném centru Josefa Božka i v zahraničí ukazují dosud nevyužitý potenciál pístových spalovacích motorů. Prozatím se podařilo použitím moderní technologie přímého vstřiku vodíku do válce odstranit úplně obávané zpětné zášlehy plamene do sacího potrubí. Ukázalo se, že i při provozu na vodík lze využít poměrně vysoký kompresní poměr, zejména v nízkém zatížení.

Vysoké zatížení pak vyžaduje adaptivní regulaci předstihu zážehu (optimální úhel zážehu je v blízkosti horní úvratě vzhledem k vysoké rychlosti hoření a regulaci efektivního kompresního poměru změnou časování ventilů (Miller nebo Atkinson), případně - v budoucnu - použití mechanismu pro změnu geometrického kompresního poměru. Tento mechanismus byl již na ČVUT studován s vesměs příznivými výsledky.

Možnost a problémy přeplňování vodíkových motorů (s ohledem na klepání a nízkou teplotu výfukových plynů chudé směsi) se tč. ověřují na TU v Liberci i na ČVUT v Praze. Spolu s HCCI v nízkém zatížení pomůže tento způsob odstranit pro zážehové motory typickou regulaci škrcením a tím zlepšit účinnost při nízkém zatížení. Pro práci turbíny bude zajímavý i vliv expanze velmi vlhkých spalin.

Pro budoucnost se jeví jako zajímavá tedy následující opatření, beroucí v úvahu cenovou úroveň danou konkurencí s podstatně dražšími palivovými články:

Všeobecné použití přeplňování pro snížení mechanických a tepelných ztrát motoru.

- Regulace tvorby směsi, plnicí účinnosti a přeplňování s využitím možnosti mechatronického "inteligentního" regulátoru, např. eliminujícího dopravní zpoždění, spojeného s prediktivně-adaptivní regulací předstihu zážehu, případně s řízením časování ventilů (nutné pravděpodobně pro použití HCCI).
- Homogenizace směsi, zejména pro pozdní vstřik (vefuk) paliva v kompresi, a to řízeným pohybem vzduchu ve válci (regulace příčného nebo tečného víru různým průtokovým součinitelem kanálů víceventilových hlav - pomocí individuálních klapek nebo zdvihu ventilů).
- Spalování tvořící se směsi po pozdním vysokotlakém optimálně regulovaném vefuku paliva (akumulační systém Common Rail). Zápal zážehem, difusní plamen bez nebezpečí detonace; případně lze použít několikanásobný vefuk paliva. Možno použít z hlediska účinnosti optimální velký kompresní poměr. Pravděpodobně bude pro tento způsob nutno ošetřit spaliny (zvýšená tvorba NO, na rozdíl od vznětových motorů žádné saze).

Ošetření spalin:

- Řízené chemické reaktory s využitím absorpce v pasivní (Pt, Rh, Pd) nebo chemicky aktivní vrstvě (Ba pro vazbu NOx) s periodicky proměnlivým režimem motoru (chudá/bohatá směs);
- přídavnou látkou (redukční činidlo, např. močovina pro selektivní katalytickou redukci SCR);
- masivní recirkulace chlazených výfukových plynů, nahrazujících nadbytečný kyslík ve směsi dusíkem nebo dusíkem s vodní parou.
- Konkurencí mohou být spalovací motory pro alternativní paliva biomass-to-liquid, BTL nebo směs zemního plynu a H₂ - hythane. V posledním případě je shora zmíněný výzkum použitelný i pro toto provedení.

6.4.1 Kombinace vodíkového spalovacího motoru a palivového článku

Nevýhodou palivového článku je pomalá reakce na požadavek vyššího zatížení a velká cena za instalovaný výkon, spojená s poklesem účinnosti při přetížení. Proto se vozidla s palivovými články od počátku navrhují jako hybridní, i když při trvalém zatížení a nutnosti stálého dobíjení akumulátorů (např. dálniční provoz) vede toto uspořádání ke snížení účinnosti jak vlivem samotného článku, tak vlivem nízké účinnosti cyklu nabíjení - vybíjení, a to i při použití superkapacitoru, vlivem frekvenčních měničů (účinnost <85%). Hybrid má dále větší hmotnost a účinnost rekuperace brzdění-akcelerace bývá < 70%.

