



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

VODÍK JAKO PALIVO PRO SPALOVACÍ MOTORY

HYDROGEN FUEL FOR INTERNAL COMBUSTION ENGINES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

VÁCLAV POLNICKÝ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. VÁCLAV PÍŠTĚK, DrSc.

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Václav Polnický

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Vodík jako palivo pro spalovací motory

v anglickém jazyce:

Hydrogen fuel for internal combustion engines

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Rozbor možností aplikace vodíku jako paliva pro spalovací motory.

Cíle bakalářské práce:

Zhodnotit vlastnosti vodíku jako paliva pro spalovací motory.

Analyzovat možné způsoby tvorby směsi u motorů s vodíkovým palivem.

Posoudit perspektivy vodíkových spalovacích motorů.

Seznam odborné literatury:

- Macek, J., Suk, B.: Spalovací motory I, Vydavatelství ČVUT 2000, ISBN 80-01-02085-1
Heisler, H.: Advanced engine technology, SAE 2002
STONE, Richard: Introduction to Internal Combustion Engines. 3rd edition. Hampshire : Palgrave, 1999. 641 s. ISBN 0-333-74013-0.

Vedoucí bakalářské práce: prof. Ing. Václav Pištěk, DrSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/2010.

V Brně, dne 27.11.2009

L.S.

prof. Ing. Václav Pištěk, DrSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

Anotace

V bakalářské práci byly shrnuty dosavadní výsledky celosvětového výzkumu z oblasti spalování vodíku v motorech s vnitřním spalováním. Jsou zde zmíněny také způsoby výroby a skladování vodíku. Práce je zaměřena zejména na problematiku tvorby směsi a její zapálení. Byly zde také představeny prototypy i vozy sériové produkce různých výrobců.

Klíčová slova: vodík, spalovací motor, nepřímý vstřík, přímý vstřík, kryogenní nepřímý vstřík, výšlekové zapalování

Annotation

Knowledge of all over the world research, dealing with hydrogen combustion engines, were summarized in this bachelor thesis. Ways of hydrogen production and its storing are mentioned too. This paper is focused especially to hydrogen-air mixture formation and its ignition solving. Some samples of hydrogen cars –both of prototypes and serial products- were introduced too.

Key words: hydrogen, internal combustion engine, port injection, direct injection, cryogenic- port injection, jet ignition

Bibliografická citace

POLNICKÝ, V. *Vodík jako palivo pro spalovací motory*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 46 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Václav Píšťek, DrSc.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího bakalářské práce, pana prof. Ing. Václava Píšťka, DrSc. a s použitím uvedených zdrojů.

V Brně, dne 18. května 2010

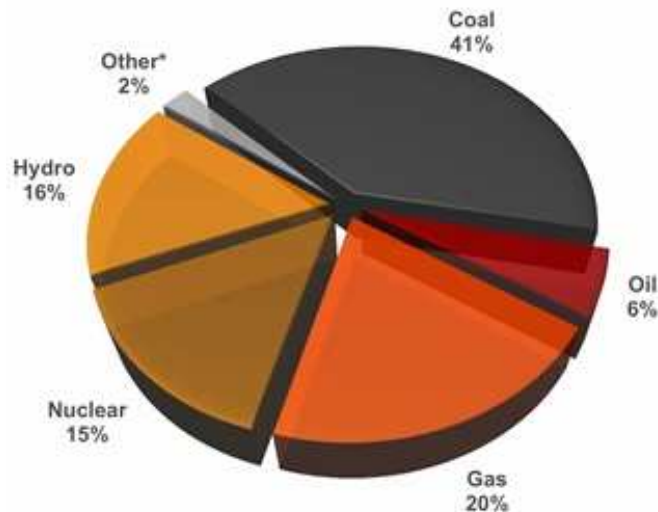
Václav Polnický

Obsah

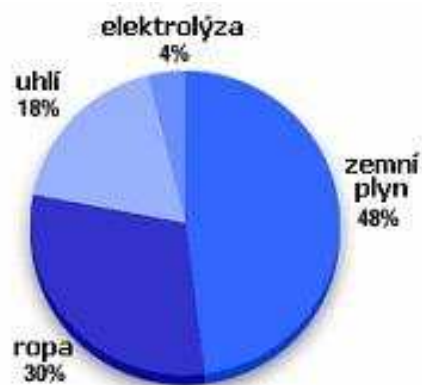
Úvod	11
1.1 Obecné vlastnosti H ₂	12
1.2 Důležité vlastnosti H ₂ pro spalování	13
2.1 Výroba H ₂	17
2.2 Skladování H ₂	19
3 Palivový článek	23
3.1 Palivový článek vs. motor spalující vodík	23
4 Možnosti tvorby směsi	24
4.1 Současnost	
Nepřímý vstřík	25
4.2 Vývoj	
Nepřímý vstřík CRYO	25
Přímé vstříkávání	26
5 Zapalování směsi	
5.1 Zapalovací svíčky	27
5.2 Výšlekové zapalování	29
5.3 Dual fuel	31
6 Vozy s vodíkovým pohonem	
6.1 BMW	32
750hL/760hL	32
H2R	34
6.2 Mazda	35
RX8 Hydrogen RE	35
Premacy Hydrogen hybrid	36
6.3 Ford	
P2000 H2ICE+FCV	37
U koncept	37
Fusion Hydrogen 999	38
7 Závěr	39
Seznam použitých zdrojů	40
Seznam použitých zkratk a symbolů	43
Seznam příloh	44
Přílohy	45

Úvod

V dnešní době, kdy zvětšující se spotřeba ropy dříve či později nevyhnutelně povede k vyčerpání relativně dostupných zdrojů, se mnoho institucí a výzkumných týmů snaží nalézt odpověď na otázku: Čím nahradit ropu až dojde, nebo se její cena vyšplhá na již neúnosnou mez. V dopravním odvětví jsou prakticky pouze dvě možnosti (pokud zanedbáme návrat k parním strojům spalujících uhlí): Buď je zdrojem energie elektřina nebo vodík. Obě varianty však mají společný problém: vyrábí se převážně z fosilních paliv (viz obr. 1,2).



Obrázek 1: Rozdělení celosvětové výroby elektřiny podle vstupních surovin (r. 2006) [1]



Obrázek 2: Celosvětová produkce vodíku podle vstupních surovin [2]

V této práci budou okrajově zmíněny způsoby výroby vodíku, možnosti jeho skladování a vlastnosti důležité pro jeho spalování. Největší důraz je však kladen na různé možnosti tvorby směsi a způsoby její zapálení s ohledem na co nejmenší emise a největší účinnost. Závěrem je představeno pár automobilů s vodíkovým pohonem.

1.1 Obecné vlastnosti vodíku

Teplota samovznícení:	580 °C	(benzin: 280°C, nafta 210°C, metan 580°C)
Energie zážehu:	20.10 ⁻⁶ J	(metan asi 300 J)
Teplota plamene:	2400 K	(benzin 1300K, metan 1800 K)
Rychlost plamene:	2,75 m/s	(metan 0,37 m/s; benzin, nafta 0,34m/s)
Teplota varu	-252,8 °C	(O ₂ -182.9 °C)

Výhřevnost vodíku v porovnání s ostatními palivy je v tab. 1

Tabulka 1: Výhřevnost různých paliv [3]

Druh paliva	Výhřevnost [MJ/kg]	Výhřevnost [MJ/m ³]
Kapalná paliva		
Petrolej	43,97	
Nafta motorová	42,6	
Těžký topný olej (TTO)	40,3	
Lehký topný olej (LTO)	41,45	
Benzín (střední frakce)	42,7	
Etanol	26,8	
Metanol	19,8	
Bionafta	37,3	
Plynná paliva		
Zemní plyn		34,05
Propan	43,5	
Butan	50	
Propan-butan		46,1
Svítiplyn		14,5
Bioplyn - 100 % CH ₄		35,8
Vodík	119	

Kyslíko - vodíkový plamen je nesvítivý a za denního světla neviditelný. Při expanzi se ,na rozdíl od většiny ostatních plynů, teplota vodíku zvyšuje a může dojít k samovznícení.

1.2 Důležité vlastnosti pro spalování

- Široký rozsah vznětlivosti
- Nízká energie vzplanutí
- Vysoká teplota samovznícení
- Různá rychlost hoření při rozdílně bohaté směsi
- Nízká hustota
- Vysoká difuzivita

Široký rozsah vznětlivosti

V porovnání s ostatními palivy má vodík širokou škálu koncentrace, při které může hořet (vybuchnout). Z hlediska bezpečnosti se jedná o nepříznivý aspekt, ale při použití jako palivo je to výhoda. Při spalování chudých směsí se dosahuje nižších teplot, tlaků a emisí NO_x .

Nízká energie vzplanutí

Výhoda:

Pro zapálení vodíku potřebujeme ve srovnání se zapálením benzínové směsi o mnoho nižší energii, což teoreticky snižuje nároky na zapalovací soustavu. V reálu s však používá běžná zapalovací soustava, eventuelně vylepšená plazmovými zapalovacími svíčkami. Plazmový výboj mezi kontakty svíčky dodá větší energii než jiskra, tudíž jsou vhodnější pro zapálení nehomogenních velmi chudých směsí.

Nevýhoda:

Stejně jako jiskra či plazmový oblouk svíčky může působit nějaké horké místo ve spalovacím prostoru. Může dojít k zpětnému a detonačnímu hoření, které má nepříznivý vliv na výkon, spotřebu, hluk a životnost agregátu.

Vysoká teplota samovznícení

Při kompresi plynu dochází k jeho zahřívání (teoreticky) podle adiabaty v p-V diagramu. Změna teploty se dá také vyjádřit rovnicí 1
Čím větší teploty se dá dosáhnout aniž by došlo k samovznícení či klepání, tím větší kompresní poměr lze použít. Teoretická termodynamická účinnost motoru konající Ottův cyklus je vyjádřena rovnicí 2, z níž plyne že větší kompresní poměr znamená větší účinnost. Závislost termodynamické a mechanické účinnosti na kompresním poměru je na obrázku 3.

$$T_2 = \left(\frac{V_c}{V_k} \right)^{\kappa-1} \cdot T_1$$

Rovnice 1:

kde: T_1 = počáteční teplota [K]

T_2 = koncová teplota [K]

V_c = počáteční objem (celkový objem)

V_k = koncový objem (kompresní objem)

