



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO  
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE AUTOMOTIVE ENGINEERING

VODÍKOVÝ SPALOVACÍ MOTOR NA ZÁKLADĚ  
ZÁŽEHOVÉHO SPALOVACÍHO MOTORU  
HYDROGEN INTERNAL COMBUSTION ENGINE BASED ON SI ENGINE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

JIŘÍ ROUŠAR

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

doc. Ing. PAVEL NOVOTNÝ, Ph.D.



Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Akademický rok: 2014/2015

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Jiří Roušar

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

obor: **Stavba strojů a zařízení (2302R016)**

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:

### **Vodíkový spalovací motor na základě zážehového spalovacího motoru**

v anglickém jazyce:

#### **Hydrogen Internal Combustion Engine based on SI Engine**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Analyzujte současný stav spalovacích motorů s vnitřním spalováním vodíku. Popište výhody a nevýhody vodíkového motoru a porovnejte s konvenčními spalovacími motory. Navrhněte technicky možné úpravy existujícího zážehového spalovacího motoru.

Cíle bakalářské práce:

- 1) Vodíkový motor a jeho srovnání s konvenčními motory
- 2) Návrh konstrukčních úprav konvenčního motoru
- 3) Realizace
- 4) Závěr

Seznam odborné literatury:


- [1] STONE, Richard. Introduction to Internal Combustion Engines. 3rd edition. Hampshire: Palgrave, 1999. ISBN 0-333-74013-01999.  
[2] HEISLER, Heinz. Advanced Engine Technology. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002. ISBN 1-56091-734-2.  
[3] SKOTSKY, Alexander A. Automotive Engines. Springer Verlag, 2009, ISBN 978-3-642-00163-5.


Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Pavel Novotný, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/15.

V Brně, dne 21.11.2014



  
\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Václav Pištěk, DrSc.  
Ředitel ústavu

  
\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Jaroslav Kátolický, Ph.D.  
Děkan



## **ABSTRAKT**

Cíl bakalářské práce je porovnání vodíkového spalovacího motoru s konvenčními spalovacími motory, porovnání výhod a nevýhod vodíkového spalovacího motoru. Jsou představeny vlastnosti vodíku a jeho výroba, přeprava a skladování. Rešerše návrhů konstrukčních úprav konvenčního motoru na motor vodíkový. Součástí práce je realizace technicky možných úprav na konvenčním motoru.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Vodík, spalovací motor, vodíkový spalovací motor, elektrolýza

## **ABSTRACT**

The aim of the Bachelor thesis is comparing a hydrogen combustion engine with conventional combustion engines and comparing the advantages and disadvantages of the hydrogen combustion engine. The features of hydrogen are introduced, as well as its production, transportation and storage. The work contains a research of construction designs of a conventional engine modifications to the hydrogen engine. The realisation of technically possible modifications to the conventional engine is included in the thesis.

## **KEYWORDS**

Hydrogen, combustion engine, hydrogen combustion engine, electrolysis



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

ROUŠAR, J. Vodíkový spalovací motor na základě zážehového spalovacího motoru. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 65 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Pavel Novotný, Ph.D.



## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením pana doc. Ing. Pavla Novotného, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 02. května 2015

.....

Jiří Roušar



## **PODĚKOVÁNÍ**

Rád bych poděkoval svému vedoucímu práce panu docentu Pavlovi Novotnému za jeho odborné rady a konzultace. Dále bych chtěl poděkovat rodičům, kteří mě podporovali nejen při studiu, ale také při psaní této práce.





## OBSAH

Úvod .....	10
1 Vodík .....	11
1.1 Výroba vodíku .....	14
1.1.1 Parní reforming zemního plynu .....	15
1.1.2 Elektrolyza .....	16
1.1.3 Vysokoteplotní elektrolyza .....	17
1.1.4 Termochemické cykly .....	18
1.1.5 S-I cyklus .....	18
1.1.6 Hybridní termochemické cykly .....	19
1.1.7 Westinghouse proces .....	20
1.2 Vlastnosti vodíku .....	20
1.3 Skladování a přeprava vodíku .....	27
1.3.1 Konvenční skladování vodíku .....	27
1.3.2 Alternativní skladování vodíku .....	31
1.4 Přeprava vodíku .....	34
2 Spalovací motory s vnitřním spalováním vodíku .....	38
2.1 Vstřikování plynu do sacího potrubí .....	42
2.2 Výhody a nevýhody vodíkových motorů proti benzínovým .....	45
3 Současný stav spalovacích motorů s vnitřním spalováním vodíku .....	47
3.1 BMW .....	47
3.2 BMW H2R .....	48
3.3 Ford .....	49
3.4 Mazda .....	51
3.5 Vícedruhové spalování paliv .....	53
3.5.1 HHO vyvíječe .....	53
3.5.2 Electro hydrogen generátor .....	54
4 Návrh konstrukčních úprav konvenčního motoru .....	55
5 Realizace .....	57
5.1 Elektrolyzér .....	57
5.2 Spalovací motor .....	58
5.3 Provedené úpravy .....	59
6 Závěr .....	61
7 Použité informační zdroje .....	62
8 Seznam použitých zkratk a symbolů .....	65



## Úvod

Technický rozmach 20. století přinesl obrovský pokrok ve všech odvětvích lidské činnosti. Tato doba ovšem sebou přinášela zvyšující se nároky a požadavky společnosti na růst nákladní a osobní automobilové dopravy. Takto rozvíjející se trend sebou přinášel i vzrůstající nároky na těžbu ropy a produkty z ní, které se začaly navyšovat a po dlouhá léta zastávaly hlavní palivo pro spalovací motory. Ovšem nové vědecké studie začaly bít na poplach, neboť se začalo ukazovat, že ropa jako surovina není nevyčerpatelná. Taktéž koncentrace skleníkových plynů a škodlivin v ovzduší a zvyšující se cena ropy, začaly přivádět vědce s nástupem nového tisíciletí k hledání ekologičtějších zdrojů obnovitelné energie a podporu zelené politiky.

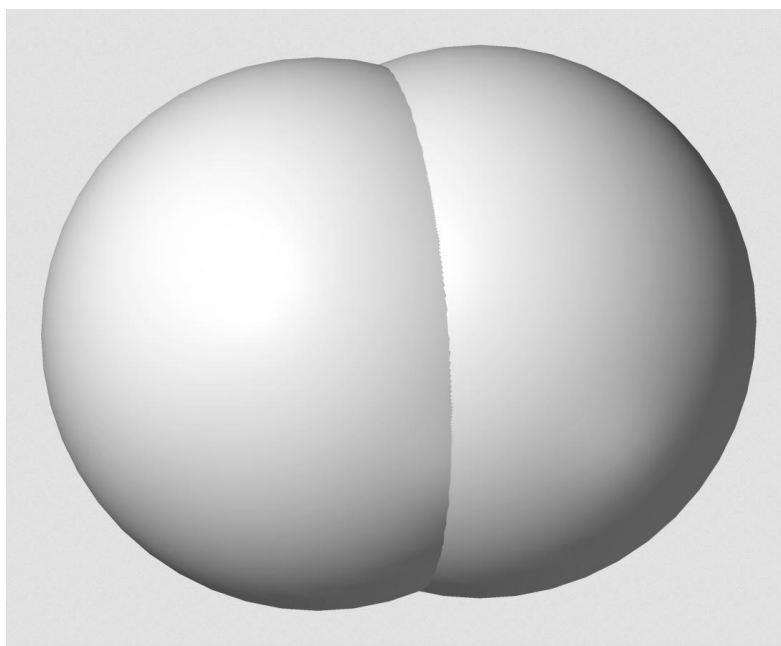
V současné době většina světových automobilek vyvíjí úsilí a investuje značnou část peněz do vývoje alternativních pohonných jednotek s tendencí zvyšování účinnosti zároveň při snižující se tendenci dopadu škodlivých látek na životní prostředí s alternativními palivy. Řadu alternativních paliv jako je propan-butan, různé druhy biopaliva a jiné komodity doplňuje také vodík, který je označován jako „palivo budoucnosti“. Elementární vodík se na zemi volně vyskytuje jen vzácně, ale dá celkem jednoduše získat například rozkladem vody, tedy elektrolýzou. Vezmeme-li v úvahu, že voda v podobě moře a oceánů pokrývá 2/3 povrchu země, stává se vodík takřka nevyčerpatelný zdroj energie. Doplněním informace, že při hoření vodíku s kyslíkem vzniká opět voda  $H_2O$ , dá se tedy s klidem říci, že vodík je opravdu nevyčerpatelný zdroj čisté energie. Důvodem proč se tedy už dávno nestal vodík hlavním palivem spalovacích motorů získaným například zmiňovanou elektrolýzou je ten fakt, že elektrolýza je velice energeticky nákladná. Vodík se dá získat i jiným způsobem, kdy je vodík dokonce druhotná surovina vznikající z technologického procesu průmyslových aplikací např. při výrobě chlóru a reformování benzínu. Dále ještě budou okrajově zmíněny jednotlivé způsoby výroby vodíku, jeho skladování a vlastnosti důležité pro jeho spalování.

V této práci je porovnán vodíkový motor s konvenčním motorem, výhody a nevýhody jednotlivých typů motorů, automobilky, které vyvíjí vodíkový motor ve svých vozidlech. Návrh technicky možných úprav konvenčního motoru pro vnitřní spalování vodíku s ohledem na bezpečnost a kritická místa vodíkového motoru. V další kapitole je popsána praktická zkouška konvenčního motoru spalující vodík a vícedruhových paliv jako benzín s vodíkem.



## 1 VODÍK

Vodík je bezbarvý, lehký plyn, bez chuti a zápachu. Je hořlavý, hoří namodralým plamenem, ale hoření nepodporuje. Je 14,38krát lehčí než vzduch a vede teplo 7krát lépe než vzduch. Vodík je za normální teploty stabilní, pouze s fluorem se slučuje za pokojové teploty. Je značně reaktivnější při zahřátí, především s kyslíkem a halogeny se slučuje velmi bouřlivě, i když pro spuštění této reakce je nutná inicializace (např. jiskra, která zapálí kyslíko-vodíkový plamen). Vodík je velmi málo rozpustný ve vodě, ale některé kovy ho pohlcují (nejlépe palladium). [1]



Obr. 1 Molekula vodíku [1]

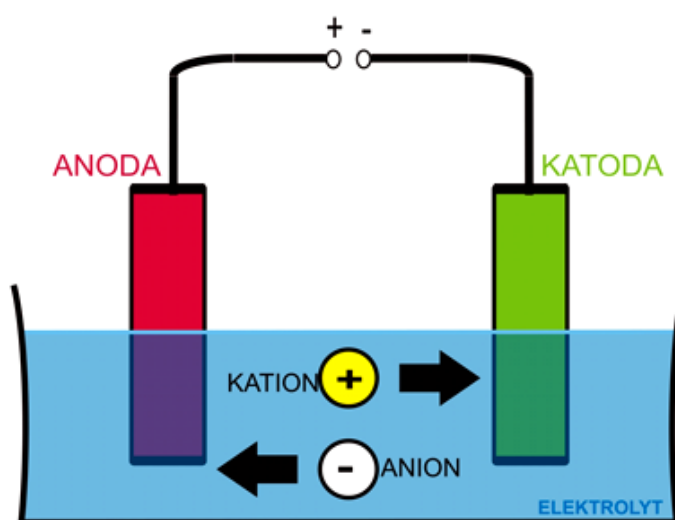
Vodík vytváří sloučeniny se všemi prvky periodické tabulky (s výjimkou vzácných plynů), zejména pak s uhlíkem, kyslíkem, sírou a dusíkem, které tvoří základní stavební jednotky života na Zemi.[1]