Jinou cestou je zde proto kombinace palivového článku se spalovacím motorem. Toto uspořádání je výhodné i pro přechod od dnešní k vodíkové infrastruktuře zásobování palivy (viz dále). Palivový článek by měl být zatížen stále, v případě potřeby vyššího výkonu může velmi rychle pokrýt tento požadavek spalovací motor v režimu stop-and-go. Přechodové období přemostí superkapacitor, stále dobíjený palivovým článkem nebo motorem. Toto uspořádání se již simulovalo v National Argonne Laboratory, USA se slibnými výsledky.

6.5 Využití vodíku

6.5.1 Vodík jako chemická surovina

Vodík je základní chemickou surovinou, využívanou zejména v průmyslu chemickém, petrochemickém, potravinářském, metalurgickém a elektrotechnickém. Je typickou ukázkou látky, která se vyrobí a spotřebuje v rámci vlastního závodu. Pouze 3% z vyrobeného množství jde na trh.

Světová produkce vodíku není centrálně monitorována, je však odhadována na 500 milionů Nm³ ročně. Zhruba 65% vyrobeného vodíku je spotřebováno při syntéze NH₃, resp. výrobě hnojiv, 25% je produkováno v petrochemických závodech, kde se přímo spotřebuje při rafinaci a hydrogenaci ropy. Přibližně 7% se využije pro syntézu metanolu.

Vodík se dále využívá pro ztužování rostlinných tuků, při řezání kovů, nebo ve sklářském průmyslu pro vysokoteplotní procesy. V laboratořích se využívá např. jako nosný plyn v chromatografii.

6.5.2 Vodík jako energetický vektor

Využití vodíku jako nosiče energie je základním principem, stojícím za myšlenkou tzv. vodíkového hospodářství. Vodík vytvoří spolu s elektřinou vhodně se doplňující koncept udržitelné energetiky, zejména s ohledem na vyrovnávání zátěžového diagramu v elektrické přenosové síti.

Vodík se využívá ve třech základních oblastech – v dopravě, energetice a v mobilních (přenosných) aplikacích. Využití jeho energetického potenciálu je možné díky palivovým článkům nebo spalovacím zařízením, jako jsou spalovací motory či turbíny.

6.5.3 Využití vodíku v dopravě

Doprava je nejviditelnější a z hlediska běžného uživatele nejatraktivnější oblastí pro využití vodíku. Jsou zde nejlépe vidět okamžité přínosy – nahrazení ropných produktů (energetická bezpečnost) a nulové či výrazně nižší emise škodlivých látek.

V principu lze vodík použít ve všech oblastech dopravy, počínaje pozemní, přes lodní až po leteckou a kosmickou. Ačkoliv ve světovém měřítku je to právě kosmická „doprava“, která spotřebovává zdaleka nejvýznamnější množství vodíku a v současné době by bez něj prakticky nemohla existovat, v rámci ČR je tato oblast marginální. Podobná situace panuje u lodní přepravy, ačkoliv některé české subjekty se aktivně podílí na vývoji a provozu lodí, využívajících vodík či palivové články – projekt ZEMSHIP v Hamburku (ÚJV Řež), nebo Molten-carbonate fuel Cells for Waterborne Application (VŠCHT Praha).



Obr. 13: Vodíková loď ZEMSHIPS



Obr. 14: Vodíková ponorka U31

Ve světovém měřítku je nejvýznamnějším a nejvyspělejším počinem v oblasti námořní dopravy projekt německého námořnictva, které provozuje 4 ponorky s hybridním pohonem 1,7MW, který využívá palivový článěk a diesellový motor; vodík je skladován v hydridech. Ponorka je dle dostupných informací při provozu na palivové články bez vibrací, bezhlučná a současnými metodami jen velmi obtížně detekovatelná.

Letecká doprava je v České Republice zastoupena velmi silně, ačkoliv situace výrobců po roce 1989 byla z důvodu přerušení vazeb a na bývalý východní blok (a s ním související zakázky) složitá, dokázala si získat zpět významné postavení. Podrobnější informace je možno nalézt v materiálech České technologické platformy pro letectví a kosmonautiku.