Rovnice 2:

$$\eta_t = 1 - \left(\frac{1}{\varepsilon} \right)^{\kappa-1}$$

kde: κ je poissonova konstanta: Pro jednoatomové plyny $\kappa = 1,67$

dvouatomové plyny $\kappa = 1,4$

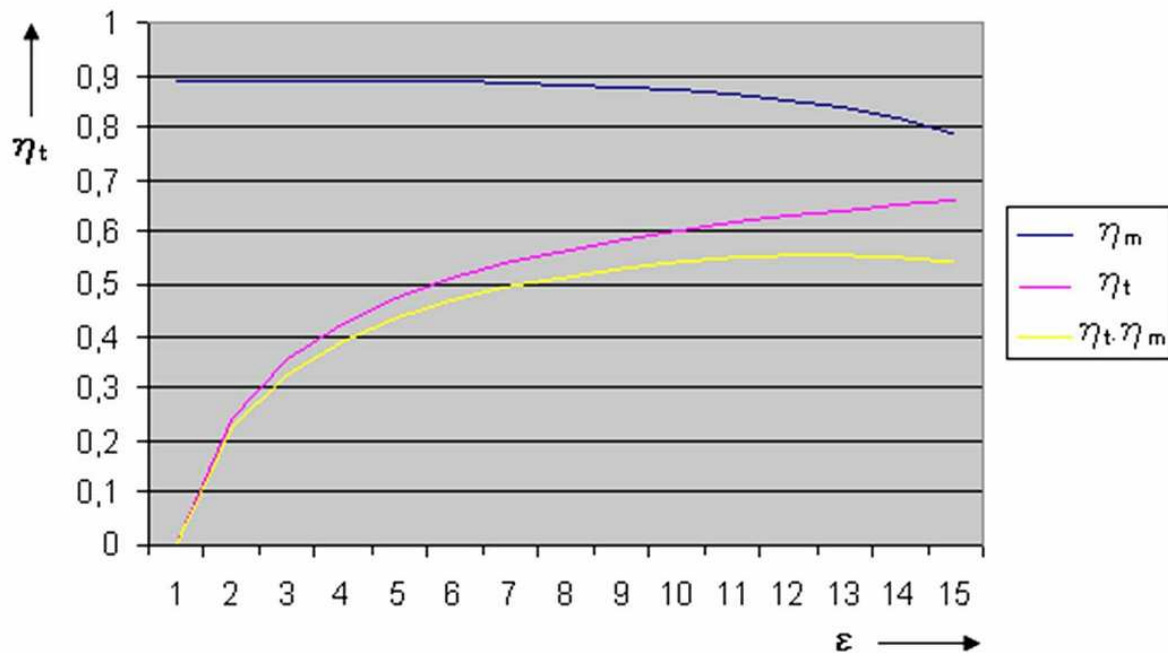
víceatomové plyny $\kappa = 1,33$

ε je kompresní poměr

$$\varepsilon = \frac{V_k}{V_c}$$

V_k = kompresní objem

V_c = celkový objem



Obrázek 3: závislosti účinnosti na kompresním poměru [4]:

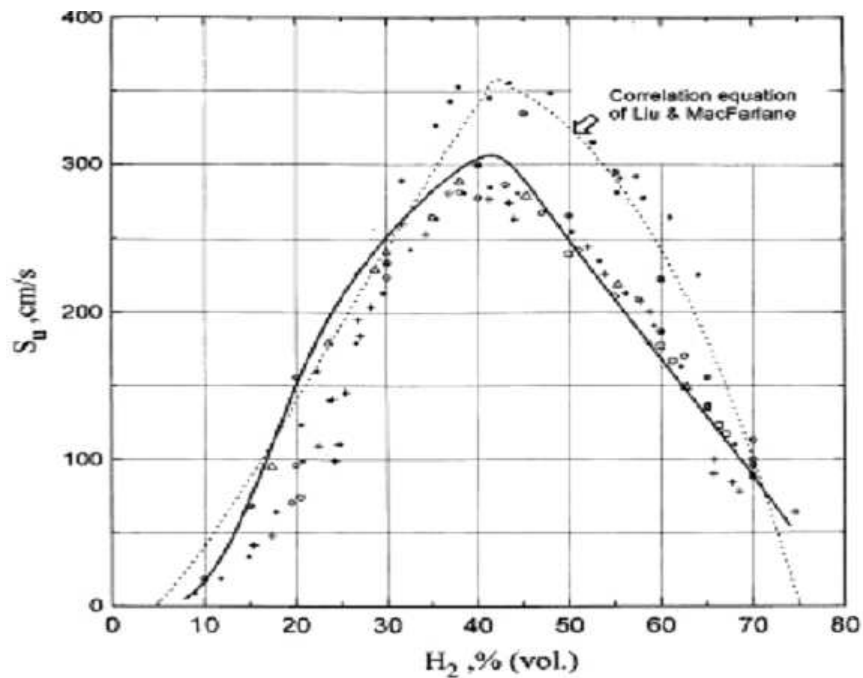
Účinnost výrazněji roste do kompresního poměru okolo hodnoty 12, poté termodynamická účinnost sice ještě stoupá, ale mechanická účinnost klesá. Vysoký kompresní poměr (okolo 23:1) měli v minulosti předkomůrkové dieslové motory. V současné době je globální tendencí snižovat kompresní poměr (TDI PD 17:1, dci Renault 15:1).

U benzínových motorů je kompresní poměr omezen protidetonačními vlastnostmi benzínu.

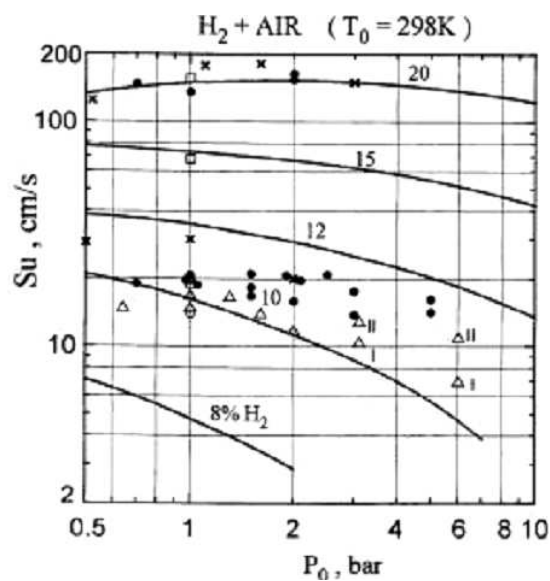
Úpravou benzínového motoru a spalováním jiného paliva (LPG, E85, metanol) lze dosáhnout vyššího kompresního poměru nebo vyššího stupně přeplňování, tudíž i vyšší účinnosti.

Různá rychlost hoření

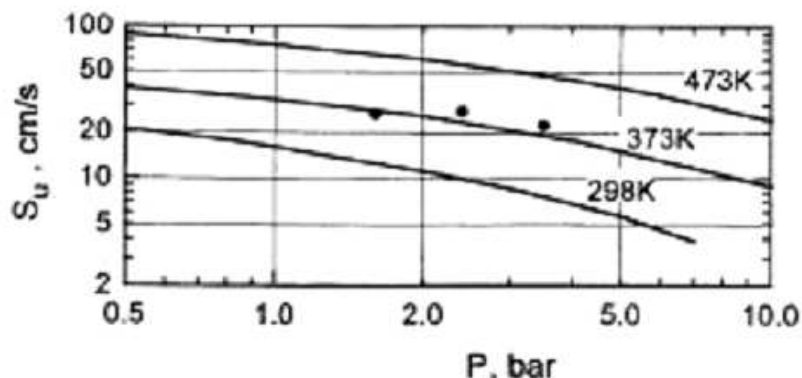
Při stechiometrickém poměru je rychlost hoření směsi skoro 10x rychlejší nežli hoření směsi s benzínem. V reálu se však spalování vodíku s tímto poměrem nevyskytuje zejména kvůli emisím. Názorná ukázka změny rychlosti v závislosti na koncentraci vodíku je na obr. 4 (při pokojové teplotě a tlaku). Na obrázku 5 je znázorněna rychlost hoření v závislosti na koncentraci vodíku a počátečním tlaku, na obrázku 6 je znázorněna rychlost hoření v závislosti na počáteční teplotě a tlaku. (obrázky 4, 5 a 6 platí pro laminární hoření)



Obrázek 4: Rychlosti hoření směsi vodíku se vzduchem v závislosti na koncentraci vodíku při pokojové teplotě a tlaku [30]



Obrázek 5: Závislost rychlosti hoření chudé směsi vodíku na počátečním tlaku a poměru vodíku ve směsi pro 8%, 10%, 12%, 15%, 20% [30]



Obrázek 6: závislost rychlosti hoření 10% vodíkové směsi na počátečním tlaku a počáteční teplotě. [30]

Nízká hustota

Protože má vodík malou hustotu a do válce se musí dostat požadovaný poměr hmotnosti hořlaviny a oksyličovadla (vzduchu), zabere vodík ve válci velký prostor. Benzín při nasávání směsi zabírá asi 2% celého objemu válce, zatímco vodík zabírá při stechiometrickém poměru (34,2:1) cca 29% objemu. Tudiž oproti benzinovému motoru je přes 25% zdvihového objemu „nevyužito“, což logicky vyúsťuje v nižší výkon vodíkového motoru. Tento nepříznivý vliv je možno eliminovat různými způsoby tvorby směsi. To bude vysvětleno později.

Vysoká difuzivita

Vodík má velkou schopnost difuzivity.

Výhodou je snadné smíchání s nasávaným vzduchem. Naproti tomu benzín se musí nejdříve vypařit, a až jeho páry se míchají se vzduchem. To může způsobovat problémy zejména při studených startech, kdy se benzín nestihne vypařit, stéká kolem pístních kroužků a degraduje olejovou náplň.

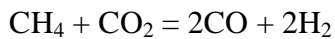
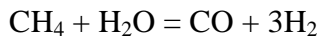
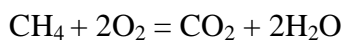
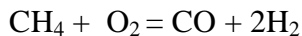
Nevýhodou vysoké difuzivity je tzv. vodíková křehkost, kdy vodík difunduje do mřížky materiálu např. sacího potrubí, a tím degraduje jeho mechanické vlastnosti. Tento jev lze eliminovat volbou správných materiálů. [31]

2.1 Výroba vodíku

1) Z uhlovodíků- tzn. NEobnovitelných zdrojů

- a) **Parní reforming**- V současnosti nejlevnější a nejpoužívanější způsob výroby vodíku. Pro výrobu se používá zemní plyn (směs metanu (CH₄)) a horká pára. Dosahované teploty při výrobě jsou až 1400°C. Účinnost výroby se pohybuje okolo 80% Při výrobě však vzniká CO₂ (na 1kg vodíku 7,05kg CO₂!)

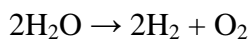
- b) **Parciální oxidace**- (částečné spalování)



Výrobní teploty se pohybují do 1300°C . Výhodou oproti parnímu reformingu je možnost využití rozličných uhlovodíků (nejen zemní plyn, ale i těžké oleje(mazut), uhlí). Nevýhodou je však větší produkce CO₂ .

2) Z vody

- a) **Elektrolýza vody**- vlivem průchodu stejnosměrného proudu vodným roztokem se na anodě vylučuje O₂ a na katodě H₂



Účinnost samotné elektrolýzy se pohybuje okolo 80-90%, ale při započítání účinnosti výroby elektřiny (30-40%) se celková účinnost pohybuje okolo 25-35% [2].

Proces je tudíž vhodný zejména v oblastech s levnou a „zelenou“ energií, kdy se používá v případě nadbytku elektřiny.

- b) **Vysokoteplotní elektrolýza**- Na rozdíl od běžné elektrolýzy je zde využita i počáteční tepelná energie, která se mění na chemickou (vodík) energii. To umožňuje zvýšení celkové účinnosti výroby až na 50%. Je vhodná tam kde jsou zejména levné zdroje tepla (sluneční, jaderné). V praxi se ovšem používá výhradně tepelná energie z atomových elektráren.

- c) **Termický rozklad vody** – při teplotě kolem 3000°C se voda rozkládá na různé atomy a molekuly, zejména H, H₂, O, O₂, OH. Tento způsob byl vynalezen kolem r. 1960, ale dodnes se neujal zejména kvůli vysokoteplotním nárokům na materiály.