Vodík je schopen tvořit zvláštní typ chemické vazby, nazývaný vodíková vazba nebo také vodíkový můstek, kde vázaný atom vodíku vykazuje afinitu i k dalším atomům, s nimiž není poután klasickou chemickou vazbou. Mimořádně silná je vodíková vazba s atomy kyslíku, což vysvětluje anomální fyzikální vlastnosti vody (vysoký bod varu a tání atd.).[1]

Zajímavou vlastností vodíku je jeho schopnost „rozpouštět“ se v některých kovech, např. v palladiu nebo platině, které poté fungují jako katalyzátory reakcí. Je to způsobeno tím, že má vodík velmi malé molekuly, které jsou schopny procházet různými materiály.[1]

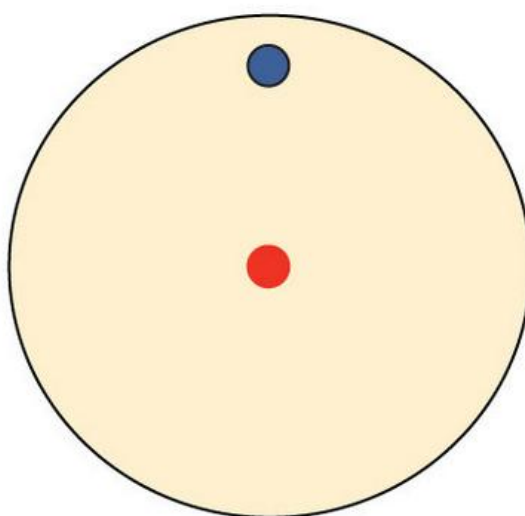


Vodík objevil roku 1766 Angličan Henry Cavendish, když si všiml, že při rozpouštění neušlechtilých kovů v kyselině vzniká bezbarvý, hořlavý plyn. V roce 1781 poznal také jako první, že voda je sloučeninou kyslíku a vodíku. Rozklad vody provedl poprvé Antoine Lavoisier v roce 1789 elektrolýzou.[1]



Obr. 2 Elektrolýza [2]

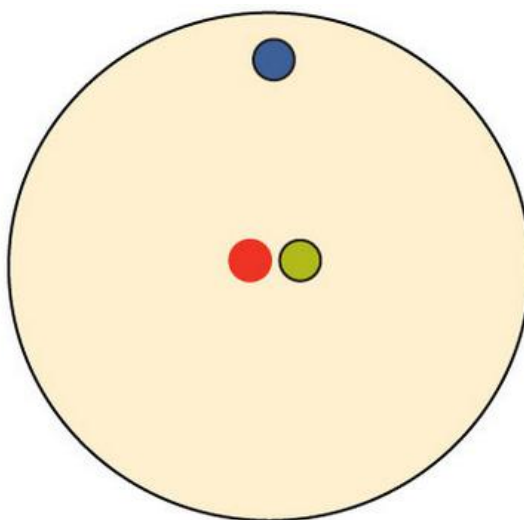
• **Vodík** - klasický atom vodíku (někdy nazývaný protium), tvořený jedním protonem a jedním elektronem. Tento izotop je nejjednodušší atom ve vesmíru a tvoří jeho převažující část [1].



Obr. 3 Model atomu vodíku [24]



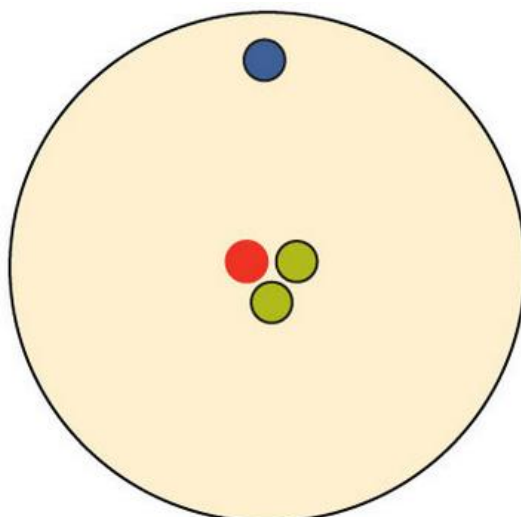
• **Deuterium** - atom s jádrem  $2\text{H}$ , který obsahuje v jádře jeden proton a jeden neutron a od běžného vodíku se liší především atomovou hmotností, která činí  $2,01363$  amu, se označuje jako deuterium. Někdy mu bývá přiřazována i chemická značka D, přestože se nejedná o jiný prvek. Deuterium je stabilní izotop, který nepodléhá radioaktivní přeměně. V přírodě se běžně vyskytuje namísto lehkého vodíku. V průměru připadá na jeden atom deuteria 7 000 atomů normálního vodíku. Ve spojení s kyslíkem tvoří deuterium tzv. těžkou vodu,  $\text{D}_2\text{O}$ . Tato sloučenina má významné využití v jaderném průmyslu. Je velmi účinným moderátorem, tedy látkou zpomalující rychlost neutronů [1].



Obr. 4 Model atomu deuteria [24]

• **Tritium** - jako tritium se označuje vodík  $3\text{H}$ , který má jádro složeno z jednoho protonu a 2 neutronů a bývá někdy označován chemickou značkou T. Jeho atomová váha má hodnotu  $3,01605$  amu. Na rozdíl od deuteria je jádro tritia nestabilní a rozpadá se s poločasem rozpadu 12,4 roku za vyzáření pouze málo energetického beta záření.

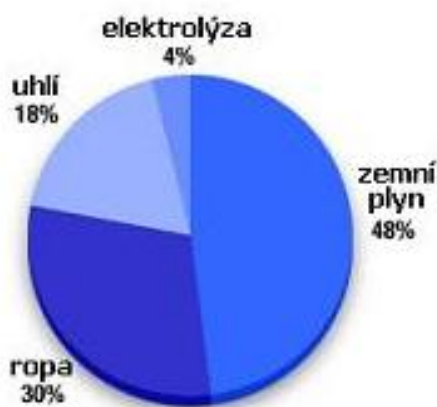
V přírodních podmínkách vzniká tritium především v horních vrstvách atmosféry při kolizi kosmického záření s jádrem atomu deuteria. Uměle je tritium získáváno v těžkovodních jaderných reaktorech při výrobě plutonia z přírodního uranu. Tritium slouží přitom jako jedna ze složek náplně termonukleární bomby, doposud nejničivějšího destruktivního prostředku, jaký člověk vyrobil. Tritium je také jedním ze základních meziproductů jaderné fúze, která je pokládána za energetický zdroj všech hvězd v pozorovatelné části vesmíru [1].



Obr. 5 Model atomu tritia [24]

## 1.1 VÝROBA VODÍKU

Vodík může být vyráběn mnoha způsoby z širokého spektra vstupních zdrojů. V celosvětové produkci vodíku dominuje v současné době výroba z fosilních paliv. Podrobněji viz následující obrázek.[3]



Obr. 6 Procesy a množství výroby vodíku z fosilních paliv. [3]

Využívání takto vyrobeného vodíku může pomoci lokálně snížit produkci některých zdraví poškozujících látek, globálně by však vedlo pouze k méně hospodárnému využívání primární energie a s tím souvisejícímu nárůstu produkce oxidu uhličitého.[3]

Další možností je výroba vodíku z obnovitelných zdrojů. Z nich se vodík získává pomocí elektrolýzy vody, vysokoteplotního rozkladu vody anebo zplyňováním či pyrolýzou biomasy.



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

Hlavním motorem rozvoje vodíkového hospodářství je nalezení alternativy k využívání fosilních paliv a to především v dopravním sektoru. Výroba vodíku pro tyto účely z fosilních paliv by proto byla z výše uvedených důvodů neobhajitelná.

Každý den je na světě vyprodukováno přibližně 1,4 mld. Nm<sup>3</sup>, neboli 127 tis. tun vodíku.

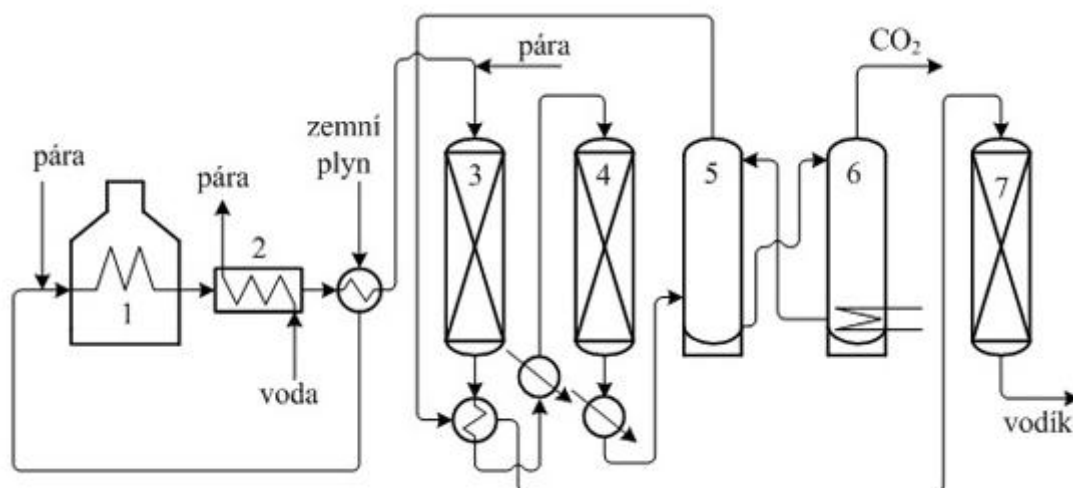
### **Stručný přehled nejrozšířenější technologie výroby vodíku**

#### **1.1.1 PARNÍ REFORMING ZEMNÍHO PLYNU**

Tato technologie je v současnosti nejlevnějším a nejrozšířenějším způsobem výroby vodíku. Teplo pro reformní reakci i následnou konverzi oxidu uhelnatého je dodáváno z přímého spalování části zemního plynu.



Obr. 7 Procesy a množství výroby vodíku z fosilních paliv.[3]



Obr. 8 Schéma parního reformování zemního plynu (1 - pec, 2 - kotel na výrobu páry, 3 - vysokoteplotní konvertor CO, 4 - nízkoteplotní konvertor CO, 5 - absorbér CO<sub>2</sub>, 6 - desorbér CO<sub>2</sub>, 7 - metanizér)[4]

Proces má dvě fáze; v první se za přítomnosti katalyzátoru do vodní páry (500 - 950°C, 0,3 - 2,5 MPa) přivádí metan (dominantní část zemního plynu). Směs metanu a páry reaguje za vzniku vodíku a oxidu uhelnatého a menšího podílu oxidu uhličitého. Reakce probíhá za výše zmíněných teplot a tlaků v reforméru. Poté následuje navýšování množství produkovaného vodíku konverzí CO z reforméru s další přidanou párou. Reakce probíhá již za nižších teplot.

1. reformní reakce:  $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$
2. konverze CO:  $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$

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 CO<sub>2</sub>.

### 1.1.2 ELEKTROLÝZA

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

1.  $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$

H<sup>+</sup> 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 vyrobeny asi 4 % z celkové světové produkce vodíku.





Obr.9 Elektrolýzér [3]

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 %. Výstupem elektrolýzy je kyslík a vysoce čistý vodíkový plyn, pro většinu aplikací 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, 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 elektrolýzérovi a vysoké ceny el. energie.