Prvním letounem, využívající vodík byl stroj sovětské provenience – TU 155, odvozený od běžného typu TU 154. Byl úspěšně odzkoušen v roce 1985, nicméně jeho další výroba nebyla uskutečněna z důvodu nízkých cen ropy a tudíž politicko-ekonomická motivace nebyla dostatečná. V roce 2008 byl zalétnut experimentální Boeing s palivovými články ve španělském Occana.



Obr. 15: TU155 (1985)



Obr. 16: Experimentální jednomístné letadlo

V rámci českých vysokých škol bylo oznámeno několik zajímavých projektů (např. FSI VUT Brno) na vývoj jednomístných letounů na vodík. Je evidentní, že tato oblast skýtá významný potenciál. Pro další rozvoj bude velmi výhodné zapojit se i do větších evropských projektů.

Automobilová doprava představuje nejdůležitější oblast v rámci dopravy, už jen s ohledem na množství emisí a spotřebovaných pohonných hmot v celkovém měřítku. Tato oblast byla rozvíjena už od počátku, není bez zajímavosti, že první automobil se spalovacím motorem byl poháněn právě vodíkem a stanovil v roce 1813 u Ženevského jezera světový rychlostní rekord 2mph.

Zásadním současným problémem je velmi nedostatečná infrastruktura, tedy absence vodíkových čerpacích stanic, vysoká cena vodíkových vozidel a v některých státech i legislativní a administrativní překážky. Situaci lze přirovnat k době počátku vozidel se spalovacím motorem, kdy benzín byl k dostání pouze v lékárnách. Stav se však postupně zlepšuje a s potěšením lze konstatovat, že to platí i pro ČR, kde byla v roce 2009 otevřena první vodíková čerpací stanice.



Obr. 17: Čerpací stanice vodíku

Vodíková vozidla mají oproti svému hlavnímu konkurentovi, elektrovozům, zásadní výhody v podobě velkého dojezdu (600-700km) a krátkou dobu tankování, která je stejná jako u klasických paliv, přičemž nabíjení akumulátorů trvá řádově hodiny. Automobilky mají různé přístupy k budoucnosti osobní dopravy, nicméně většina největších (Daimler, GM, Toyota, Nissan, Ford...) se shodují na strategii využití elektrických vozidel pro města a vodíkových pro delší trasy. Jsou proto vyvíjeny oba směry a je důležité si uvědomit, že kombinace obou způsobů ve formě hybridního pohonu přináší významné výhody. Je to například možnost rekuperace energie (pro vodíkové vozy) a prodloužení dojezdu s využitím tzv. range-extenderu v podobě palivového článku (pro elektrovozy). Je velmi pravděpodobné, že se oba směry v budoucnu prolnou .

V roce 2009 byla oznámena sériová výroba dvou typů vodíkových vozidel s palivovými články – Mercedes F-cell a Honda Clarity. Oba vozy budou zpočátku poskytovány vládními institucím

v Japonsku, USA a EU s cílem rozšířit povědomí o možnostech a výhodách vodíku a tím akcelarovat rozvoj příslušné infrastruktury.



Obr. 18: Honda Clarity



Obr. 19: Mercedes F-Cell

Důležitým prvkem jsou demonstrační projekty, jejichž úkolem je zviditelnit vodík a příslušné technologie široké veřejnosti. Jeden z nejúspěšnějších demonstračních projektů vůbec byl projekt CUTE a následný HyFleet:CUTE, v jehož rámci bylo provozováno 30 a 48 vodíkových autobusů v 10ti evropských městech (Londýn, Amsterdam, Hamburk...) a následně se rozšířil i do Číny (Peking), Island a do Austrálie (Perth). V rámci projektu bylo přepraveno přes 6mil pasažérů, najeto přes 3mil km a byla tak prokázána technologická připravenost na široké využití.