3) Vodík z BIO zdrojů

- d) Rozklad methanolu-štěpení pomocí vodní páry (a katalizátorů) při 300-400°C a 3Mpa
$$\text{H}_2\text{O} + \text{CH}_3\text{OH} = \text{CO}_2 + 3\text{H}_2$$

Dosahuje se vysoké účinnosti- až 90%

- e) Pyrolýza- zplyňování biomasy- biomasa se zahřívá bez přístupu vzduchu. Se vzrůstající teplotou dochází od sušení až k vzniku stabilních plynů (CO, CO₂, CH₄, H₂)

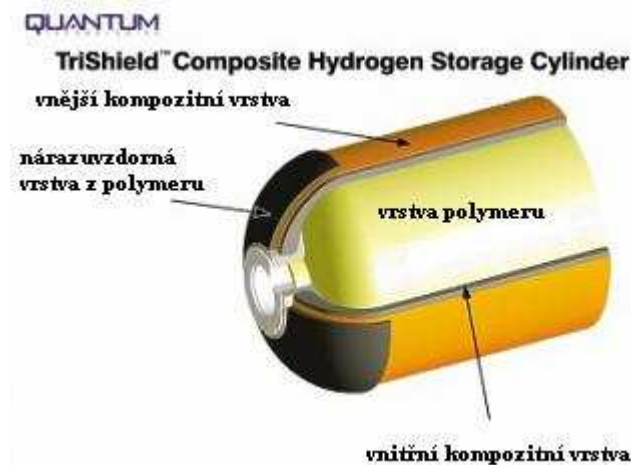
3) Vodík jako odpad

- a) Vodík lze získat také jako vedlejší produkt některých průmyslových aplikací- např. při výrobě chlóru a reformování benzínu.

2.2 Skladování vodíku

Vodík má sice vysokou výhřevnost vzhledem k hmotnosti, ale díky své velmi malé hustotě musí zabírat nesrovnatelně větší objem. Protože se jedná o plyn, dá se stlačit či zkapalnit.

- a) **stlačený vodík**-stlačený vodík má relativně malou objemovou výhřevnost [kJ/l] nebo [kJ/m³], ale je technologicky jednodušší=levnější na stlačení (kompresory) a na skladování (tlakové nádoby). Kompresory se používají pístové několikastupňové, popř iontové kompresory s roztokem soli, které jsou schopny stlačit vodík až na 1000 bar. V současné době se pro skladování používá “normalizovaný” tlak 350 bar resp. 700 bar. Energie potřebná ke kompresi na 350 bar je zhruba 30% energetické hodnoty paliva. Tlakové láhve jsou většinou z kompozitních materiálů (viz obr. 7).



Obrázek 7: Struktura tlakové nádoby [5]

b) zkapalněný vodík-zkapalněné plyny se musí skladovat pod teplotou varu (v závislosti na tlaku): Kyslík $-182.96\text{ }^{\circ}\text{C}$, vodík $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$. To vyvolává vysoké nároky na izolaci nádrže a na zkapalnění plynu. Energie potřebná ke zkapalnění vodíku dosahuje cca 40% energetické hodnoty paliva.

Kryogenní nádrže: Používají se např. ve vozech BMW (viz obr.8). Ty konkrétně jsou vyrobeny z dvou vrstev 2mm tlustých nerezových plechů s 30 mm tlustým vakuem. Obě vrstvy jsou spojeny uhlíkovými vlákny, což minimalizuje tepelný přenos mezi vrstvami. Toto uspořádání má stejný izolační efekt jako 17 m styroporu (pěnový polystyren). Vařící kafe by až za 80 dnů vychladlo na poživatelnou teplotu.

Tekutý vodík je skladován pod tlakem 3-5 bar a cca -250°C .

Tepelné ztráty skrz stěny nádrže způsobují vypařování kapalného vodíku (cca 3% objemu denně). Tím se uvnitř zvyšuje vnitřní tlak, který je upouštěn bezpečnostním ventilem do atmosféry.

BMW uvádí že napůl naplněná nádrž se vypaří za cca 9 dnů, a potom automobil ujede pouze okolo 20 km. Vypařování probíhá neustále, i když se vozidlo nepoužívá.

Při současném používání nepřímého vefuku vodíku do sacího potrubí je nutno vodík v nádrži při provozu řízeně zahřívat, aby se zkapalněný vodík začal podle potřeb odpařovat. Potřebné teplo se přivádí z chladícího systému vozidla.

Ve srovnání se stlačeným vodíkem na 700 bar nabízí zkapalněný vodík o 75% více energie (vzhledem k objemu nádrže).



Obrázek 8: Pohled do kufru BMW 750hL na kryogenní nádrž [6].

c) skladování nekonvenčními způsoby

Zde lze zahrnout skladování vodíku navázaného v kovech (metalhydridy), uhlíkových vláknech či různé chemické sloučeniny. V porovnání se stlačováním či zkapalňováním vodíku je této technologii věnováno více pozornosti, neboť u konvenčních způsobů prakticky nic lepšího vymyslet nelze. Stlačování vodíku nad 700 bar je energeticky nevýhodné, a při vývoji kryogenních nádrží na LH_2 je jedinou evoluční cestou vývoj lepších materiálů.

Metalhydridy- Vodík se při výrobě naváže do struktury kovů. Pokud má být vodík uvolněn je potřeba strukturu zahřát. Snaha je o co nejnižší teplotu potřebnou k uvolnění vodíku, dále zvětšení objemové a hmotnostní hustoty a snížení celkové energetické náročnosti. Nejčastěji používané jsou sloučeniny kovů Mg, Al, B.

Porovnání přepravitelného množství vodíku stlačeného-350 kg (obr. 9) a kapalného- 3 300 kg (obr. 10) při transportu firmou Linde.



Obrázek 9: Stlačený plyný vodík v ocelových lahvích.
Hmotnost soupravy: 40t, hmotnost vodíku: 350kg [7]



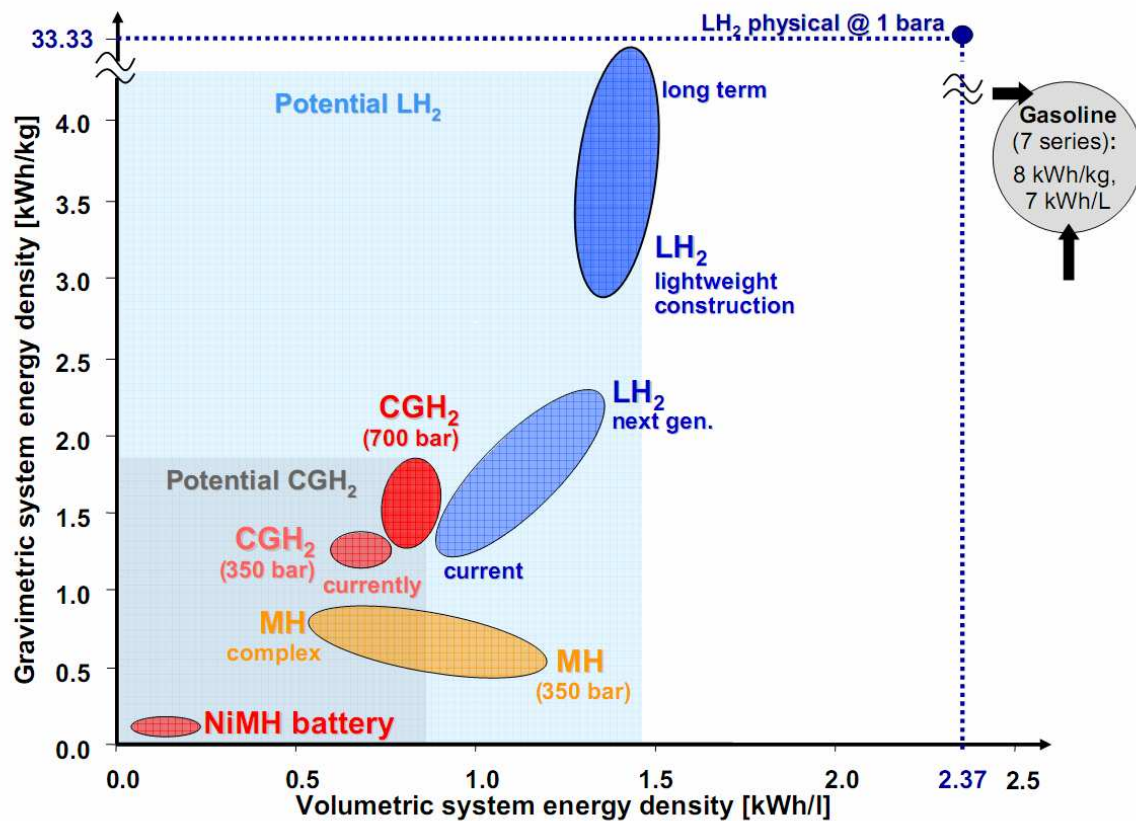
Obrázek 10: Zkapalněný vodík v kryogenní nádrži.
Hmotnost soupravy: 40t, hmotnost vodíku 3300kg[7]

Další vývoj kryogenních nádrží

Například v Lawrence Livermore National Laboratory (s podporou BMW) zkoušejí prototyp kryogenní nádrže, které dokáže pracovat i při vyšším tlaku (350 bar). Současné nádrže musí upouštět páry z nádrže za tři až čtyři dny, ale tento prototyp vydrží dnů patnáct. Pokud je nádrž zaplněna např. na 1/3, dokáže uchovat svůj obsah natrvalo [8].

Výhodou tohoto řešení je možnost tankovat kapalný vodík (LH_2) nebo stlačený vodík (CGH_2) [12].

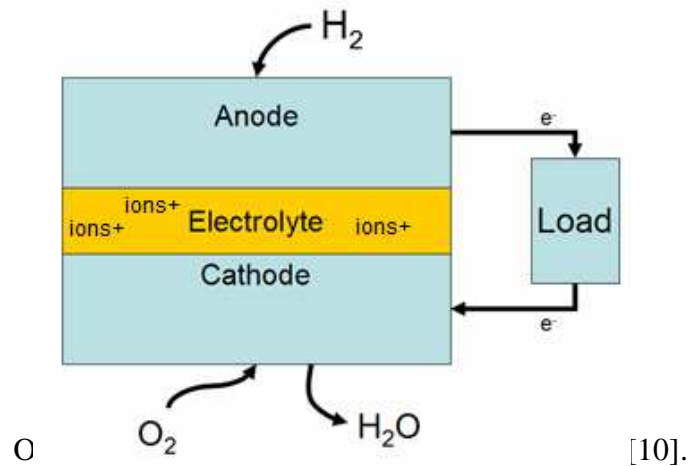
Představa vývoje skladovacích zařízení podle BMW je na obr. 11.