Na celkové účinnosti elektrolytické výroby vodíku se podílí především účinnost výroby elektrické energie (30 - 40 % pro konvenční zdroje). Celková účinnost elektrolýzy se tedy pohybuje přibližně v rozmezí 25 - 35 %. [3]

### 1.1.3 VYSOKOTEPLTNÍ ELEKTROLÝZA

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



Výhodou je zvýšení účinnosti procesu díky snížené spotřebě elektrické energie a snadnějšímu překonání aktivační bariéry na povrchu elektrody. Při růstu teploty vstupní páry klesá spotřeba elektrické energie. Celková energie mírně roste, což je způsobeno právě nutným ohřevem páry. Další výhodou spočívá v cirkulaci samotných H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub> a O<sub>2</sub> bez jiných chemických látek, což odstraňuje problémy s korozi.

Celková účinnost vysokoteplotní elektrolýzy může dosahovat až 45 %.

#### 1.1.4 TERMOCHEMICKÉ CYKLY

Termochemické cykly jsou známy již více jak 35 let; intenzivně byly studovány na přelomu 70. a 80. let 20. století (v době ropné krize, tedy v době hledání ekonomické výroby alternativních paliv).

Při termochemickém štěpení vody je voda rozdělena na kyslík a vodík pomocí série chemických reakcí, které jsou iniciované teplem nebo v případě hybridních cyklů teplem a elektrickou energií. Cykly popisované níže jsou cykly uzavřené, tj. použité chemické látky jsou v průběhu reakcí recyklovány a znovu vstupují do procesu. Doplněnou vstupní surovinou je tedy pouze voda a výsledným produktem vodík a kyslík. [3]

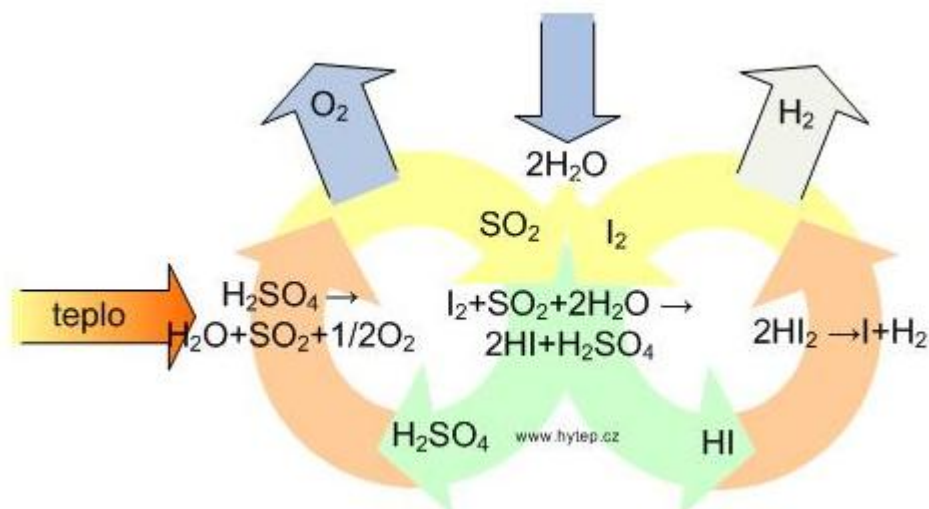
#### 1.1.5 S-I CYKLUS

Sířičito-jódový termochemický cyklus byl vyvinut v General Atomics (San Diego, USA) v polovině 70. let 20. století. Je předním kandidátem levné a účinné výroby vodíku pomocí jaderné energie.

Vstupní surovinou je pouze voda a vysokopotenciální teplo; výstupními surovinami jsou kyslík s vodíkem a nízkopotenciální teplo. Všechny vstupní suroviny jsou tekuté. Jód a oxid siřičitý se recyklují a opětně používají, teoreticky se tedy neprodukuje žádný odpad (ve skutečnosti samozřejmě k určitým ztrátám dochází a je nezbytné tyto ztráty kompenzovat doplňováním chemických látek). Při produkci vodíku probíhají tyto termochemické reakce:

1.  $I_2 + SO_2 + 2H_2O \rightarrow 2HI + H_2SO_4$  (120° C)
2.  $H_2SO_4 \rightarrow SO_2 + H_2O + 1/2O_2$  (800 - 1000° C)
3.  $2HI \rightarrow I_2 + H_2$  (300 - 450° C)

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



Obr. 10 Siřičito-jódový termochemický cyklus [3]

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

Oproti elektrolýze má vyšší účinnost, protože nedochází ke ztrátám při výrobě elektrické energie.

Nevýhoda tohoto cyklu je požadavek vysokých vstupních teplot a agresivita kyseliny sírové a jodovodíkové, což vede k vysokým nárokům na chemickou odolnost použitých materiálů. Problematická bude kontrola podmínek reakcí v průmyslovém měřítku (v laboratorních podmínkách byla tato otázka již zvládnuta). [3]

### 1.1.6 HYBRIDNÍ TERMOCHEMICKÉ CYKLY

Hybridní termochemický proces kombinuje termochemický cyklus a elektrolytické štěpení vody. Obecně se mohou hybridní cykly jevit jako nekonkurenceschopné kvůli potřebě elektrické energie a vysokým investičním nákladům na elektrolyzátor. Na druhou stranu s využitím elektřiny umožňuje hybridní cyklus chod nízkoteplotních reakcí a snižuje se počet chemických kroků (ty mohou zanechávat nečistoty ve vyrobeném vodíku a zvyšovat tak náklady na dodatečné čištění). [3]



### 1.1.7 WESTINGHOUSE PROCES

Westinghouse proces, nebo také hybridní cyklus kyseliny sírové, byl vyvinut společností Westinghouse v roce 1975; další výzkum probíhá v Research Center Jülich ve spolupráci s JRC Ispra.

Do reakce vstupuje voda a oxid siřičitý a za přispění elektrické energie vzniká vodík a kyselina sírová, která se dalšími reakcemi rozpadá na vstupní suroviny a kyslík. Westinghouse proces se tedy skládá z těchto chemických reakcí:

1.  $2\text{H}_2\text{O} + \text{SO}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2$  ( $80^\circ\text{C}$ , elektřina)
2.  $\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{SO}_3$  ( $450^\circ\text{C}$ )
3.  $\text{SO}_3 \rightarrow \text{SO}_2 + 1/2\text{O}_2$  ( $800^\circ\text{C}$ )

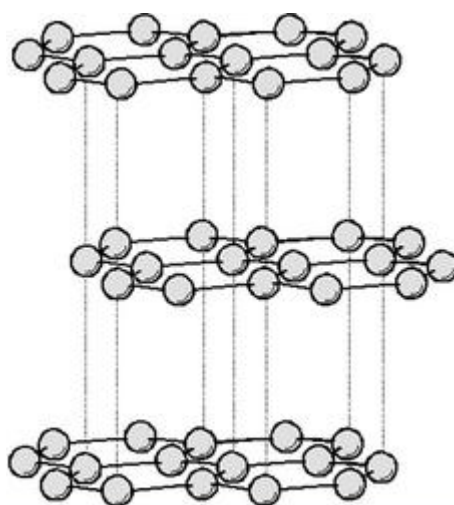
Účinnost tohoto procesu je okolo 40 %. Výhodou cyklu je 3 - 4x nižší potřeba elektrické energie než při elektrolytickém štěpení vody. Jedná se o nejjednodušší ze skupiny sírových procesů (ne nutně nejučinnější). Mezi nevýhody se řadí velké korozní problémy působené kyselinou sírovou. [3]

### 1.2 VLASTNOSTI VODÍKU

Vodík je nejlehčím, nejjednodušším a nejrozšířenějším prvkem vyskytujícím se v přírodě na Zemi i ve vesmíru. Pro zážehové motory automobilů spalující vodík jsou podstatné následující vlastnosti:

Přehled fyzikálně-chemických vlastností	
Krystalová struktura	šesterečná
Teplota tání	14,025 K
Teplota varu	20,268 K
Molární objem	$11,42 \cdot 10^{-6} \text{m}^3$ ( $1/2$ mol $\text{H}_2$ při 2 K)
Tlak nasycené páry	209 Pa při 23 K
Rychlost zvuku	1270 m/s při 298,15 K
Měrná tepelná kapacita	14304 J/(kg K)
Tepelná vodivost	0,1815 W/(m K)
Spalné teplo vodíku	72 kJ/mol
Výhřevnost	59,775 kJ/mol

Tab. 1 Fyzikální vlastnosti vodíku [6]



Obr. 11 Krystalová struktura vodíku [6]

- vysoká výhřevnost
- nízká hustota
- široký rozsah hořlavosti
- nízká iniciační energie
- malá vzdálenost hašení
- vysoká teplota samovznícení
- vysoká rychlost šíření plamene
- vysoká difuzivita

### Vysoká výhřevnost

Významná vlastnost vodíku je jeho výhřevnost, která se u plynů vyjadřuje:

- jako energie získaná z jednoho kilogramu (v případě vodíku  $119\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ )
- nebo uvolněná energie z jednoho  $\text{m}^3$  (pro vodík  $10,7\text{MJ}\cdot\text{m}^3$ )

Pro srovnání s výhřevností benzínu ( $44,5\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) je výhřevnost vodíku téměř třikrát větší.

### Nízká hustota

Vodík má velice nízkou hustotu ( $0,0899\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ), která způsobuje problémy při použití pro pohon automobilů.

I když má vodík téměř třikrát větší výhřevnost z jednotky hmotnosti než benzín, kvůli velmi nízké hustotě, stoupá jeho spotřeba. Na dosažení srovnatelného výkonu s motorem spalující benzín, by měl mít vodíkový motor větší zdvihový objem.



---

K dosažení dostatečného jízdního dosahu automobilu spalující vodík, je nutno z důvodu kombinace nízké hustoty a vyšší spotřeby vodíku vybavit automobil nádrží, která je schopná uchovávat velké množství vodíku.

### **Široký rozsah hořlavosti**

Ve srovnání s ostatními palivy má vodík širokou oblast, ve které je hořlavý. Díky tomu lze vodík spalovat v širokém rozmezí poměru vzduch/palivo (v angličtině air/fuel ratio-A/F ratio) a tedy i jako velmi chudou směs. Chudá směs je taková, ve které je A/F ratio větší než ideální. To umožňuje značnou úsporu paliva ve chvíli, kdy není požadován velký výkon.

Navíc dochází k poklesu spalovacích teplot a tím se značně omezí vznik emisí, jako například oxidů dusíku (NO<sub>x</sub>). Jedná se o velmi ekologický chod motoru. Chudá palivová směs umožňuje snadný start motoru. Při příliš chudé směsi dochází z důvodu poklesu spalovacích teplot nejen ke ztrátě výkonu ale i k značně nestabilnímu spalování. Tyto jevy lze do jisté míry ovlivnit konstrukcí spalovacího prostoru.

### **Nízká iniciační energie**

Vodík má o řád menší energii nutnou k zapálení směsi než například benzín (0,02mJ oproti 0,29mJ). Díky tomu je možné spalovat velmi chudou směs a ke vznícení směsi dochází téměř okamžitě.

Nízká iniciační energie ale s sebou přináší také značné komplikace. Velkým problémem je předčasné zapálení směsi od rozžhavených částí motorů, například od výfukového ventilu, nebo od zbytkových spalin. Může přitom také nastat tzv. zpětný zášleh přiváděného paliva. Řešení problémů způsobených nízkou iniciační energií vodíku je jednou z velkých výzev při konstrukci vodíkového spalovacího motoru.