V České Republice byl představen unikátní trojitě hybridní vodíkový autobus TriHyBus, který s využitím zmíněné H₂ čerpací stanic bude provozován v Neratovicích. Unikátnost spočívá v kombinaci tří zdrojů energie – palivového článku, Li-ion akumulátorů a ultrakapacitorů. Tato kombinace zvyšuje účinnost pohonu, která je vyjádřena spotřebou vodíku 8-9kg H₂ / 100km, což je nejnižší hodnota ze zveřejněných srovnatelných vozů vůbec.



Obr. 20: TriHyBus

Programy EU počítají s velkým objemem finančních prostředků právě pro demonstrační projekty pro příštích pět let a je proto nutné věnovat této oblasti zvýšenou pozornost.

6.5.4 Využití vodíku v energetice

Využití vodíku v energetice lze rozdělit do dvou základních skupin – akumulátory energie a záložní či nepřerušitelné zdroje napájení. Pro velkou energetiku je nejzajímavější vodík v podobě akumulátoru energie, kdy může sloužit podobně jako přečerpávací elektrárny. V období mimošpičkového odběru je z přebytku elektřiny vyráběn vodík (elektrolýzou vody) a při velké poptávce po elektřině (období špičkového odběru) je vodík přeměněn zpět na elektřinu. Tím se vyrovnává diagram spotřeby a výrazně se tak usnadňuje regulace sítě. To je obzvláště významné s nárůstem instalované kapacity alternativních energetických zdrojů, které jsou charakteristické nepředvídatelností dodávek elektřiny a hrozí tak výpadky v dodávkách elektřiny při přetížení. Vodíkové technologie lze zkombinovat např. se solární elektrárnou tak, aby jako celek poskytovala vyrovnané dodávky energie.

Nepřerušitelné a záložní zdroje energie se využívají v těch provozech, kde jsou výpadky napájení nepřijatelné. Jedná se zejména o banky, letiště, nemocnice apod. Zde se využívají palivové články o relativně větších výkonech, cca stovky kW, které často poskytují kromě elektřiny i teplo, pracují tedy v kogeneračním režimu. Zajímavou aplikací o menších instalovaných výkonech jsou zálohy BTS, tedy vysílačů mobilních operátorů.



Obr. 21: PAFC, First national bank Omaha (USA)



Obr. 22: MCFC v továrně Michelin

Česká Republika potřebuje, s ohledem na svou polohu v centru Evropy, přes kterou vedou důležité energetické sítě, kvalitní regulaci a nemůže si dovolit výrazné výpadky. Situace s připojováním solárních zdrojů ukázala, že kapacita a možnosti přenosové soustavy jsou omezené a neuvážené legislativní pobídky velmi rychle narazí na technologické limity. Vodík představuje možnost pro snížení nutnosti regulace soustavy, přičemž další vývoj a výzkum v této oblasti je nezbytný. Jedná se o vývoj softwaru a modelování konkrétních technologických celků (velikosti elektrolyzátoru, zásobníku vodíku a palivového článku)ve vztahu k instalovanému výkonu zdroje. Instalace zařízení a demonstrační projekty jsou důležité pro získání zkušeností s reálným provozem. Tyto realizace je potřeba řešit v rozpětí instalovaných výkonů od malých jednotek (jednotky kW až po finální desítky MW).

6.5.5 Využití vodíku pro drobné mobilní aplikace

Zajímavou oblastí využití palivových článků jsou přenosná zařízení, jako je notebook, mobilní telefon či videokamery. Zde se dá očekávat větší využití metanolu místo vodíku, s ohledem na vyšší hustotu energie kapalných látek. Velká pozornost je nyní věnována možnosti využití ethanolu, který je dostupnější a bezpečnější než methanol.



Obr. 24: Prototypy notebooku s palivovým článkem LG, komerčně dostupný palivový článek pro TV kamery spol. Jadoo (2,5-3x provozní doba oproti klasickým akku)