Obrázek 11: Zobrazení hustoty energie [kWh/kg], [kWh/l] skladovaného vodíku při různých způsobech skladování. [9]

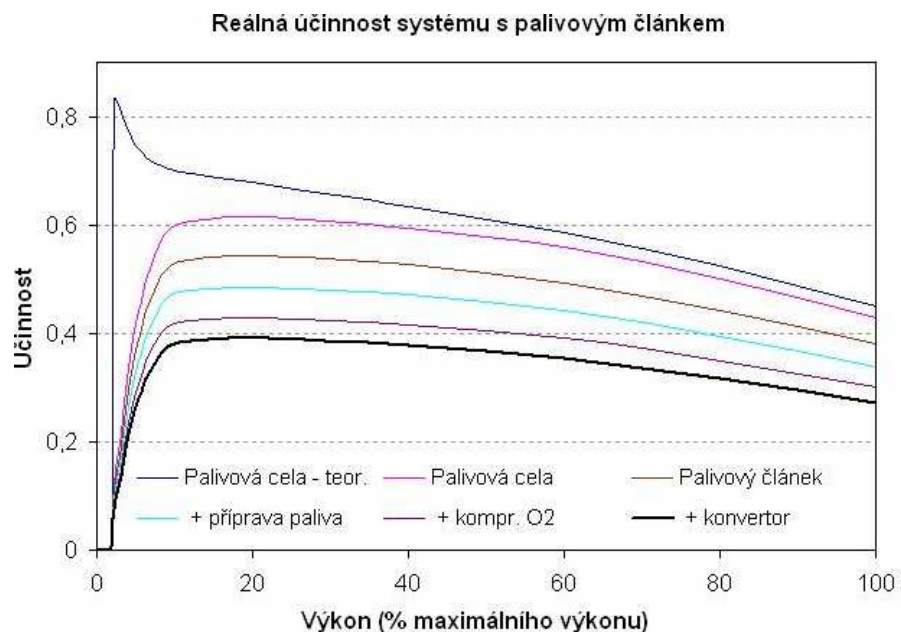
3 Palivový článek

Palivový článek pracuje na opačném principu než elektrolýza. Při elektrolýze je voda (elektrolyt) dodáním el. energie rozdělena na atomy (ionty) vodíku a kyslíku. V palivovém článku „spojí“ atomy vodíku a kyslíku. Výsledkem je el. energie a voda. (viz obr. 12)



3.1 Palivový článek vs. motor spalující vodík

Palivový článek vykazuje největší účinnost při malém zatížení (viz obr. 13). To znamená že pro dodržení „papírové“ hodnoty účinnosti (až 60%) musí být palivových článků více, což znamená větší hmotnost a hlavně finanční náročnost. Další nevýhodou je pomalá reakce při změně zatížení. Problémy nastávají také při teplotách pod bodem mrazu, neboť uvnitř palivového článku je vodní pára, která může zmrznout. Opětovný start je pak prakticky nemožný. Oproti tomu spalovací motor podle posledních výsledků umí pracovat až s 45% účinností, je léty prověřený, relativně jednoduchý a levný.



Obrázek 13: Účinnost palivového článku v závislosti na jeho zatížení [11]

4 Možnosti tvorby směsi

1) Vstřikování plynu do sacího potrubí

a) Centrální vstřík

-u benzínu obdoba karburátoru nebo jednobodového vstřikování (monopoint injection), zařízení LPG u karburátorových motorů.

b) Samostatný vstřík pro každé sací potrubí

-u benzínu obdoba MPI-(multipoint injection)

-vstřikování plynné fáze LPG

2) Vstřikování podchlazeného plynu do sacího potrubí

Zvané cryogenic port injection- nasávání studeného (-220°C) vodíku

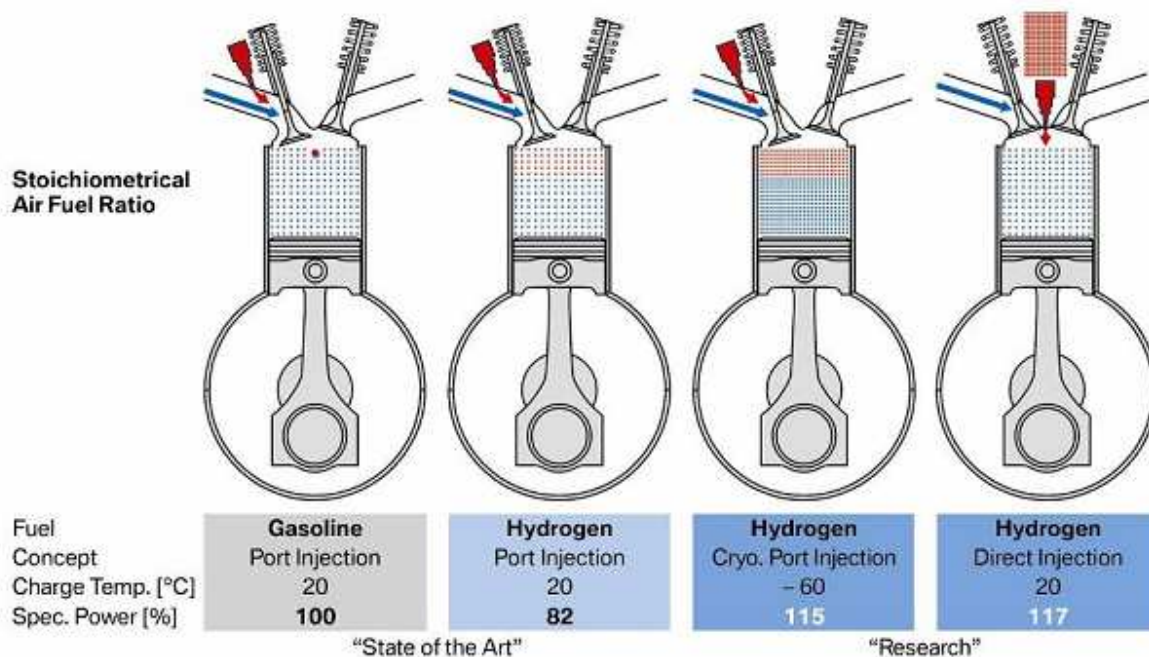
- obdoba vstřikování kapalné fáze LPG (při vypařování LPG dojde k snížení teploty nasáté směsi)

3) Přímý vstřík paliva do válce (po uzavření sacího kanálu)

-direct injection

u benzínu GDI-(Mitsubishi od r.1996), FSI

u dieselu všechny TDI a CR



Obrázek 14: Vyplnění objemu válce při použití benzínu, běžného vefukování do sacího potrubí, vefukování podchlazeného vodíku při -220°C, přímé vstřikování [9].

4.1 Současnost

Nepřímý vstřík do sacího potrubí

Tímto způsobem byla tvořena směs už v počátku vývoje spalovacích motorů, které používaly plynné palivo. Ne jinak je tomu i u vodíku, neboť se jedná o nejjednodušší způsob. Tento způsob, ačkoli je z hlediska výkonu nejméně vhodný, používají zatím všichni výrobci.

4.2 Vývoj

Nepřímý vstřík CRYO

Vefukování vodíku při 3-6 bar (absolutního tlaku) při teplotě menší než -220°C . V nádrži je skladován tekutý vodík (-253°C), který je veden vakuově izolovaným potrubím až do vstříkovačů v sacím potrubí. Celková teplota nasáté směsi je tedy kolem -60°C (což má stejný efekt jako použití intercooleru u přeplňovaných motorů= nasátí větší hmotnosti směsi).

Tento systém lze použít pouze při tankování a skladování LH_2 .



Obrázek 15: Detail systému vefukování vodíku do sacího potrubí [9]
(v BMW zvaný cryogenic-port injection)

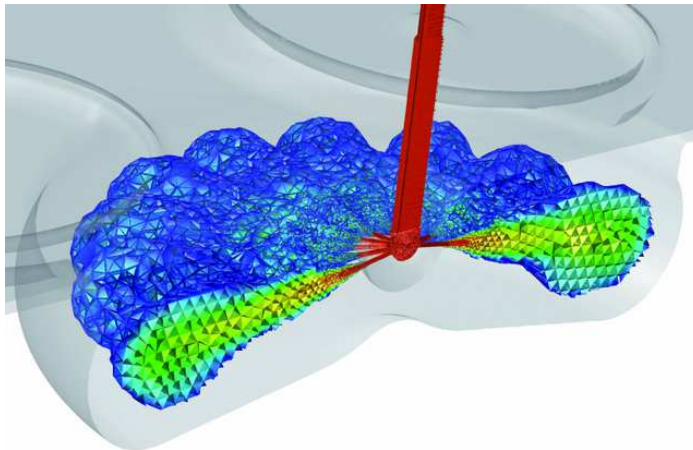
Přímé vstřikování vodíku do spalovací komory

BMW ve spolupráci s univerzitami v Grazu a Vídni vyvíjí motor s přímým vstřikem vodíku do válce (H2BVplus). Dosahují účinnosti 42%, což je plně srovnatelné s nejlepšími naftovými motory [13].

Tlak vefukovaného vodíku je 150-300 bar při teplotě -40 až 120°C, . Motor používá upravenou hlavu původně z diesellového motoru. V současné době je u tohoto systému největším problémem zajištění dodávky vysokotlakého vodíku [9].



Obrázek16: Detail systému přímého vstřiku vodíku [9]



Obrázek 17: 3D CFD simulace vysokotlakého přímého vstřiku vodíku[13]

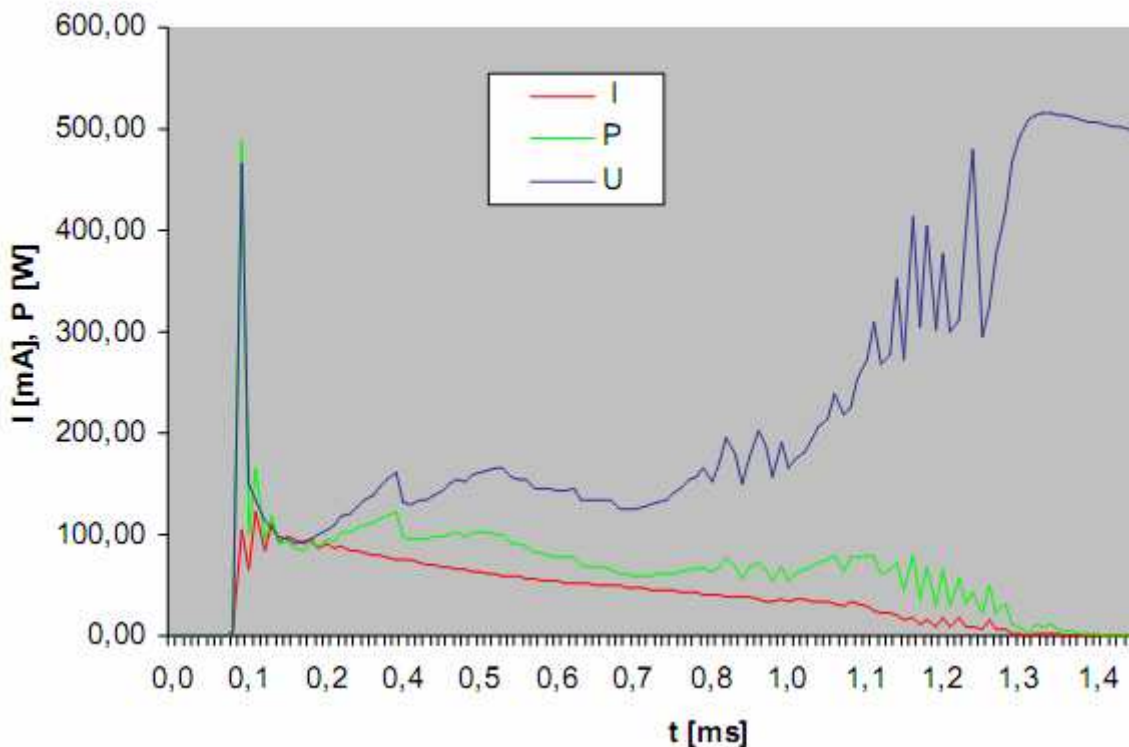
Pokud se cyklus přímého vstřiku započne např. 40° před horní úvratí, tlak ve válci dosahuje okolo 3 MPa, a v průběhu zdvihu se mění na cca 8 MPa. Tento nestálý protitlak vůči vstřikovanému vodíku má za následek změnu průtoku vodíku skrz vstřikovač, a je nutné ho brát v potaz. [14]

5 Zapalování směsí

Díky dobré hořlavosti vodíkových směsí, ve velkém rozsahu koncentrace, je ve většině případů pro zažehnutí směsi dostatečná zapalovací soustava používaná pro benzinové motory. Problém se zapálením nastává při spalování velmi chudých směsí. Jedno z možných řešení je použít více (2) zapalovací svíčky na jeden válec (např. Mazda s rotačním motorem), nebo použití speciálních plazmových zapalovacích svíček. Nejsložitější způsob zapálení velmi chudých směsí je výšlekové zapalování, jehož vývoji se věnují týmy po celém světě.