### **Malá vzdálenost hašení**

Vodík má oproti benzínu menší vzdálenost hašení (0,64mm), což je vzdálenost od povrchu válce, při které dochází k uhašení plamene. Stěna válce se více tepelně namáhá. Zvyšuje se tím riziko zpětného zášlehu do sacího potrubí.



---

## **Vysoká teplota samovznícení**

Díky vysoké teplotě samovznícení lze použít vysoký kompresní poměr. Směs vodíku a vzduchu lze stlačit více než směs benzínu a vzduchu u konvenčních motorů, aniž by došlo k předčasnému samovznícení paliva. Dosáhneme tím lepší tepelné účinnosti cyklu a tím i vyššího výkonu motoru. Vysoká teplota samovznícení však na druhou stranu značně omezuje použití vodíku jako paliva pro vznětové motory.

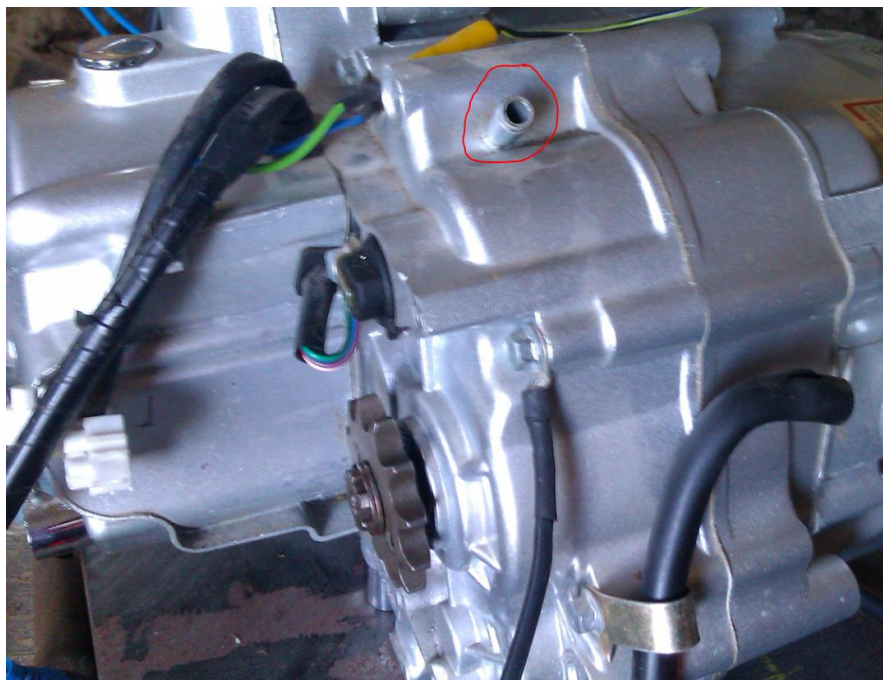
## **Vysoká rychlost šíření plamene**

Oproti benzínu je rychlost šíření plamene při spalování vodíku řádově vyšší, což celý proces spalování přibližuje k termodynamicky ideálnímu cyklu motoru. Zvyšuje se tak termodynamická účinnost cyklu. Při spalování chudé směsi rychlost šíření plamene znatelně klesá.

## **Vysoká difuzivita**

Vodík má velmi vysokou difuzivitu, která je způsobena velmi malou velikostí molekul vodíku. Schopnost vodíku rozptýlit se ve vzduchu je podstatně větší než u benzínu a je výhodná ze dvou důvodů. Za prvé usnadňuje tvorbu homogenní směsi paliva a vzduchu, což s sebou přináší lepší hoření směsi. Za druhé, pokud dojde k úniku vodíku do okolního prostředí, vodík se rychle rozptýlí do okolí a nedojde k ohrožení cestujících. Vysoká difuzivita s sebou přináší i komplikace. Způsobuje například vodíkovou křehkost materiálů, zapříčiněnou pronikáním vodíkových molekul do některých kovových materiálů. Je tedy nutné použití speciálních materiálů, které jsou vůči tomuto jevu imunní. Vodík kromě vodíkové křehkosti způsobuje také oduhličení oceli, a to při vyšších tlacích a nižších teplotách. Dochází ke snížení pevnosti oceli a její houževnatosti.

Vodíkový spalovací motor musí mít dobře řešen odvětrávací systém prostoru klikového hřídele z důvodu pronikání vodíku netěsnostmi mezi stěnami pístu a válce do prostoru klikového hřídele a neznehodnocoval vlastnosti mazacího oleje.



Obr. 12 Odvětrávací otvor klikového prostoru.

Vodík je 14krát lehčí než vzduch, což se ukázalo při destrukci nádrže, že vodík stoupá díky své nízké hustotě velmi rychle vzhůru a případný požár vzniká ve větší míře vně vozidla. K zvýšení bezpečnosti paradoxně přispívá i menší množství paliva skladovaného ve vozidlech. Bezpečnost se dá dále zvýšit vhodným umístěním skladovací nádrže (například na střechu).



Obr. 13 Ukázka testu úniku vodíku ve srovnání s benzínem. [3]



## Vodíková křehkost

Vodíková křehkost je nejzávažnějším problémem působením vodíku na kovové díly. Vodíková křehkost je pro funkci namáhaných dílů velmi nebezpečnou vlastností a je nutné na toto nebezpečí pohlížet s respektem, předcházet mu a pravidelně sledovat možný zhoršující trend zvyšování navodíkování namáhaných dílů.

Vodíková křehkost je způsobena atomy vodíku, které difundují do povrchů kovů nebo jejich slitin. Převýší-li obsah vodíku hranici rozpustnosti v dané slitině, dojde k jeho nahromadění v určitých místech, například na rozhraní mezi dvěma fázemi v pórech a podobně. Při působení vnějšího namáhání pak tato místa mohou iniciovat vznik trhlin. K pronikání vodíku do materiálu napomáhá vliv napětí dílů, tepelné změny a především pak rychlé změny teploty. Při těchto faktorech je vodík uvězněn v pórech, v trhlinách a shromažďuje se. Vzniká tzv. „vodíková pasta“. Při vytvoření molekuly vodíku vzrůstá vnitřní napětí a dochází tak ke zvětšování trhliny. V kritickém případě dochází k iniciaci lomu. K vodíkové křehkosti značně přispívá přítomnost některých látek v prostředí, především pak vody, vlhkosti, vodní páry nebo  $\text{CO}_2$ . Rozkladem vody či uhlovodíků vznikající vodík může poté pronikat do pórů, skulin či trhlin v povrchových vrstvách dílu.



Obr. 14 Víko bubleru, účinek vodíku s vodou na nerezový materiál.



Vodíková křehkost na díl nepříznivě působí i při vytváření jeho povrchové úpravy. Při elektrochemickém vylučování povlaků dochází vždy v určité míře na katodě k vývinu vodíku v elektrolytu. Volný vodík, v atomární nebo protonické formě, rychle proniká do některých kovů, které jsou k tomu náchylnější a podstatně ovlivňuje jejich vlastnosti.

Studium katodického navodíkování ukazuje, že při některých typech elektrolytického pokovování dochází k rychlému a intenzivnímu navodíkování vylučovaného povlaku. Studium navodíkování dále ukazuje, že intenzivní navodíkování vzniká v nejpovrchovějších oblastech oceli (řádově v mikrometrech). V praxi při elektrolytickém vylučování kovů k vodíkové křehkosti může docházet zpravidla z porušení technologické kázně.

Nesprávné nastavení proudové hustoty znamená zvýšený vývin vodíku na katodě. Taktéž hraje důležitou roli v boji proti nadměrnému vývinu vodíku správné složení lázně. Například u kyanidových lázní je silný vývin plynů způsoben přebytkem volného kyanidu. Dalším možným místem v galvanickém procesu, kde může docházet k nebezpečnému vnikání vodíku do povrchu dílů je nesprávné užívání elektrolytické odmašťovací lázně. Při katodickém cyklu odmašťování se na katodě vyvíjí dvojnásobné množství vodíku než na anodě kyslíku. Správný cyklus by měl být nastaven například 20 vteřin anodické a 10 vteřin katodické odmaštění. Cyklus odmašťování musí vždy končit na anodě.

Nejen při elektrolytických procesech se do dílu může dostat vodík a způsobit tak vodíkovou křehkost. Daleko kritičtějším místem je oblast kyselinového moření, dekapování či procesu, kde díl je ponořen v kyselinách. Opět na povrchu dílu dochází k uvolňování vodíku. V neprospěch moření mluví i dlouhé doby ponoru při snaze odstranit silné vrstvy okují a rzi.

U vysokopevnostních dílů je tedy při těchto procesech nezbytné okamžitě po ukončení procesu, kdy dochází k navodíkování povrchu, díly podrobit tepelné operaci – odvodíkování, která umožní samovolnému úniku vodíku z povrchu dílu. Účinnost procesu odvodíkování, potažmo i schopnost galvanického procesu povrch dílu navodíkovat, je nutné pravidelně sledovat. K tomuto sledování existuje několik možných mechanických zkoušek. Vliv vodíku na mechanické vlastnosti dílů se tedy nesmí podceňovat a je zapotřebí při celém procesu výroby vysokopevnostních dílů dbát na dodržování technologické kázně, správném složení procesních lázní a hlídání jejich kontaminací nepříznivými nečistotami. Totéž platí o dodržování povolených časů ponorů při moření v kyselinách. [5]



### 1.3 SKLADOVÁNÍ A PŘEPRAVA VODÍKU

Vývoj bezpečného, cenově dostupného a energeticky efektivního způsobu uskladnění vodíku je klíčový pro budoucnost vodíkových technologií a palivových článků. Vodík má ze všech paliv nejmenší hustotu a nejnižší bod varu, což značně komplikuje jeho skladování.

Technologie pro skladování vodíku můžeme dle stupně výzkumu a vývoje v zásadě rozdělit na konvenční a alternativní. Ke konvenčním technologiím patří především tlakové nádoby pro plynný vodík a kryogenní nádoby pro zkapalněný vodík. Zástupcem alternativních technologií je např. skladování vodíku v metalydridech, komplexních hydridech, v nanostrukturách uhlíku a jako součást chemických látek.

Abychom mohli porovnat 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 systému, obvykle se udává v procentech [%hm], (v anglické literatuře je označována jako gravimetric density).

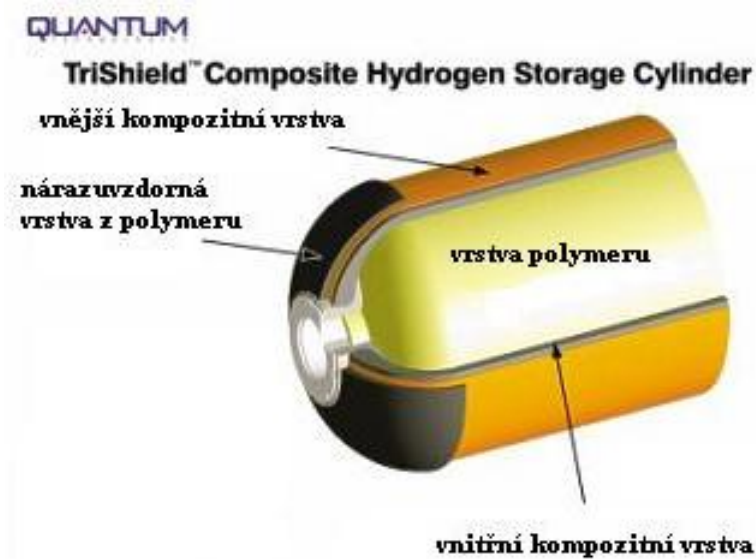
Další parametr - objemová kapacita - je definována jako poměr hmotnosti vodíku k objemu systému, jednotkou je  $\text{kgH}_2/\text{m}^3$  příp.  $\text{gH}_2/\text{l}$  (v anglické literatuře je označován jako volumetric density).