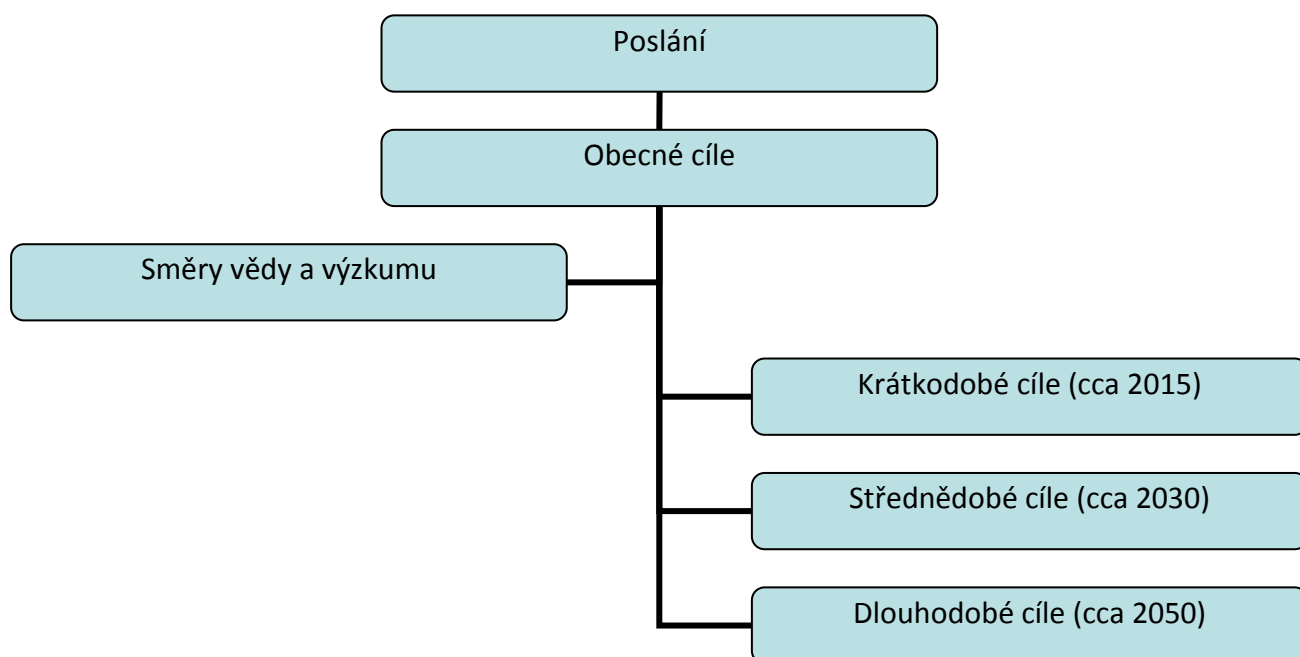
Obr. 23: Mobilní telefony Hitachi na methanol a jejich plnění

Společnost Toshiba například navrhla systém prodeje jakýchsi standardizovaných patron, které by se prodávaly v obchodech vedle baterií. Hlavní výhodou zařízení s palivovými články je delší doba provozu, u současných prototypů cca 2x až 3x vyšší než při provozu na akumulátory. Palivové články již delší dobu úspěšně využívají v sektoru přenosných zdrojů energie, např. pro vojenské využití v terénu či pro kemping.

Miniaturní palivové články jsou principiálně jednoduchá, nicméně technicky náročná zařízení, s jejichž vývojem a výrobou nejsou v ČR velké zkušenosti. Vývoj případného komerčního zařízení by tak musel být zahájen prakticky od počátku s relativně vysokými náklady. Trh na druhé straně je poměrně velký a s ohledem na předpokládané využití metanolu s menšími problémy s distribucí paliva.

7 Strategické směry a cíle pro rozvoj využívání vodíku jako energetického nosiče

Tato Strategická výzkumná agenda navazuje a rozpracovává na základní dokumenty, vytvořené nejprve evropskou vodíkovou technologickou platformou, poté Joint Undertaking. Přizpůsobuje obecně platné požadavky podmínkám v České republice, přičemž využívá specifické výhody, vycházející většinou z historického vývoje vědy a průmyslu v ČR. Naopak ty směry, které z nejrůznějších důvodů nejsou vhodné pro podmínky ČR, neakcentuje. To samozřejmě nemusí znamenat, že není možné prorazit v příslušném směru, nicméně vynaložené zdroje by byly zřejmě výrazně vyšší než v případech zde uvedených oblastech.