5.1 Zapalovací svíčky

Běžná zapalovací svíčka hodí jiskru, která trvá velmi krátkou dobu (cca 2ms), a dodá energii cca 80 mJ (viz. Obr. 18). Oproti tomu svíčka držící stabilní oblouk (plazmový) dokáže během stejné doby dodat energii cca 8 krát větší-tj 500 mJ. (viz. obr.19)



Obrázek 18: Průběh napětí a proudu a výkonu běžné zapalovací svíčky (s jiskrovým výbojem) v čase [15]

Jiskra při použití zapalovací svíčky a běžného vysokonapěťového obvodu vzniká takto: Po počátku výboje, kdy se dielektrikum mezi elektrodami stane vodivým, prudce klesá napětí a v průběhu celého výboje klesá i proud. Oproti tomu při potřebě větší zapalovací energie je vhodnější použití nižšího napětí a větších proudů. Aby proud v průběhu výboje neklesal, byla vyvinuta svíčka s pohyblivou elektrodou [15].



Obrázek 19: Průběh proudu a napětí u svíčky s pohyblivou elektrodou [16]



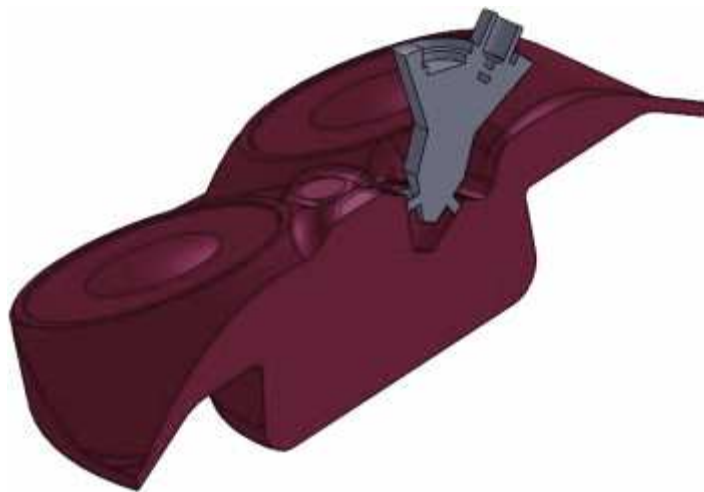
Obrázek 20: Zapalovací svíčka s pohyblivou elektrodou vyvinutá v TUL Liberec[15]

5.2 Výšlekové zapalování

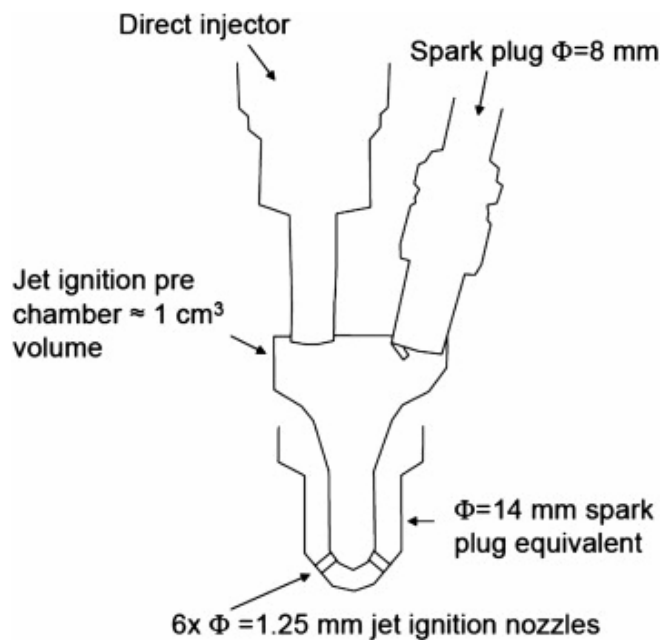
Výšlekové zapalování spočívá v zapálení malého množství bohatší směsi, jejíž zplodiny hoření zapálí větší množství chudé směsi, které by byla konvenčními způsoby obtížně nebo vůbec zapalitelná.

Podobně jako u starých předkomůrkových dieselů se v hlavě nachází předkomůrka (obr. 21), která ústí do spalovacího prostoru. Jedna možnost řešení je použití běžné zapalovací svíčky (obr. 22), která je umístěna v předkomůrce, a zapaluje bohatší směs. Další možnost je použití žhavicí svíčky (obr.23), na jejímž rozžhaveném povrchu dojde ke vznícení vefouknutého vodíku. Verze se žhavicí svíčkou mívá menší předkomůrku a potřebuje tak menší množství bohatší směsi. V obou případech se vodík vstříkuje přímo do spalovacího prostoru a do předkomůrky (tzn. je potřeba dvou vstříkovačů na každý válec). Ve spalovacím prostoru je vodík soustředěn poblíž ústí předkomůrky, zatímco u stěn válců se nachází zejména vzduch a zbytky po předchozím spalování. Díky tomu se zmenšuje tepelný přenos do stěn válců, a přispívá k větší efektivitě. (Ztráta energie do chladicího systému se oproti spalování dieselu zmenší cca o 1/2 [14]) Objem předkomůrky bývá cca 1% kompresního objemu motoru. Při spalování velmi chudých směsí je dosahováno nízkých teplot, což způsobuje minimalizaci emisí NO_x.

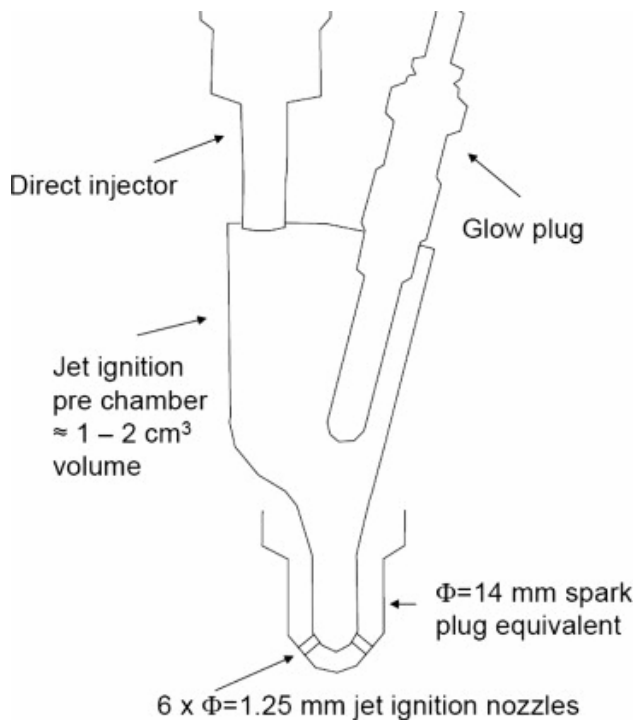
Postup hoření během výšlehu je patrný z přílohy: obr. 1



Obr 21 Řez spalovacím prostorem, kde šedá barva vyznačuje objem předkomůrky a červená kompresní objem [18]



Obrázek 22: schéma předkomůrky s běžnou zapalovací svíčkou [17],[19]

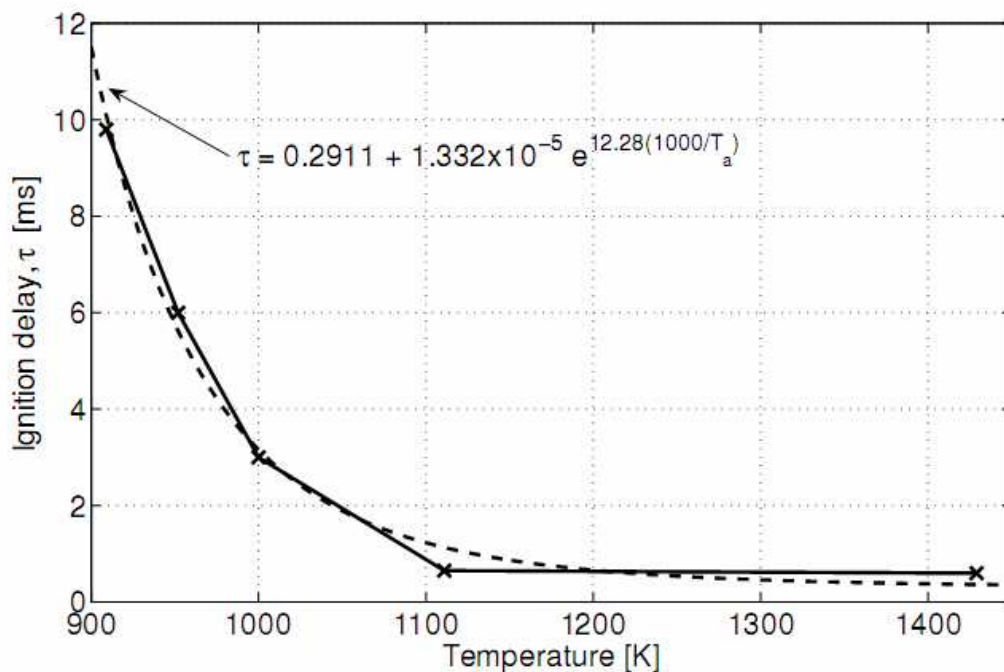


Obrázek 23: Schéma předkomůrky s žhavicí svíčkou [17],[19]

Výšlekové zapalování spolu s přímým vstřikem vodíku (nebo nepřímého „cryo“ vstřiku do sacího potrubí) dokáže plně regulovat výkon motoru změnou množství paliva i bez použití škrtící klapky, která snižuje účinnost nasávání vzduchu (nebo směsi), stejně jako diesellové motory.

5.3 Dual fuel

Další možností zapálení vodíku je tzv. dual fuel, kdy se použije mírně upravený dieselový motor. Pro zapálení vodíkové směsi se místo zapalovací svíčky používána nafta. Protože teplota vzplanutí nafty je okolo 210°C oproti vodíku s cca 580°C, hořící naftové výpary zažehnou vodíkovou směs. Ta je tvořena buď vefukováním do sacího potrubí nebo přímým vstřikováním vodíku. Při přímém vstřikování vodíku se dosahuje cca o 14% vyšších výkonů a větší účinnosti v porovnání s čistě dieselovým palivem, přičemž je potřeba předehtřivat nasávaný vzduch alespoň na 80°C, neboť při nízkých teplotách se zvětšuje zpoždění při vznícení vodíku [14]. (obr 24)



Obrázek 24: Zpoždění vznícení vodíkové směsi v závislosti na teplotě [14]

6.1 BMW

BMW se oblasti vodíkových technologií věnuje již od r. 1979, a to výhradně spalování vodíku v lehce upravených zážehových motorech ze sériové produkce.

Oproti tomu Ford a Mazda se věnuje nejen vývoji spalovacích motorů, ale i palivových článků. Ostatní výrobci, kteří již prodávají sériové vozy poháněné vodíkem se vydali cestou palivových článků. Např. první český vodíkový autobus s výkonem palivových článků 50kW, Mercedes, Honda, Toyota...