Různá paliva mají různé hodnoty výhřevnosti. Pokud tedy porovnáváme systémy s různými palivy je vhodnější místo objemové kapacity sledovat parametr hustota energie, jednotkou je  $\text{kWh/l}$  popř.  $\text{kJ/l}$ .

#### 1.3.1 KONVENČNÍ SKLADOVÁNÍ VODÍKU

##### Skladování v plynné fázi

Pro statické aplikace se obvykle používá ocelových bezešvých lahví z nízkouhlíkaté nebo legované oceli. Vyrábějí se v objemech od několika litrů až do přibližně 50 l pro běžné aplikace. V mobilních aplikacích se obvykle používá kompozitních tlakových nádob. Vyrábějí se v objemech od desítek litrů až přibližně do 300 l. Typickým provozním tlakem je 350 bar, v nejnovějších aplikacích potom 450 až 700 bar (současný technologický limit je 1000 bar). V mnoha aplikacích je válcový tvar mírně deformován v závislosti na potřebách zástavby do úložného prostoru vozidla. Vnitřní povrch kompozitních lahví tvoří obvykle tenká vrstva kovu případně speciálního polymeru, která zabraňuje úniku plynu přes strukturu kompozitu.

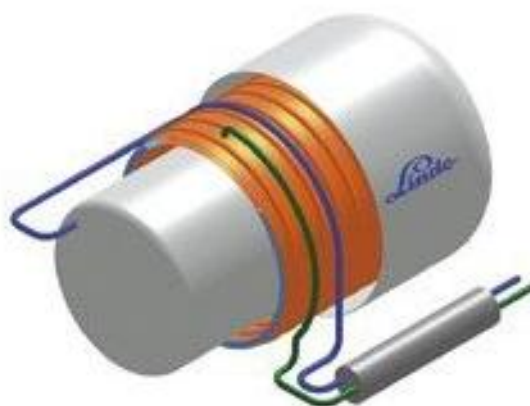


Obr. 15 Tlaková láhev pro uskladnění vodíku [7]

Pokud má být vodík skladován ve vysokotlakých nádržích, musí být nejprve stlačen na požadovaný tlak. Pro stlačování vodíku se používá zejména pístových kompresorů. Energie potřebná na stlačení vodíku na 350 bar dosahuje přibližně 30 % energie v palivu.

### Skladování vodíku v kapalně fázi

Běžně využívaná fosilní paliva je možné skladovat v kapalném stavu za běžných teplot a při relativně nízkých tlacích, oproti tomu kapalný vodík je skladován při teplotě  $-253\text{ °C}$ ; s tím souvisejí zvýšené nároky na použité materiály a vysoké energetické nároky na zkapalnění.



Obr. 16 Nádrž pro kapalný vodík [7]



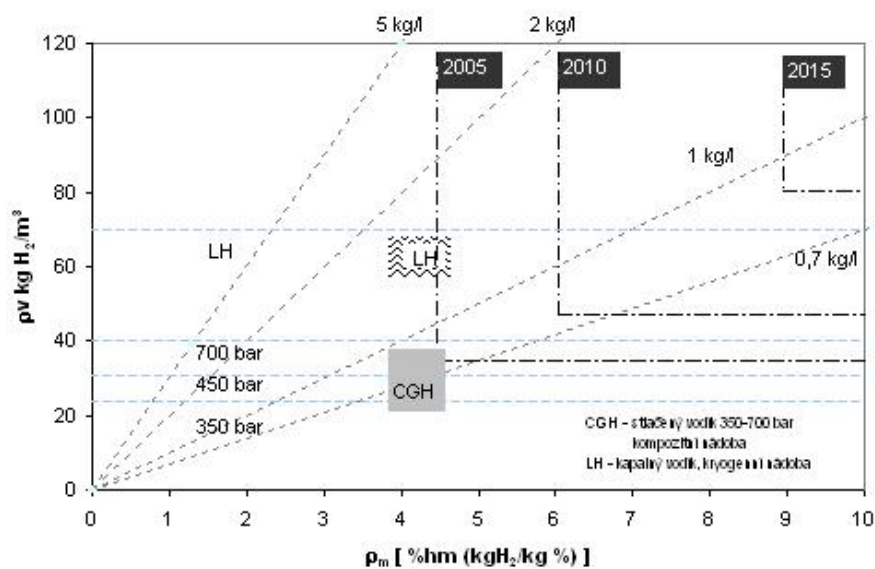
Obr. 17 Nádrž pro kapalný vodík [7]

Pro uskladnění se používají vícevrstvé nádoby s velmi dobrými izolačními vlastnostmi s maximálním přetlakem 5 barů. Tyto nádoby musejí být vybaveny přetlakovým mechanismem, kterým je regulován maximální přípustný přetlak. Při skladování vodíku v kryogenních nádobách dochází vlivem přestupu tepla z okolí k postupnému odpařování a tedy zvyšování tlaku uvnitř této nádoby. Aby nedošlo k destrukci nádrže, musí být přebytečný tlak regulován odpouštěním odpařeného vodíku. Pro běžně používané nádrže dosahují ztráty až 3 % z obsahu na den. V některých aplikacích je takto unikající vodík jímán a stlačován do přídatných tlakových lahví.

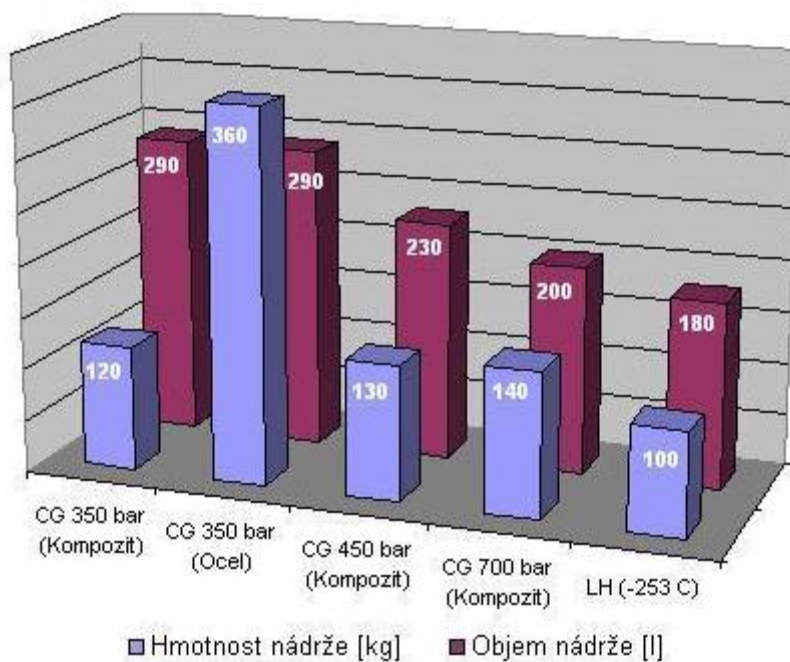
Zkapalňování vodíku je technologicky i energeticky náročný proces. Energie potřebná ke zkapalnění dosahuje přibližně 40 % energie v palivu. [7]

Proces zkapalňování vodíku se využívá nejčastěji Claudova procesu, který lze popsat v následujících krocích:

- Stlačení vodíku a odvedení kompresního tepla
- Předchlazení kapalným dusíkem
- Expanze v expanzní turbíně a s tím spojené ochlazení
- Expanze na Joule-Thomsově ventilu



Obr. 18 Hmotnostní a objemové kapacity současných skladovacích systémů [7]



Obr. 19 Hmotnostní a objemové parametry pro plnou nádrž, která je schopna pojmout 6 kg H<sub>2</sub> [7]

Vozidlu s dojezdem 500 km bude odpovídat přibližně čtyřikrát až šestkrát objemnější nádrž oproti vozidlu spalující benzín a dvakrát až třikrát vyšší hmotnost nádrže (v případě ocelových lahví až sedmkrát).



Konveční způsoby skladování vodíku jsou bezpečné a lety provozu ověřené systémy, jejich technologický potenciál je však téměř vyčerpán. Hmotnostní kapacita je závislá především na materiálu skladovací nádoby, vhodným materiálem tedy můžeme tento parametr mírně zlepšit. Naproti tomu objemová kapacita je závislá na skladovacím tlaku a teplotě vodíku (dolní limit určuje hustota zkapalněného vodíku) a je limitující pro oba tyto systémy. Energie potřebná ke stlačení a zkapalnění se pohybuje v rozmezí 20 - 40 % z LHV vodíku dle způsobu uskladnění.

### 1.3.2 ALTERNATIVNÍ SKLADOVÁNÍ VODÍKU

#### Hydridy

Systémy skladování vodíku v hydridech jsou založeny na principu absorpce vodíku do materiálů na bázi kovů. Jedná se o exotermní reakci, tzn. že je při absorpci 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 absorbátoru a v neposlední řadě cena a složitost systému. Podskupinou hydridů jsou metalhydridy (v angl. lit. označované také jako *Conventional Hydrides*) a komplexní hydridy.

#### Metalhydridy

U sloučenin s lehkými kovy, jako je například magnesium, vychází celková hmotnost systému pouze o 30 % vyšší oproti systému skladující kapalný vodík. Tyto příznivé parametry kompenzuje potřeba vysoké desorpční teploty, nízký tlak produkovaného vodíku a v neposlední řadě vysoká cena hydridu.

Parametr	Nízkoteplotní MeHydridy		Vysokoteplotní MeHydridy	
	FeTi-H <sub>2</sub>	LaNi <sub>5</sub> -H <sub>6,7</sub>	Mg <sub>2</sub> Ni-H <sub>4</sub>	Mg-H <sub>2</sub>
Teplota desorpce 1,5 bar [°C]	7	21	267	296
Teoretická reverz. hm. podíl [%hm.]	1,3	1.1	2.63	5
Objemová hustota [gH <sub>2</sub> /l]	115	117	100	110

Tab. 2 Užití nejčastějších metalhydridů včetně vybraných parametrů. [8]

Z tabulky je patrné, že objemová kapacita systémů s metalhydridy je ve srovnání s konvečním způsobem skladování velmi vysoká (až 110 gH<sub>2</sub>/l u Mg-H<sub>2</sub> oproti 71 g/l pro LH<sub>2</sub>).

## Alanáty

Alanáty se řadí mezi reverzibilní komplexní hydridy, jsou to sloučeniny na bázi hliníku. V následující tabulce jsou uvedeny nejčastěji studované alanáty včetně hmotnostních a objemových ukazatelů.

Z předcházející tabulky je patrné, že alanáty velmi vysokou hmotnostní i objemovou kapacitu. Limitující je poměrně vysoká cena hydridu a vysoká desorpční teplota (nad 150 °C).