7.1 Poslání – základní směřování a principy v oblasti H₂ technologií

Česká vodíková technologická platforma, potažmo vodíkový průmysl v ČR má následující poslání:

1. Posláním Platformy je podpora vývoje vodíkových technologií a zavádění vodíkového hospodářství v ČR.
2. Platforma přispívá ke koordinaci aktivit subjektů vývoje vodíkových technologií a vodíkového hospodářství mezi sebou a v návaznosti na programy a finanční zdroje domácí i zahraniční.
3. Platforma definuje, reprezentuje, podporuje, hájí a prosazuje oprávněné a společné zájmy svých členů s cílem vytváření vhodného prostředí pro rozvoj vodíkového hospodářství.

K naplnění tohoto poslání byly stanoveny následující obecné cíle:

1. Platforma usiluje o zapojení svých členů do European Hydrogen and Fuel Cell Technology Platform a dalších klíčových evropských a světových organizací zabývajících se vodíkem.
2. Platforma systematicky mapuje rozvoj v oblasti vodíkových technologií a vodíkového hospodářství v EU, USA a dalších ekonomicky vyspělých zemích.
3. Platforma sleduje a vyhodnocuje aktivity v oblasti rozvoje vodíkových technologií a vodíkového hospodářství v ČR.
4. Platforma systematicky sleduje možnosti získání prostředků v ČR, EU i jinde ve světě využitelných pro financování rozvoje českých vodíkových technologií a vodíkového hospodářství.
5. Platforma zajišťuje vzájemnou informovanost subjektů působících v ČR v oblasti rozvoje vodíkových technologií a vodíkového hospodářství provozováním webových stránek a organizací tematických seminářů a konferencí.
6. Platforma poskytuje expertízy pro orgány a agentury státní správy a samosprávy v oblastech souvisejících s rozvojem vodíkového hospodářství.
7. Platforma zpracovává projekty z oblasti rozvoje vodíkových technologií a vodíkového hospodářství v ČR a žádosti o jejich financování a poskytuje poradenský servis pro jejich realizátory.
8. Platforma je partnerem dalších institucí obdobného typu v zahraničí, zejména v EU, vůči nim prezentuje a reprezentuje vývoj vodíkových technologií a vodíkové hospodářství v ČR.
9. Platforma propaguje vhodnou formou aktivity související s rozvojem českých vodíkových technologií a vodíkového hospodářství v zahraničí.

7.1.1 Konkrétní krátkodobé cíle HYTEP (do 2015):

1. Zajistit legislativně neomezené využívání vodíku jako energetického vektoru (zákony, prováděcí předpisy, normy)
2. Zajištění dostatečného počtu pracovníků pro budoucí vodíkové hospodářství, zejména absolventů VŠ v počtu alespoň 5 ročně (příprava studijního programu, spolupráce se SŠ).
3. Zajistit ukotvení využívání vodíku v Státní energetické koncepci (spolupráce s orgány státní správy)
4. Účast členů HYTEP v nejméně ve dvou velkých evropských H₂/FC projektech VaV (FCH JU, SF EU...)
5. Účast členů HYTEP v alespoň třech národních H₂/FC programech VaV (MPO, MŠMT...)
6. Zahájit provoz minimálně jednoho dalšího vodíkového vozidla vyvinutého v ČR

7.1.2 Konkrétní střednědobé cíle HYTEP (do 2030):

1. Zajistit alespoň základní znalosti o možnostech H₂ technologiích u všech studentů technických VŠ.
2. Podíl nově vyrobených vozidel s vodíkovým pohonem alespoň 1-2% (provozovaných v ČR)
3. Vodíkové čerpací stanice dostupné v každém kraji ČR
4. Komerčně dostupné vodíkové technologie pro střední energetické zdroje (stovky kW až jednotky MW)

7.1.3 Dlouhodobé cíle HYTEP (do 2050)

1. Vodíkové čerpací stanice v ČR dostupné na 50% průměrné dojezdové vzdálenosti na 70% plochy ČR (stovky ks)
2. Podíl nově vyrobených vozidel s vodíkovým pohonem alespoň 10-15% (provozovaných v ČR)
3. Alternativní zdroje běžně vybaveny vodíkovými technologiemi pro akumulaci energie
4. ČR mezi 5ti nejpokročilejšími státy v EU ve vývoji H₂ technologií

7.2 Prioritní oblasti výzkumu a vývoje

Nezbytným předpokladem pro naplnění cílů je intenzivní zaměření na vědu a výzkum. Již dnes je možné využívat zdroje jak národní, které budou od roku 2011 alokovány pod střešou Technologické agentury, tak evropské, zastřešené zejména FCH JU.