BMW Hydrogen 7 (obr. 25,26,27) se začal veřejně prodávat v r.2007. Používá 12-ti válcový motor schopný spalovat benzín nebo vodík při výkonu 260 hp. Využívá konvenční 74 litrovou nádrž na benzín, a nádrž na kapalný vodík, která dokáže pojmout cca 8 kg (17,6 lb) vodíku, na který dokáže ujet kolem 200km (125 mil). Provoz na benzín umožňuje dojezd dalších 450 km. Akcelerace 0-100km/h zabere 9,5 s, maximální rychlost je elektronicky omezena na 230km/h (143mil). Druh spalovaného paliva je pouze na řidiči-mezi vodíkem i benzinem lze libovolně přepínat, dokonce kroutící moment i výkon zůstávají stejné [20].

To je zklamání vzhledem k 438hp@6000 (dle SAE), kterými disponuje původní verze motoru ve voze 760Li (5972cm³, 0-100km/h kolem 5,5s, maximální rychlost omezena na 250km/h).

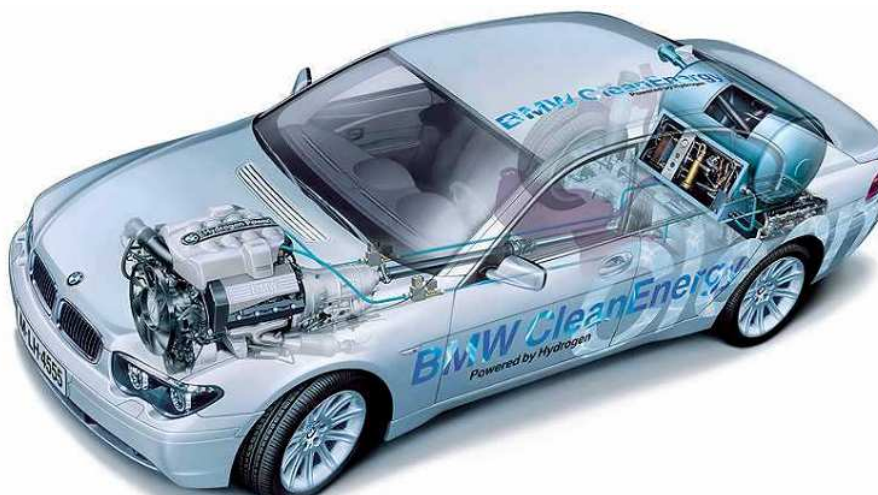
Motor využívá přímé vstřikování benzínu, nebo vstřikování vodíku do sacího potrubí (port injection). Obsahuje i technologie Valvetronic a Double-Vanos, které umožňují měnit časování a zdvih ventilů.

Jediné měřitelné emise u vodíkových motorů jsou NO_x, které vznikají při všech vysokoteplotních spalováních. V praxi motor pracuje většinou při částečném zatížení, a do motoru se vstřikuje méně vodíku. To znamená že je spalována chudá směs s přebytkem vzduchu. Díky tomu jsou dosahovány nižší teploty hoření, tudíž i nižší emise NO_x. Při plné zátěži se zvětšuje dávka vodíku, zvyšuje se i teplota spalování, a produkuje nejvíce NO_x. Protože je možný i provoz na benzín, pro minimalizování už tak malého množství emisí se používá, tak jak u konvenčních motorů, třícestný katalizátor.

Při studeném startu se motor snaží spalovat vodík kvůli minimalizaci emisí CO po dobu než katalizátor dosáhne optimální teploty. Kvůli zvětšenému namáhání zadní nápravy (nádrž) bylo upraveno šasi i odpružení. Kvůli instalace nádrže se zavazadlový prostor zmenšil na pouhých 255 l (stejně jako Škoda Fabia).



Obrázek 25: Vodíkové BMW 750hL (E 38 1994-2001) brázdí silnice od r. 2001 [6]



Obrázek 26: Vodíkové BMW 760hL E 68 odvozeno z civilní verze E 66 [21]



Obrázek 27: Detail plnicích hrdel pro tankování vodíku a benzínu BMW 760hL [22]

BMW H2R

Tento prototyp (obr.28,29) byl zkonstruován pouze pro překonávání rychlostních rekordů automobilů poháněných vodíkem. Na rozdíl od ostatních prototypů BMW může jezdit pouze na vodík. Od roku 2004 bylo pokořeno 9 rekordů. Jedním z nich byla i maximální rychlost přes 302 km/h.

Technické specifikace:

6L V12 210 kW/285 k

0-100km/h okolo 6 sekund



Obrázek 28: BMW H2R [23]



Obrázek 29: BMW H2R bez karoserie [24]

6.2 Mazda

Mazda začala s výzkumem využití vodíku už v devadesátých letech minulého století. První rotační motor na vodík byl představen ve vozidle HR-X (1991). Dále pak v Mazdě MX-5 (1993) a RX-8 (2003). Na rozdíl od BMW se však pozornost nesoustředila pouze na spalovací motory ale i na palivové články.

Rotační motor je vhodnější pro spalování vodíku, neboť vstřik (vefuk) vodíku se provádí v místě kde nedochází ke spalování. Tím se eliminuje možnost nechtěného samovznícení směsi od horkých bodů ve spalovacím prostoru.

Mazda RX-8 Hydrogen RE (obr.30)

Technické údaje:

Dvourotorový motor Mazda RENESIS Hydrogen 13B Dual-Fuel

objem 2x 654 cm³

výkon a točivý moment 80 kW (109 k) a 140 N.m na vodík

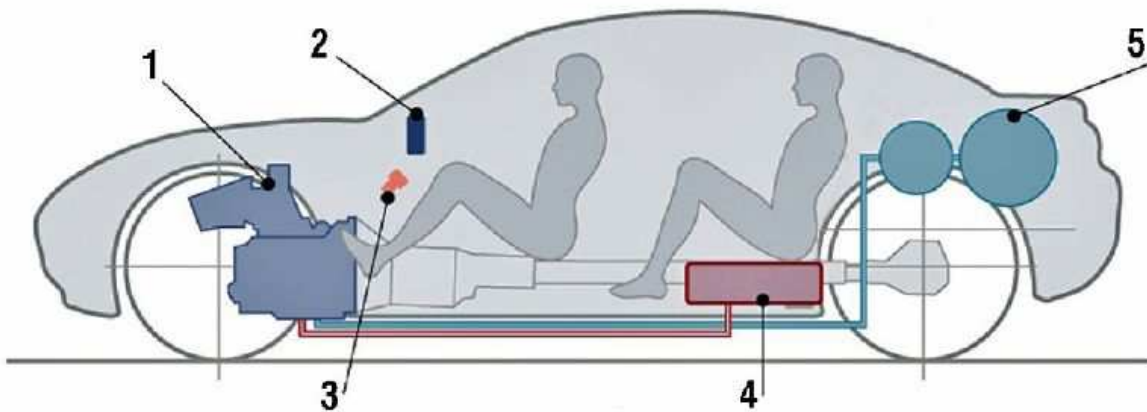
154 kW (210 k) a 222 N.m na benzin

objem nádrže benzínu 61 l

objem vysokotlakých nádrží vodíku 110 l při tlaku 35 MPa

pohotovostní hmotnost 1460 kg

akční rádius 100 km na vodík a 550 km na benzin.



Obrázek 30: Příčný řez vozem RX-8 Hydrogen RE [25]:

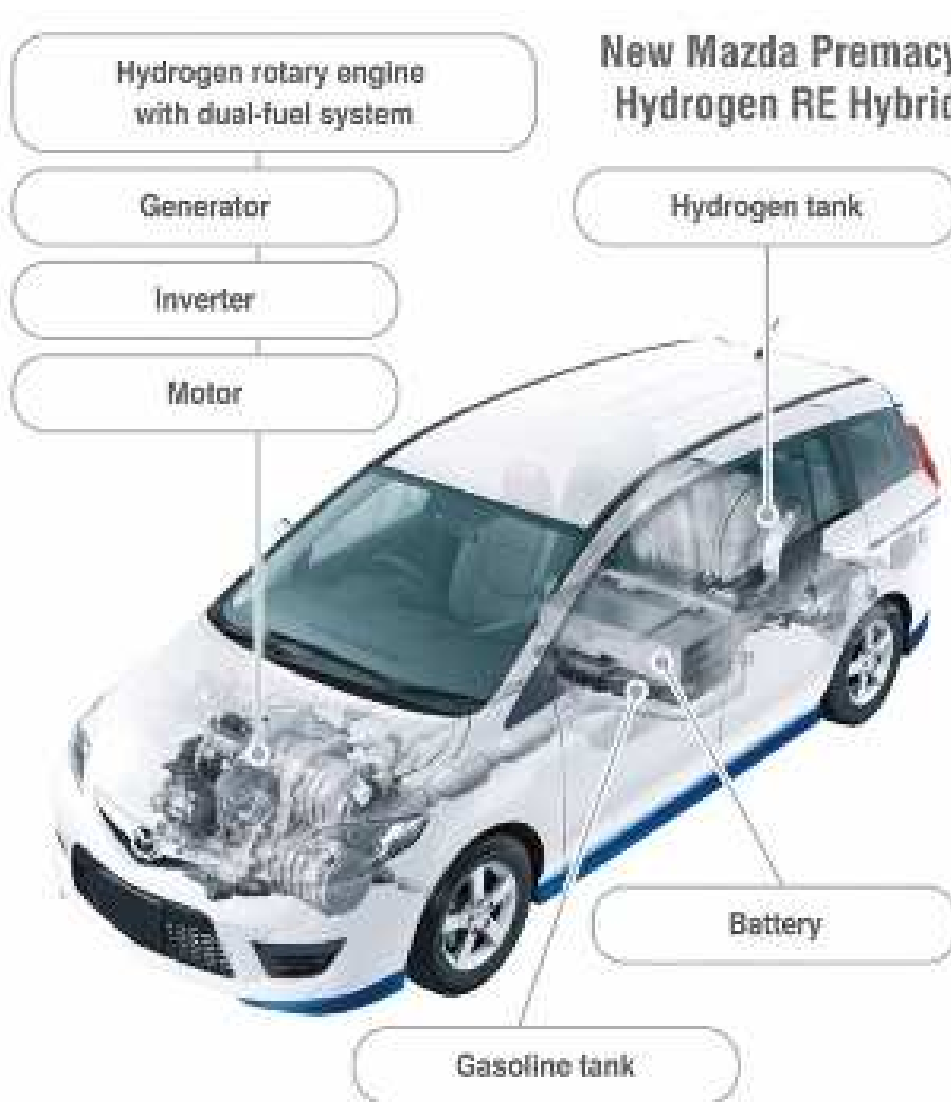
1 – rotační motor RENESIS, 2 – ukazatel zásoby vodíku, 3 – přepínač vodík/benzin,

4 – sériová nádrž benzínu, 5 – vysokotlaké nádrže vodíku

Mazda 5 Premacy Hydrogen Hybrid

Výhodou tohoto automobilu je možnost spalovat vodík i benzín (stejně jako u BMW či Mazda RX-8 Hydrogen RE) ale navíc je vybaven poslední dobou velice módním hybridním systémem.

Tento automobil má totožný motor (viz. přílohy: obr.2) jako Mazda RX-8 Hydrogen RE, navíc však kromě nádrže na benzín, tlakové nádrže na stlačený vodík a motoru navíc obsahuje velkou baterii, generátor a elektromotor (v jednom). Podle všech indicií bude toto uspořádání (obr. 31) přirozenou mezigenerací mezi benzinovými motory a elektroauty s palivovým článkem. Dojezd na vodík je okolo 200 km.



Obrázek 31: Mazda 5 Premacy Hydrogen Hybrid [26]

6.3 Ford

Stejně jako Mazda i Ford se věnuje výzkumu spalovacích motorů na vodík i palivových článků.