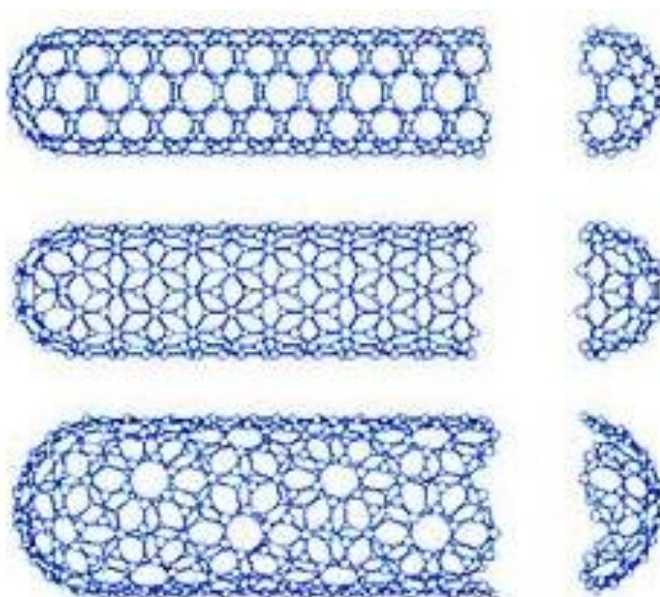
## Uhlíkaté struktury

Mezi uhlíkaté nanostruktury řadíme vysokoporézní grafit a uhlíkaté nanotrubičky. 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.

## Uhlíkové nanotrubičky

Uhlíkaté nanotrubičky jsou známy již více než deset let. Základním stavebním prvkem nanotrubic je grafit. Grafit je forma uhlíku s atomy tvořícími šestiúhelníkovou krystalovou mříž.

Nanotrubičky jsou tvořeny jednou příp. několika vrstvami stočenými do trubice konečné délky, mohou být zakončené polovinou fullerenu. Průměr trubic se pohybuje od 0,7 - 3 nm.



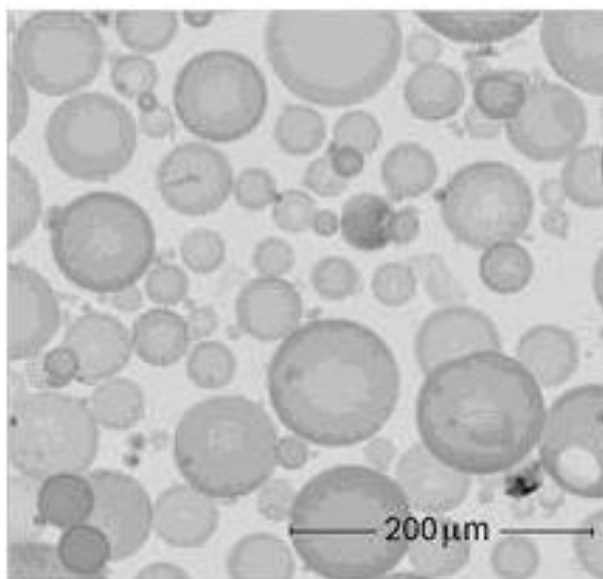
Obr. 20 Uhlíkové nanotrubičky [8]



## Skleněné mikrokuličky

Skleněné mikrokuličky jsou duté kuličky z křemitého skla, MgAlSi skla, polyamidu, atd. Typické rozměry jsou 25 - 200  $\mu\text{m}$  při tloušťce stěny 0,5 - 20  $\mu\text{m}$ . Mohou být plněny plynným vodíkem až do přetlaku 100 MPa. Plnění probíhá mechanismem difúze molekul vodíku skrze stěnu při zvýšené teplotě (200  $^{\circ}\text{C}$ ) a vysokém tlaku. Uvolňování vodíku je dosaženo opětovným zvýšením teploty. Hmotnostní kapacita se pohybuje do 15 % hm. při 700 barech, objemová kapacita do 20  $\text{gH}_2/\text{l}$ .

Skleněné mikrokuličky naplněné vodíkem je možné čerpat do nádrže podobně jako tekutinu. Prázdné mikrokuličky mohou být poté opět odčerpány a znovu plněny. Skladování vodíku ve skleněných mikrokuličkách je ve stádiu výzkumu a vývoje a v současnosti není známa žádná komerční realizace.



Obr. 21 Skleněné mikrokuličky [8]

V některých aplikacích se začínají prosazovat skladovací systémy na bázi Metalhydridů, limitujícím faktorem je vysoká cena a vyšší hmotnost těchto systémů.

Poměrně vyspělou technologií se v současné době jeví také systém na bázi  $\text{NaBH}_4 + \text{H}_2\text{O}$ . Teoreticky může být pro tuto reakci použita vodní pára, která vzniká jako produkt spalování vodíku v PEM palivovém článku. Problematická je především produkce  $\text{NaBH}_4$  a neexistující infrastruktura.

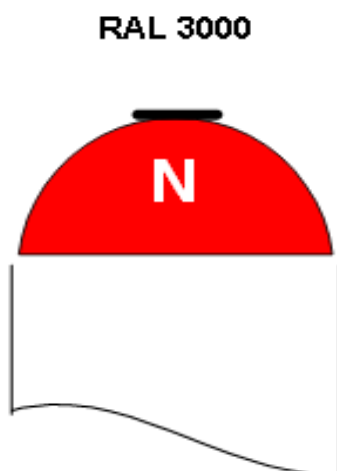
Systémy na bázi uhlíkatých nanostruktur a skleněných mikrokuliček jsou ve fázi vývoje a výzkumu.[8]



## 1.4 PŘEPRAVA VODÍKU

### Tlakové láhve

Plynný vodík je dodáván dle potřeb spotřebitelů v tlakových lahvích, svazcích tlakových lahví nebo pomocí bateriových vozů do vysokotlakých zásobníků.



Obr. 22 Značení lahví se stlačeným vodíkem [9]



Obr. 23 Nálepka tlakové láhve [9]

Tlakové lahve pro plnění vodíkem jsou vyrobeny z legované chrommolybdenové oceli a mají obvykle hmotnost 61 kg, vodní objem 50 litrů a jsou plněny na tlak 200 bar. Naplněny obsahují cca 8,9 m<sup>3</sup> vodíku, což odpovídá 0,75 kg, poměr hmotnosti obalu a náplně je 80:1. Vedle nejčastěji používaných 50 l tlakových lahví jsou, zvláště pro čistější druhy vodíku, používány tlakové lahve o objemu 10 a 2 litry.



## Svazky tlakových lahví

Při větší spotřebě vodíku je plyn dodáván ve svazcích tlakových lahví. Svazek pevně spojených lahví obsahuje 12 kusů tlakových lahví při tlaku 200 bar pojme obvykle 107 m<sup>3</sup> vodíku.



*Obr. 24 Manipulace se svazky [9]*

## Bateriové vozy

V případě vysokých spotřeb vodíku je logisticky výhodnější dodávat ke spotřebě v bateriových vozech, kdy je možné vodík přetlačit do tlakového zásobníku, trvale umístěného u spotřebitele.

Bateriové vozy jsou vybaveny buď větším množstvím tlakových lahví o standardní velikosti 50 litrů nebo devíti kusy pevně upevněných dlouhých ležatých tlakových nádob. Vodní objem obou typů bateriových vozů činí cca 20 m<sup>3</sup> a při plnicím tlaku 200 bar přepraví cca 4000 m<sup>3</sup> vodíku.



Obr. 25 Bateriový vůz a velkokapacitní tlakový zásobník [9]

### Kapalný vodík

Pro spotřebitele, kteří potřebují zajistit vysokou jistotu zásobování při velmi vysoké hodinové spotřebě vodíku, přichází v úvahu zajištění dodávek pomocí kapalného vodíku. Na rozdíl od výroby kapalných vzdušných plynů, jsou výroba a zkapalnění vodíku dva separátní energeticky náročné procesy.

Autocisterna s kapalným vodíkem má přepravní kapacitu 5 000 až 47 000 litrů, což odpovídá cca desetinásobku transportní kapacity konvenčních 200 barových bateriových vozů. Kapalný vodík je z cisterny plněn čerpadlem do kryogenního zásobníku. K dispozici jsou zásobníky o skladovací kapacitě 5 000 až 47 000 m<sup>3</sup> vodíku.



Obr. 26 Autocisterna s kapalným vodíkem [9]



Obr. 27 Čerpací stanice vodíku pro pohon vozidel [9]

Hlavním problémem přechodu na užívání vodíkových technologií je doposud neexistující infrastruktura nejen vodíkových čerpacích stanic, ale především zařízení pro výrobu vodíku v množství, které by pokrylo poptávku automobilové dopravy.

V tomto směru se také začíná využívat fotovoltaických panelů k výrobě vodíku pomocí elektrolýzy, kdy se ze sluneční energie získá vodík jako nosič energie ukládá do tlakové nádrže k následnému využití. První pokusnou elektrárnu testují odborníci z Centra výzkumu ÚJV Řež.

**Kam schovat energii**  
Pokud je nadbytek slunečního světla nebo větru, může se přebytečná energie ze solární či větrné elektrárny využít k výrobě vodíku pomocí elektrolýzy. Když je elektriny nedostatek, může se naopak pomocí vodíku v palivovém článku vyrábět. Vodík tak může sloužit k uschování energie „na horší časy“.

Jedním ze způsobů výroby vodíku z vody je tzv. **vysokoteplotní speciální keramické články**. Za vysoké teploty propouští jen ionty kyslíku, což usnadní rozklad vodní páry na vodík a kyslík.

**elektrolýzér**, v němž se voda pomocí elektriny rozkládá na vodík a kyslík

**palivový článek** vyrábí z vodíku **elektrinu**, odpadem je voda

**záložník získaného vodíku**

**elektřina** může sloužit jako pohon autobusu

**elektrický měnič** využívá elektřiny

**domácnosti**

**elektrická síť**

**olejové baterie na přebytečnou elektřinu**

**fotovoltaická elektrárna**

**sluneční energie**

**SCHEMA: CENTRUM VÝZKUMU ŘEŽ/ÚJV ŘEŽ**  
PHOTON ENERGY

**Pokusná elektrárna**  
ve výzkumném areálu v Řeži u Prahy, kterou dodala společnost Photon Energy. V budově se nachází **elektrolýzér** a **palivový článek**. Vedle je **tlaková nádrž**, která pojme 10 kg vodíku.