Prioritní směry vědy a výzkumu, podrobně popsanych v příslušných kapitolách, jejichž rozvoj je důležitým předpokladem naplnění cílů jsou:

- **Výroba vodíku**

- Elektrolýza vody
 - Membránové procesy nízko a středně teplotní
 - Vysokoteplotní (parní) elektrolýza
- Reforming zemního plynu
 - Metody čištění vodíku (PSA...)
 - Účinnost procesu (spotřeba CH₄)
- Vysokoteplotní termochemické cykly
 - Vysokoteplotní materiály
 - Přenos tepla netradičními médii (He, Pb..)

- **Skladování vodíku a infrastruktura**

- Hydridy (fyzikální – kovové)
- Plynné (kompozitní nádoby)
- Transport vodíku potrubím (materiály..)

- **Využití vodíku**

- Palivové články
 - Membránové (vysokoteplotní membrány, elektrody, stabilita)
 - Alkalické (necitlivost na vzdušné CO₂)
 - Systémy (BoP)
 - Provozní zkoušky dynamických vlastností vozidel s vodíkovým pohonem
- Spalovací motory
 - Klasické
 - Lineární

8 Závěr

Strategická výzkumná agenda je základním dokumentem, který určuje směry vývoje vodíkových technologií v ČR. Vychází ze současného stavu poznání a s přihlédnutím na výrazný vliv EU v dané oblasti predikuje a stanovuje cíle v krátkodobém, střednědobém a dlouhodobém horizontu. Tyto informace pomohou při rozhodovacích procesech jak členům HYTEP, tak i vládním institucím při podpoře vodíkového hospodářství.

Využití vodíku jako energetického nosiče přináší zejména snížení závislosti na dodávkách fosilních paliv a zlepšuje kvalitu životního prostředí. Je potřeba si uvědomit, že využívání vodíku v ČR pro energetické účely je zcela na počátku a je nutno vyřešit legislativní otázky pro neomezené využití H₂. Zásadní oblastí je výroba vodíku, který potřebuje primární energii pro svou výrobu. Strategicko – ekonomické a ekologické parametry její produkce jsou v celkové úvaze nejdůležitější proměnnou.

SVA nemá právně závazný charakter, nicméně poskytuje doporučení, které hlavní směry, oblasti a priority jsou určující pro další úspěšný vývoj v dané oblasti.

9 Literatura

1. Němec, T., Maršík, F., Termodynamická analýza palivových článků s polymerní elektrolytickou membránou, Ústav termomechaniky AV ČR, v.v.i., Praha 2009
2. Matal, O. Et. Al, Možnosti generace vodíku s využitím jaderných reaktorů, Energovýzkum, spol. S r.o., Brno 2009
3. Křivčík, J., Membránové palivové články, MemBrain s.r.o., Stráž pod Ralskem 2009
4. Škoda výzkum a.s., Metody pro provozní pevnostní zkoušky vozidla s vodíkovým pohonem, Plzeň 2009
5. Scholz, C., Vývoj spalovacích motorů na vodík, Technická univerzita v Liberci, Liberec 2009
6. Bilík, J., Získávání vodíku z koksárenského plynu“ a „Využití vodíku v metalurgii, Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Ostrava 2009
7. Novák, P., Uchovávání vodíku v hydridech kovů, Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha 2009
8. Janík L, Dlouhý P., Konvenční způsoby skladování vodíku, Ústav jaderného výzkumu Řež a.s., Řež 2006
9. Janík L, Dlouhý P., Alternativní způsoby skladování vodíku, Ústav jaderného výzkumu Řež a.s., Řež 2006
10. Janík L, Somolová M., Termochemické cykly pro výrobu vodíku pomocí jaderné energie, Ústav jaderného výzkumu Řež a.s., Řež 2006