Koncept Ford P2000 H2ICE (se spalovacím motorem)

Tento koncept je založen na americké verzi Ford Focus s upraveným motorem 2,0L Zetec. Dojezd se pohybuje kolem 250 km při plnění na 350 bar nebo 430 km při 700 bar.

Ford Focus FCV (s palivovými články)

Standardní model Focusu váží 1 150 – 1 350 kg. Prototyp s palivovými články váží 1 750 kg. Tato verze má dojezd 250-300 km a dosahuje maximální rychlosti 130 km/h. Elektromotor je třífázový o výkonu 67 kW (90k) [27].



Obrázek 32: Pohled na zásobníky vodíku v kufru experimentálního Ford Focus [6]

Ford U koncept

Koncept z r.2003 má motor 2,3 l s turbodmychadlem a hybridním systémem. Vlastní motor má výkon 88 kW, elektromotor 25 kW [28].

Ford Fusion Hydrogen 999 LSR

Stejně jako bylo vyrobeno BMW H2R pro překonání rychlostních rekordů vozidel spalující vodík v motoru, i Ford vyrobil svůj prototyp Ford Fusion Hydrogen 999 LSR (obr. 33). Ten však pro pohon používá elektromotor a palivové články. Na solném jezeře dosáhl rychlosti 207 mil (333 km/h). Speciálně k tomuto účelu byl vyvinut 350 kW systém palivových článků, které zásobují elektromotor o výkonu 770 k. Zvláštností je to, že palivové články neberou kyslík z okolní atmosféry, ale z další nádrže, kde je směs 40% kyslíku a 60% helia. Toto umožňuje dosáhnout většího výkonu palivových článků bez potřeby kompresoru. Tento vůz však díky palivovým článkům a nádržím váží 3 050 kg. Zajímavostí je i použití převodovky a zadní nápravy z Fordu GT



Obrázek 33: Ford Fusion Hydrogen 999 LSR [29]

7 Závěr

V dnešní době, kdy přísné emisní limity a hrozba nedostatku fosilních paliv- zejména ropy, je moderní hledání , vymyšlení a realizace obnovitelných zdrojů energie. V tomto ohledu je vodík zvláštní, neboť není zdroj energie ale jen její nosič. Ačkoliv se v praxi vodík vyrábí zásadně z fosilních paliv (obr. 2), má v očích laické veřejnosti (a politiků) „nálepku zeleného paliva“. Úkolem práce však není hodnotit jeho ekologické, ekonomické či morální přínosy, ale posoudit v současnosti používané či vyvíjené technické řešení pro jeho využití ve spalovacích motorech.

Díky vlastnostem vodíku (zejména výbušnosti v širokém spektru koncentrací) ho lze i s minimálními úpravami současných benzinových motorů použít jako palivo, neboť to vždycky „nějak“ pojede. Výzvou však zůstává dosažení co nejnižších emisí (NO_x), co nejvyšší účinnosti a objemového výkonu. To se však neobejde bez hlubokého pochopení procesů, které při spalování probíhají.

V současnosti vyráběné automobily používají výhradně vefuk do sacího potrubí se všemi jeho výhodami (jednoduchost) a nevýhodami: zejména nízký výkon v porovnání s provozem na benzin (BMW: 260 vs 438 hp, Mazda RX+8 Hydrogen RE: 109 vs. 210 hp, koncept Ford U 2,3L s turbem: 118 k). Tato nevýhoda lze odstranit použitím složitějšího systému přípravy směsi: přímý vstřík nebo vstřík studeného (-220°C) vodíku do sacího potrubí. S současnosti jsou oba způsoby ve fázi vývoje.

Kvůli snižování emisí je tendence (při částečném zatížení) spalovat chudou směs. Čím chudší, tím menší teplota spalování a menší produkce NO_x . Velmi chudou směs však běžnou zapalovací svíčkou nelze zaručeně zažehnout, proto jsou snahy o používání speciálních svíček, nebo použití výšlehového zapalování.

V porovnání s palivovými články, motor dokáže spalovat více paliv (benzín + vodík), je jednodušší, levnější, lehčí a méně náročný na údržbu. Palivové články se však mohou pochlubit žádnými emisemi, vyšší účinností a možností poskládat je do libovolného tvaru. Potřebují však drahé baterie či kapacitory, nedokáží rychle reagovat na změnu zatížení a obtížně se provozují v teplotách pod bodem mrazu.

Díky tomu spalovací motor není „mrtvou“ technologií ani ve vodíkové budoucnosti.

Seznam použitých zdrojů

- [1] *Worldcoal.org* [online]. 2006 [cit. 2010-05-01]. Coal & Electricity. Dostupné z WWW: <<http://www.worldcoal.org/coal/uses-of-coal/coal-electricity/>>.
- [2] SOMOLOVÁ, Markéta; DLOUHÝ, Petr. *Hytep.cz* [online]. 2007-05-09 [cit. 2010-05-25]. Výroba vodíku. Dostupné z WWW: <<http://www.hytep.cz/?loc=article&id=6>>.
- [3] *Ekobioenergo.cz* [online]. 2008 [cit. 2010-05-25]. Výhřevnost paliv. Dostupné z WWW: <<http://ekobioenergo.cz/eko-bio-zajimavosti-vyhrevnosti-paliv.html>>.
- [4] ŠTETINA, Josef. *Www.vutbr.cz/elearning* [online]. 2008 [cit. 2009-12-10]. Pracovní cykly spalovacích motorů. Dostupné z WWW: <<https://www.vutbr.cz/elearning/mod/resource/view.php?id=81650>>.
- [5] DLOUHÝ, Petr; JANÍK, Luděk. *Hytep.cz* [online]. 2007-05-17 [cit. 2010-05-25]. Skladování vodíku I. Dostupné z WWW: <<http://hytep.cz/?loc=article&id=8>>.
- [6] FRANZINGER, Kathy. *Machinedesign.com* [online]. 2003-02-06 [cit. 2009-12-10]. A Closer Look at Hydrogen. Dostupné z WWW: <<http://machinedesign.com/article/a-closer-look-at-hydrogen-0206>>.
- [7] BRADA, Zbyněk. *Catp.cz* [online]. 2009-05-05 [cit. 2010-05-25]. Vodík- nositel energie. Dostupné z WWW: <www.catp.cz/publikace/vodik-nositel-energie.pdf>.
- [8] BERAN, Ota. *Www.osel.cz* [online]. 2008-06-12 [cit. 2010-05-25]. Začneme jezdit na vodík?. Dostupné z WWW: <<http://www.osel.cz/index.php?clanek=3678>>.
- [9] FICKEL, Hans-Christian. *Www.storhy.net* [online]. 2008-06-03 [cit. 2010-05-25]. Future hydrogen vehicles, Expectations to Storage Systems. Dostupné z WWW: <http://www.storhy.net/finalevent/pdf/WS1_Future_BMW-Fickel.pdf>.
- [10] *Wikipedia.org* [online]. 2010-02-26 [cit. 2010-05-25]. Fuel cell. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Fuel_Cell_Block_Diagram.png>.
- [11] DLOUHÝ, Petr; JANÍK, Luděk. *Hytep.cz* [online]. 2007-09-10 [cit. 2010-05-26]. Účinnost II. Dostupné z WWW: <<http://www.hytep.cz/?loc=article&id=12>>.
- [12] *Hydrogencarsnow.com* [online]. 2008-04-16 [cit. 2010-05-26]. BMW Hydrogen 7 Cryo-Compression for Hydrogen Storage. Dostupné z WWW: <<http://www.hydrogencarsnow.com/blog2/index.php/hydrogen-storage/bmw-hydrogen-7-cryo-compression-for-hydrogen-storage/>>.
- [13] *Greencarcongress.com* [online]. 2009-05-14 [cit. 2010-05-26]. High-Pressure Direct-Injection Hydrogen Engine Achieves Efficiency of 42%. Dostupné z WWW: <<http://www.greencarcongress.com/2009/03/high-pressure-d.html>>.
- [14] ANTUNES, J.M.G; MIKALSEN, R.; ROSKILLY, A.P. An experimental study of a direct injection compression ignition hydrogen engine. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2009, 34, s. 6516-6522.

- [15] SCHOLZ, Celestýn. *Www3.fs.cvut.cz* [online]. 2006-02-01 [cit. 2010-04-01].
Projekční a konstrukční studie nových koncepčních řešení spalovacích motorů .
Dostupné z WWW:
<www3.fs.cvut.cz/web/uploads/.../1_1_6_Kolokvium_VCJB_2005_04.pdf>.
- [16] SVOBODA, Miroslav; FENKL, Michael. High-energy ignition system for lean-burn hydrogen-air mixtures. *MECCA*. 2009, vol. 7, 1, s. 22-27.
- [17] BORETTI, Alberto S. Vehicle driving cycle performance of the spark-less DI-JI hydrogen engine . *International Journal of Hydrogen Energy*. May 2010, vol. 35, 10, s. 4702-4714 .
- [18] BORETTI, Alberto A. Modelling auto ignition of hydrogen in a jet ignition pre-chamber . *International Journal of Hydrogen Energy*. April 2010, vol. 34, 8, s. 3881-3890.
- [19] BORETTI, Alberto A.; WATSON, Harry C. The lean burn direct injection jet ignition gas engine . *International Journal of Hydrogen Energy*. September 2009, vol. 34, 18, s. 7835-7841 .
- [20] VANZIELEGHEM, Bruno. *Green.autoblog.com* [online]. 2006-09-12 [cit. 2010-05-25]. BMW officially announces the BMW Hydrogen 7. Dostupné z WWW:
<<http://green.autoblog.com/2006/09/12/bmw-officially-announces-the-bmw-hydrogen-7/>>.
- [21] *Themotorreport.com.au* [online]. 2007-03-13 [cit. 2010-05-26]. BMW Hydrogen 7. Dostupné z WWW: <http://www.themotorreport.com.au/483/bmw-hydrogen-7&usg=__uPAQ3DTHLhbWBPrW57VCdwldR8E=&h=353&w=479&sz=117&hl=cs&start=14&um=1&itbs=1&tbnid=C_SosmWHW9-cHM:&tbnh=95&tbnw=129&prev=/images%3Fq%3Dbmw%2Bhydrogen%2Bpic%26um%3D1%26hl%3Dcs%26lr%3D%26client%3Dfirefox-a%26hs%3DMMc%26sa%3DX%26rls%3Dorg.mozilla:cs:official%26channel%3Ds%26tbs%3Disch:1>.
- [22] WOODSTER, John. *Vehicles-that-rocks.blogspot.com* [online]. 2006-11-23 [cit. 2010-05-26]. BMW to Unveil Hydrogen 7, Decline BLUETEC Diesels at LA Auto Show. Dostupné z WWW:
http://images.dailytech.com/nimage/3134_07.bmw.7h.fuel.1.500.jpg&imgrefurl=http://vehicles-that-rocks.blogspot.com/2006_11_01_archive.html&usg=__GBF_JbV6OQ3DIzuweIuZk72fHnc=&h=189&w=300&sz=12&hl=cs&start=43&um=1&itbs=1&tbnid=NAuSKGiUPhxxqM:&tbnh=73&tbnw=116&prev=/images%3Fq%3Dbmw%2Bhydrogen%2Bfilling%2Bpic%26start%3D36%26um%3D1%26hl%3Dcs%26lr%3D%26client%3Dfirefox-a%26hs%3DAEd%26sa%3DN%26rls%3Dorg.mozilla:cs:official%26channel%3Ds%26ndsp%3D18%26tbs%3Disch:1>.