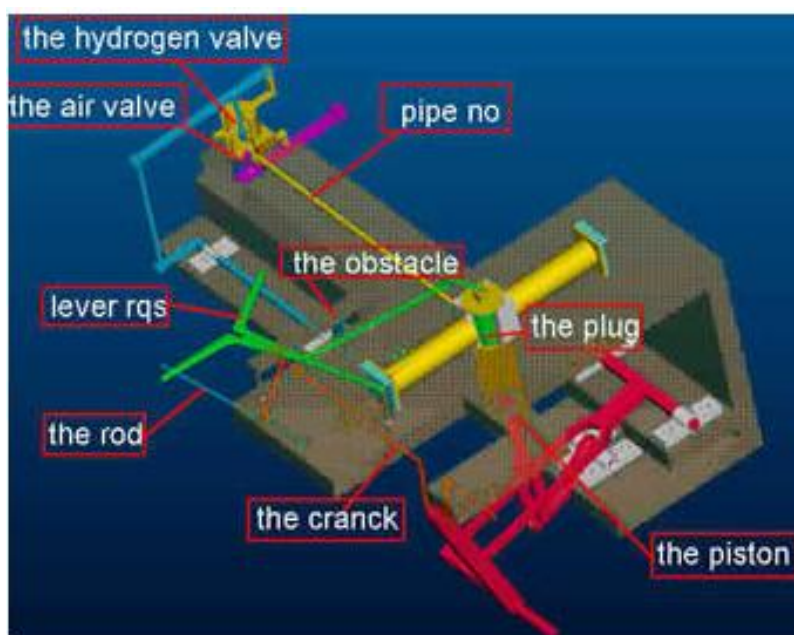
Obr. 28 Pokusná elektrárna ÚJV Řež u Prahy [10]

## 2 SPALOVACÍ MOTORY S VNITŘNÍM SPALOVÁNÍM VODÍKU

### Historie motorů s vnitřním spalováním vodíku

Dějiny motoru spalujícího vodík sahají do počátků 19. století. Roku 1806 sestrojil François Isaac de Rivaz pístový spalovací motor s elektrickým zapalováním. Jako palivo použil směs vzduchu a plynného vodíku. Tento motor je pokládán za první spalovací motor a byl roku 1808 patentován. Nedočkal se ale žádného dalšího využití a rozšíření. [11]

Další konstruktér motoru spalující vodík, byl reverend W. Cecil, který v roce 1820 zveřejnil svoji knihu *On the application of hydrogen gas to produce a moving power in machinery*. Zde popisuje motor, který je poháněn pomocí atmosférického tlaku a podtlaku vzniklého explozí po smíchání vodíku a vzduchu. Při ní vzniká dusík, který je vpuštěn do prostoru mnohem většího a jeho tlak je asi 6krát menší než tlak atmosférický. Během sání se píst pohybuje dolů a těsně před dosažením dolní polohy dochází k explozi směsi a následný vzniklý podtlak umožňuje atmosférickému tlaku pohybovat pístem nahoru do výchozí polohy a konat práci. Tento motor byl vůbec prvním, který použil vodík jako palivo. Ačkoliv motor fungoval, přes to se vakuové motory v praxi nikdy neujaly. Princip činnosti tohoto motoru lze lépe pochopit z animace, která se nachází na webovských stránkách University of Cambridge. [12]



Obr. 29 Vakuový motor spalující vodík [12]



Německý vynálezce Ottova cyklu, Nicolaus August Otto údajně používal jako palivo do svého motoru syntetický plyn tvořený více jak 50% vodíkem. Otto také experimentoval s využitím benzínu jako paliva. Práce s ním se mu však zdála příliš nebezpečná a komplikovaná, a tak se vrátil k experimentům s plynnými pohonnými hmotami. Až s příchodem karburátoru se stal benzín prakticky a bezpečně používaným palivem a zájem o jiná paliva ochabnul.

V podstatě existují dvě možnosti, jak využít energii uloženou ve vodíku. První možností je spalování vodíku v upravených konvenčních benzínových spalovacích motorech. Druhou možností je využití energie z vodíku formou elektrické energie, která probíhá v palivových článcích, což není náplní této práce. Nutno ale podotknout, že u odborné veřejnosti převládá názor, který se staví v budoucnu právě k palivovým článkům pro jejich vysokou účinnost a nulové emise při provozu vozidla.

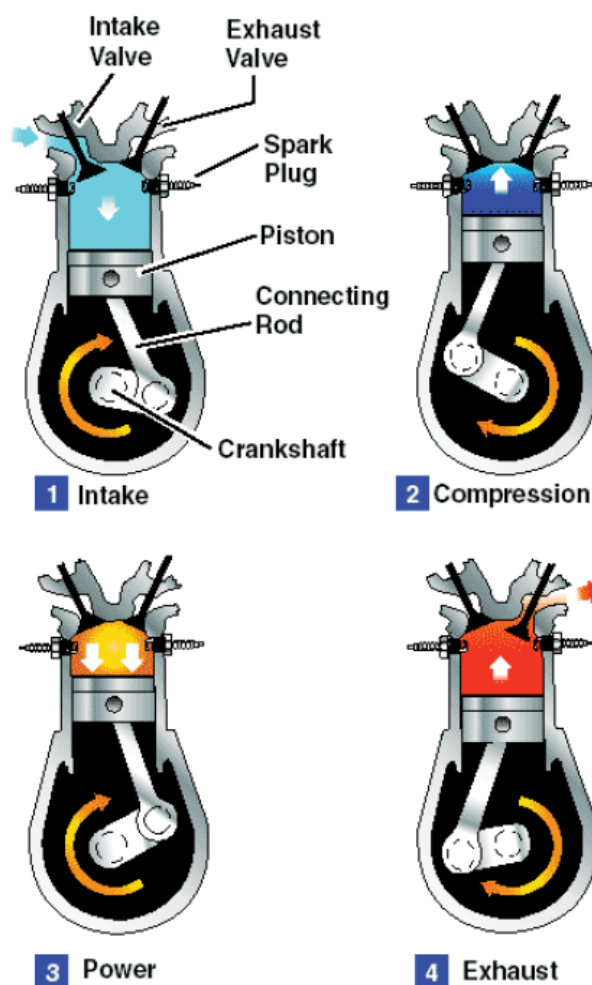


Obr. 30 Palivový článek [14]

### **Vodíkový motor**

Ke spalování vodíku se dnes používají upravené konvenční čtyřtakové zážehové spalovací motory v angličtině označované hydrogen internal combustion engine (HICE). Spalovací motor pracuje v kruhovém ději, který je popsán Ottovým cyklem. Pracovní oběh čtyřdobého spalovacího motoru se skládá ze 4 fází:

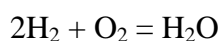
- Sání
- Komprese
- Expanze
- Výfuk



Obr. 31 Vakuový motor spalující vodík [13]

### Stechiometrický poměr

Palivová směs je charakterizovaná pomocí poměru vzduch/vodík (A/F ratio). K nalezení ideálního poměru je třeba vycházet z chemické reakce spalování vodíku, která probíhá podle následující rovnice:



Protože v motoru se spaluje směs vzduchu s vodíkem, je třeba zahrnout i dusík, který je ve vzduchu velmi výrazně zastoupen.

Tedy:

Počet molů  $\text{N}_2$  ve vzduchu:

$$= 1 \text{ mol O}_2 \times (79\% \text{ N}_2 \text{ ve vzduchu} / 21\% \text{ O}_2 \text{ ve vzduchu}) = 3,762 \text{ mol N}_2$$

Počet molů vzduchu:

$$= \text{O}_2 + \text{N}_2 = 1 + 3,762 \text{ mol} = 4,762 \text{ mol vzduchu}$$





Hmotnost O<sub>2</sub>:

$$= 1 \text{ mol O}_2 \times 32 \text{ g / mol} = 32 \text{ g}$$

Hmotnost N<sub>2</sub>:

$$= 3,762 \text{ mol N}_2 \times 28 \text{ g / mol} = 105,33 \text{ g}$$

Hmotnost vzduchu:

$$= \text{hmotnost O}_2 + \text{hmotnost N}_2 = 32 \text{ g} + 105,33 \text{ g} = 137,33 \text{ g}$$

Hmotnost H<sub>2</sub>:

$$= 2 \text{ mol H}_2 \times 2 \text{ g / mol} = 4 \text{ g}$$

Stechiometrický poměr vzduch / palivo (A / F) pro vodík a vzduch je:

A / F ratio založené na hmotnosti:

$$= \text{hmotnost vzduchu} / \text{hmotnost paliva} = 137,33 \text{ g} / 4 \text{ g} = 34,33:1$$

A / F ratio založené na objemu:

$$= \text{objem (mol) vzduchu} / \text{objem (mol) paliva} = 4,762 / 2 = 2,4:1$$

Procento spalovací komory obsazené vodíkem pro stechiometrickou směs:

% H<sub>2</sub>:

$$= \text{objem (mol) H}_2 / \text{celkový objem směsi (mol)} =$$

$$= \text{objem H}_2 / (\text{objem vzduchu} + \text{objem H}_2) = 2 / (4,762 + 2) = 29,6\%$$

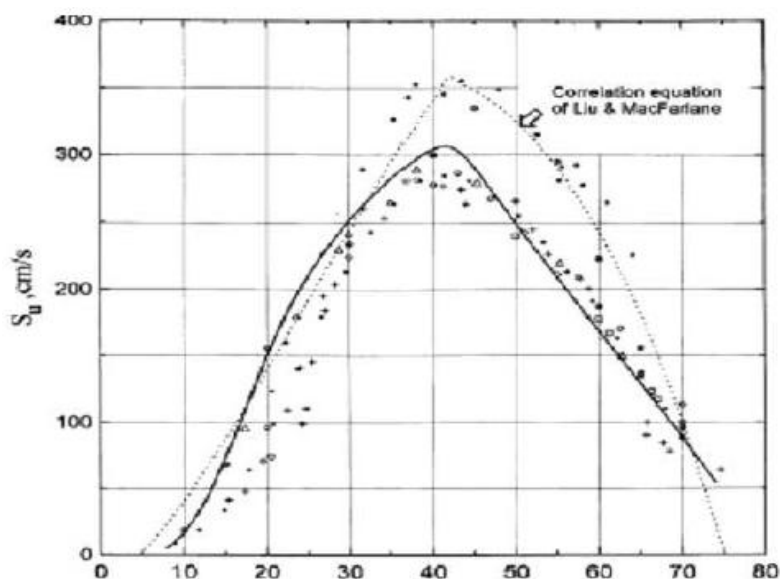
Z předchozích výpočtů je zřejmé, že stechiometricky ideální A/F poměr pro spalování vodíku a vzduchu je asi 34:1 hmotnosti.

Pokud srovnáme A/F poměr vodíkové palivové směsi s A/F poměrem benzínové palivové směsi, který je roven 14,7:1, vidíme, že je přibližně dvakrát větší.

Protože je vodík plynné palivo, zaujímá ve spalovacím prostoru asi 30% objemu, zatímco kapalný benzín pouhá 1-2%.

### **Různá rychlost hoření**

Rychlost hoření směsi je při stechiometrickém poměru skoro 10x rychlejší nežli hoření směsi s benzínem. Provoz za reálných podmínek se však s tímto poměrem nevyskytuje zejména kvůli emisím.



Obr. 32 Rychlost hoření v závislosti na koncentraci vodíku [15]

### Plnění vodíkových motorů

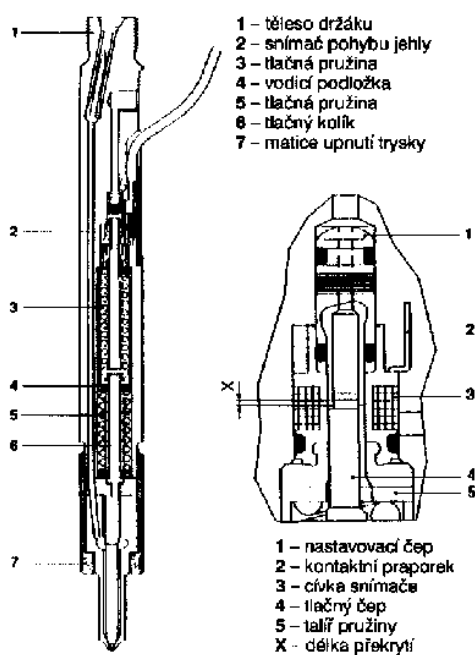
Nejvyšším rizikem pro vodíkové motory je plnění čerstvou směsí paliva, kdy dochází k předčasnému zapálení směsi a tím zpětnému šlehnutí plamene do sacího potrubí. U vodíku tento problém způsobují horká místa motoru jako zapalovací svíčka, výfukový ventil, smíšení horkých výfukových plynů s čerstvou náplní překrytím časování ventilů. Také by měla být optimalizovaná hlava válce pro ideální nasměrování dráhy proudu nasávané směsi do válce motoru s dostatečným odstupem od stěn válce.