- [23] *Carstyling.ru* [online]. 2004 [cit. 2010-05-26]. 2004 BMW H2R. Dostupné z WWW: <http://www.carstyling.ru/en/cars.2004_BMW_H2R.html&usg=__7Jac3NwWZzRo8TSgIrI5ziN-AEU=&h=309&w=420&sz=29&hl=cs&start=8&um=1&itbs=1&tbnid=OuvtCINiGQCcgM:&tbnh=92&tbnw=125&prev=/images%3Fq%3Dbmw%2Bh2r%26um%3D1%26hl%3Dcs%26lr%3D%26client%3Dfirefox%26sa%3DX%26rls%3Dorg.mozilla:cs:official%26channel%3Ds%26tbs%3Disch:1>.
- [24] *Desktopcar.net* [online]. 2004 [cit. 2010-05-26]. 2004 BMW H2R. Dostupné z WWW: <http://www.desktopcar.net/bmw/h2r/BMW_H2R_02.jpg.html>.
- [25] *Automotorevue.cz* [online]. 2008-11-02 [cit. 2010-05-26]. Mazda RE Hydrogen - Jedeme na vodík !. Dostupné z WWW: <<http://www.automotorevue.cz/auto/technika/mazda-re-hydrogen-jedeme-na-vodik.html>>.
- [26] SUNDERLAND, Faye. *Thegreencarwebsite.co.uk* [online]. 2009-03-12 [cit. 2010-05-26]. Mazda unveils first vehicle for Norwegian hydrogen project. Dostupné z WWW: <http://www.thegreencarwebsite.co.uk/blog/index.php/2009/05/12/mazda-unveils-first-vehicle-for-norwegian-hydrogen-project/&usg=__MQtIO6dufR7u-WlbkMPvTTDXX-w=&h=400&w=330&sz=51&hl=cs&start=11&um=1&itbs=1&tbnid=S0V6AHFlwgGDIM:&tbnh=124&tbnw=102&prev=/images%3Fq%3Dmazda%2Bhydrogen%26um%3D1%26hl%3Dcs%26lr%3D%26client%3Dfirefox%26sa%3DX%26rls%3Dorg.mozilla:cs:official%26chann>.
- [27] ABUELSAMID, Sam. *Green.autoblog.com* [online]. 2006-10-30 [cit. 2010-05-26]. Ford Focus FCV in the AutoblogGreen Garage. Dostupné z WWW: <<http://green.autoblog.com/2006/10/30/ford-focus-fcv-in-the-autobloggreen-garage-part-1/>>.
- [28] *New-cars.com* [online]. 2003 [cit. 2010-05-26]. Ford U Concept. Dostupné z WWW: <<http://www.new-cars.com/concept/2003/ford-u-concept.html>>.
- [29] *Speedace.info* [online]. 2007 [cit. 2010-05-26]. FORD FUSION - HYDROGEN 999 CAR . Dostupné z WWW: <http://www.speedace.info/ford_fusion_hydrogen_car.htm>.
- [30] KOROLL, G.W.; KUMAR, R.K.; BOWLES, E.M. Burning velocities of hydrogen-air mixtures. *Combustion and Flame* [online]. August 1993, vol.94, 3, [cit. 2010-05-26]. Dostupný z WWW: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V2B-497ST9M-C2/2/2f20c61d503ba5bbc0084185f16308be>>.
- [31] Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies [online]. Vydáno: 1.12.2001 [citováno 2010-05-06]. Dostupné z: <http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/tech_validation/h2_manual.html>

Seznam použitých zkratk a symbolů

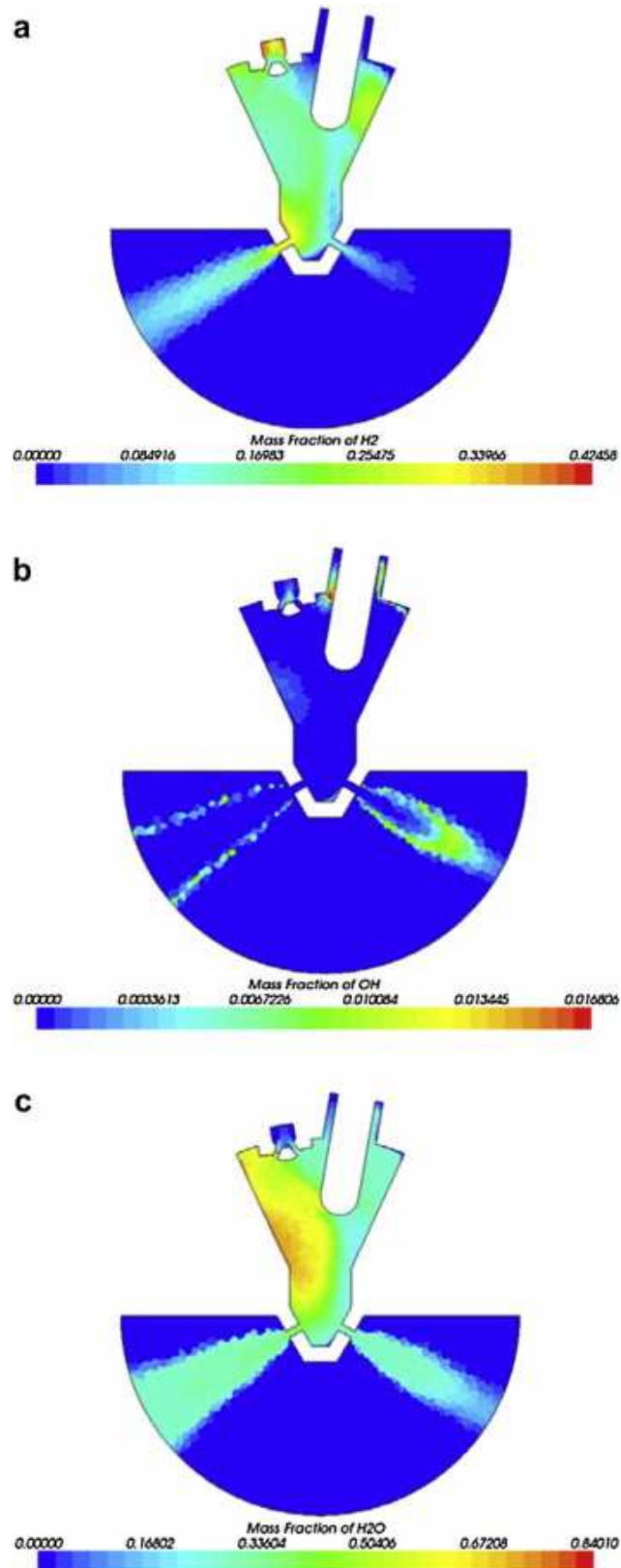
CGH2	plynný stlačený vodík
LH2	tekutý vodík
GDI	přímý vstřík benzínu (Mitsubishi)
FSI	přímý vstřík benzínu (VW)
TDI	přímý vstřík nafty(VW)
CR	přímý vstřík nafty – common rail
LPG	zkapalněný ropný plyn
E85	70-85% ethanolu + 30-15 % benzínu

κ	poissonova konstanta: pro	jednoatomové plyny	$\kappa = 1,67$
		dvouatomové plyny	$\kappa = 1,4$
		víceatomové plyny	$\kappa = 1,33$
ε	kompresní poměr		

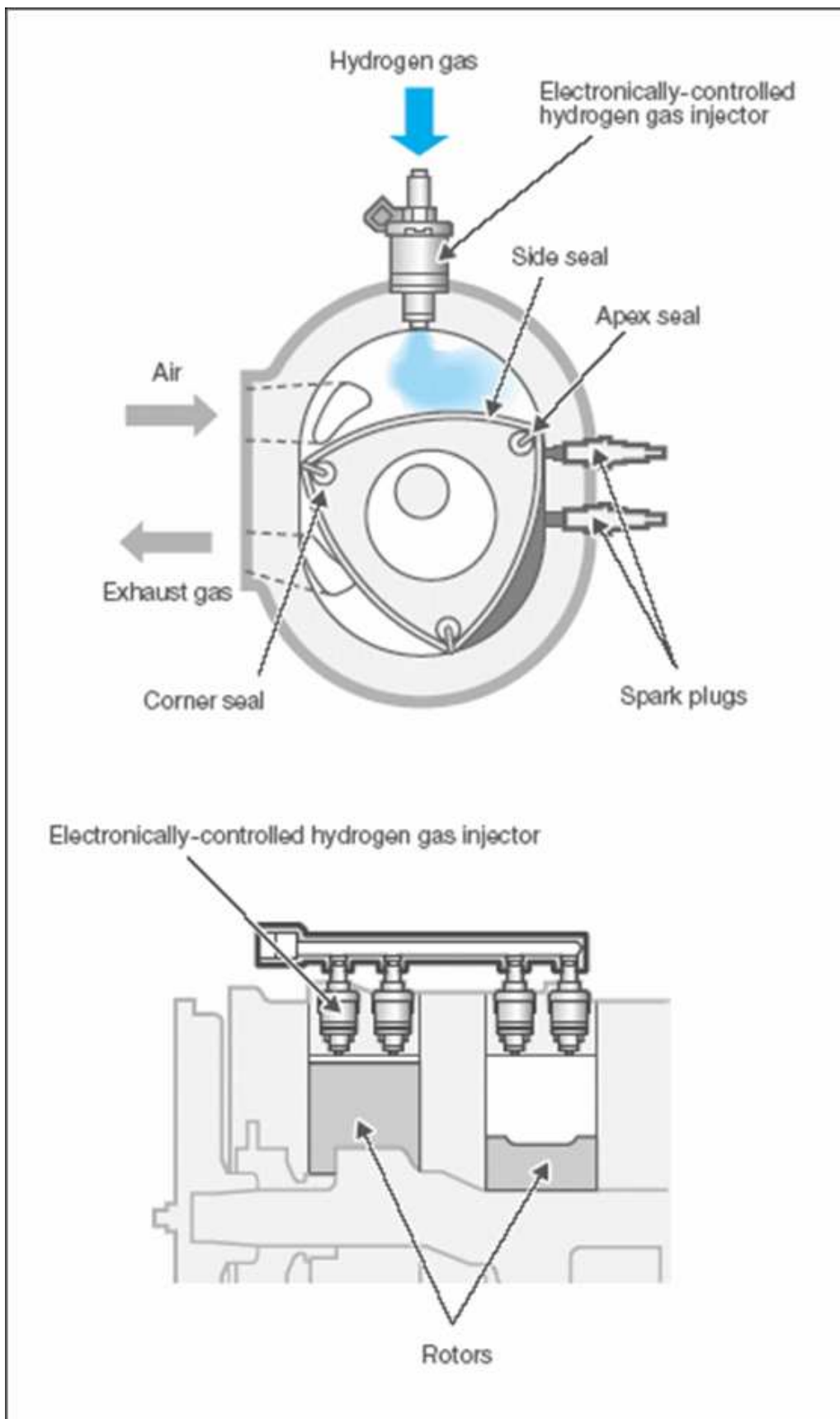
Seznam příloh

- Obrázek 1: Zobrazuje rozložení a) H_2 b) OH c) H_2O 0,25 ms po začátku vstříku vodíku do předkomůrky a následného výšlehu do polokulového prostoru v pístu.
- Obrázek 2: Schéma konstrukčního uspořádání dvourotorového Wankelova motoru Mazda pro spalování vodíku i benzínu

Přílohy



Obrázek 1: Zobrazuje rozložení a) H_2 b) OH c) H_2O 0,25 ms po začátku vstřiku vodíku do předkomůrky a následného výšlehu do polokulového prostoru v pístu. [18]



Obrázek 2: Schéma konstrukčního uspořádání dvourotorového Wankelova motoru Mazda pro spalování vodíku i benzínu [25].