## 2.1 VSTŘIKOVÁNÍ PLYNU DO SACÍHO POTRUBÍ

### Centrální vstřík

Z hlediska náročnosti na komponenty je nejjednodušší způsob dodávání vodíkového paliva do motoru je prostřednictvím upraveného karburátoru, směšovače nebo centrálního systému vstřikování. Palivová směs je tvořena na jediném místě v sacím potrubí v průběhu sací fáze cyklu motoru. Tlak vstřikovaného vodíku nemusí být tak velký jako u následujících systémů. Lze navíc využít modifikovaného centrálního systému vstřikování paliva u stávajících benzínových motorů.

Nevýhodou karburátoru, směšovače a centrálního vstřikování je větší náchylnost k předčasnému zapálení směsi. Tento systém také neposkytuje takový výkon jako třeba systém přímého vstřikování vodíku.



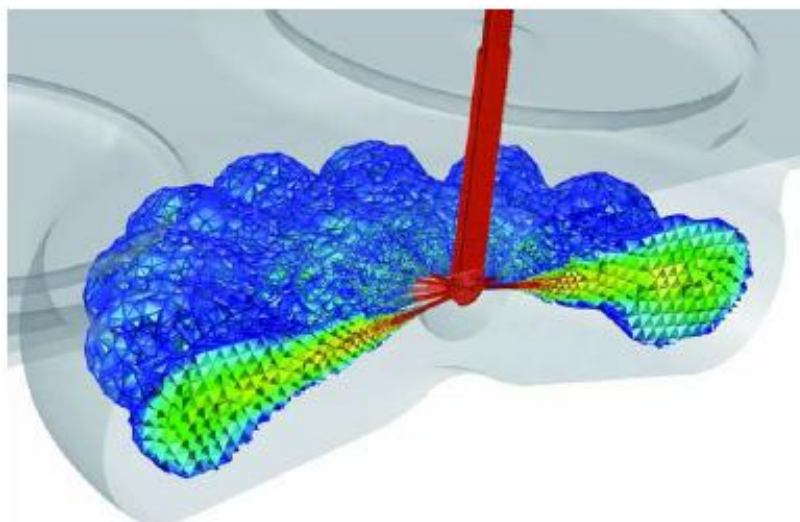
Obr. 33 Vstříkovací ventil [15]

### Vícebodový vstřík

Tento způsob tvorby palivové směsi je zdokonalením předešlého systému. Palivová směs opět vzniká v sacím potrubí, tentokrát ale na více místech, před každým sacím ventilem. Tvorba směsi probíhá chvíli po začátku sacího zdvihu, aby mohl čistý vzduch ještě vytlačit spaliny a ochladit horká místa, čímž se značně omezí možnost předčasného vznícení směsi. Vstupní tlak vstříkovačů je vyšší než u centrálního vstříkovaní, avšak menší než u přímého vstříkovaní vodíku.

### Přímý vstřík

Nejlepší variantou palivovým systémem je přímé vstříkovaní paliva. Ke vstříku paliva dochází až při kompresním zdvihu pístu. Sací ventil je uzavřen a palivo je vstříknuto přímo do válce. Tak je zamezeno předčasnému zapálení směsi a také zpětnému zášlehu. Výkon motoru s přímým vstříkovaním paliva je oproti centrálnímu vstříku asi o 42% vyšší a o 20% vyšší než výkon motoru spalujícího benzín. Palivo je vstříkováno pod vyšším tlakem než u předchozích metod.



Obr. 34 Simulace přímého vstřikování vodíku [16]

### Výkon motoru

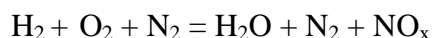
Maximální výkon motoru spalující vodík je závislý na A/F poměru a na použitém systému vstřikování paliva. Teoreticky ideální hmotnostní A/F poměr je 34:1. Při tomto poměru vodík zastupuje ve válci 29% prostoru a vzduch zbývající 71%. Ve srovnání s benzínem jako kapalina zaujímá ve válci asi pouze 1-2% objemu a výkon tohoto motoru je vyšší než výkon motoru spalujícího vodík. To platí při použití systémů vstřikování vodíku centrálního vstřikování a vícebodového vstřikování, kde palivová směs vzniká před vstupem do válce. V tom případě je dosaženo asi 85% výkonu oproti benzínovému motoru. Použijeme-li přímé vstřikování paliva, dochází ke vstřiku paliva do válce plně naplněného vzduchem v čase, kdy jsou sací ventily uzavřené. Tím lze dosáhnout maximálního výkonu až o 15% vyššího než u motoru spalujícího benzín.

Nevýhodou spalování ideální 34:1 vodíkové A/F směsi je, že dochází k vysokým spalovacím teplotám, což produkuje vysokou produkci  $\text{NO}_x$ . Vodík jako palivo je volen právě kvůli ekologickému provozu, tak jsou takto vysoké emise nežádoucí. Z toho důvodu je vodík spalován v chudší směsi, při které nedochází téměř ke vzniku oxidů dusíku. Chudší směs znamená pokles výkonu, proto vodíkové motory mají menší výkon vztažený na objem motoru než benzínové motory. Výkon vodíkového motoru se řeší přeplňováním pomocí turbodmychadel.



## Emise

Spalování vzduchu s vodíkem probíhá podle t rovnice:



Kde  $\text{NO}_x$  jsou oxidy dusíku, které vznikají spalováním palivové směsi za vysokých teplot. Reakce dusíku a kyslíku, při které vznikají oxidy dusíku, je možná pouze za předpokladu vysokých teplot spalování. Množství  $\text{NO}_x$  závisí na A/F poměru, kompresním poměru motoru, otáčkách motoru a načasování zapálení směsi. Kromě oxidů dusíku se také ve výfukových plynech může objevit stopové množství oxidů uhlíku ( $\text{CO}_x$ ), které vzniká hořením motorového oleje prosakujícího do prostoru válce motoru. V závislosti na provozních podmínkách dokáže vodíkový motor produkovat jak téměř nulové emise, tak i velké množství oxidů dusíku.

### 2.2 VÝHODY A NEVÝHODY VODÍKOVÝCH MOTORŮ PROTI BENZÍNOVÝM

Jednotlivé vlastnosti vodíku byly podrobněji popsány v kapitole 1.2, proto budou nyní zmíněny kratší formou související se spalovacím motorem.

Výhody vodíkových motorů:

- Široký rozsah hořlavosti. Lze spalovat vodík i v extrémně chudých směsích oproti benzínu.
- S vysokou teplotou samovznícení vodíku můžeme motoru přidat vyšší kompresní poměr. Tím bude lepší tepelná účinnost cyklu a vyšší výkon motoru.
- Snadné smíchání vodíku se vzduchem při nasávání do válce. Benzín se musí nejdříve odpařit a potom smíchat, což vede k problémům při startech v zimním období.
- Nízké emise výfukových plynů.
- Nevyčerpatelný zdroj vodíku.

Nevýhody vodíkových motorů:

- Nízká iniciační energie vedoucí k předčasnému zapálení směsi.
- Vysoká difuzivita, tedy vysoké požadavky kladené na palivový systém a materiály.
- Nízká hustota, tedy vyšší spotřeba paliva vyžaduje objemnější rozměr palivové nádrže.
- Neexistující dostatečná výroba vodíku, která by pokryla poptávku automobilové dopravy.
- Slabá infrastruktura čerpacích stanic.
- Přeprava kapalného vodíku vyžaduje jeho ochlazení na  $-253^\circ\text{C}$ .



---

Z výše uvedených výhod i nevýhod vodíkových motorů je zřejmé, že s vodíkem jako palivem se v budoucnu počítat rozhodně může. Pro přední výrobce automobilů, kteří se zabývají vývojem vodíkových spalovacích motorů testující své prototypy je limitující zatím slabá infrastruktura vodíkových čerpacích stanic a nároky související s přepravou. Nadále se zdokonalující vodíkové technologie sebou přináší nezadržitelný pokrok, do kterého patří i vývoj vodíkových palivových článků PEM, které svými vlastnostmi a bezproblémovým provozem překonávají spalovací motory. K nevýhodě palivových článků ovšem patří zatím jejich veliká cena, která stojí za kusovou výrobou a použitými speciálními materiály pro odolání v korozivním prostředí. Další nevýhoda palivových článků je neschopnost dodat okamžitý potřebný výkon elektromotoru na podnět řidiče.

### 3 SOUČASNÝ STAV SPALOVACÍCH MOTORŮ S VNITŘNÍM SPALOVÁNÍM VODÍKU

Předními automobilkami vyvíjející technologie spalování vodíku v pístových motorech HICE jsou BMW, Ford a Mazda, kteří už řadu let předvádí své prototypy prezentující výsledky výzkumu široké veřejnosti.

#### 3.1 BMW

Automobilka BMW používá pro motory spalující vodík upravený konvenční benzínový motor pro svůj vodíkem poháněný zástupce *BMW Hydrogen 7*, který vychází z upraveného modelu řady 7. Vůz je jedním z prvních automobilů, který je schopný spalovat jak benzín, tak i vodík.

Model *BMW Hydrogen 7* má dvanáctiválcový čtyřdobý spalovací motor s válci uspořádanými do písmene V o objemu 5 972 cm<sup>3</sup>. Tento motor s dvoupalcovým systémem poskytuje celkový výkon až 260 koní. Proměnlivé sání a nastavitelné časování vačkové hřídele pro sání a výfuk na obou blocích motoru umožňují využít bezklapkové plnění válců *Valvetronic*. Vůz má rozměry 5018 mm na délku, 1710 mm na šířku, 1405 mm na výšku, rozvor 3070 mm a hmotnost 2400 kg.



Obr. 35 BMW Hydrogen 7 [18]

Při chodu na benzínové palivo dochází k přímému vstříkovaní benzínu do válce, zatímco při chodu na vodík je směs připravena mimo válec. Vodíková nádrž je zkonstruována jako kryo-kontejner a její speciální izolace odpovídá 17 m pěnového polystyrenu. Během cesty ke vstříkovacím ventilům se vodík zahřívá a přechází do plynného skupenství. Nádrž o objemu 168 l dokáže pojmout až 8 kg tekutého vodíku, což je hodnota odpovídající benzínové nádrži o objemu 30 l. Vozidlo má tak dojezd na vodík 200 km a dalších 500 km na benzínový pohon.



Nádrž na vodík je ochlazována, ale i přesto teplo z okolí má vliv na tlak v nádrži během jízdy. Stálý tlak se udržuje řízeným odpařováním vodíku. Celý tento proces je řízen kontrolérem nádrže *CleanEnergy*. Při dosažení kritických hodnot kontrolér zareaguje a informuje řidiče o stavu systému.

Od počátečního návrhu až po dynamický testovací provoz probíhají všechny testy s použitím počítačových modelů. Testy *HIL* zaručují shodu skutečných zařízení s modely. Nejvyšší rychlosti, které je *Hydrogen 7* schopen dosáhnout je 230 km/h. Zrychlení z 0-100 km/h je 9,5 sekundy. Systém řízení motoru *Hydrogen 7* se skládá ze dvou kontrolérů, přičemž každý řídí jeden blok motoru.



Obr. 36 Dvanáctiválcový motor BMW Hydrogen 7 V12 [18]

### 3.2 BMW H2R

Dalším vozem automobilky BMW je prototyp *BMW H2R*, který byl sestrojen k překonání rychlostních rekordů mezi vozidly s vodíkovým pohonem. Vůz je poháněn stejnou pohonnou jednotkou jako *BMW Hydrogen 7*. Stavba prototypu trvala pouhých 10 měsíců. Hliníkový rám má karbonovou karosérii s vynikajícím koeficientem odporu vzduchu  $C_x=0,21$ . Motor upravený na vodík dodává výkon 210 kW. Úpravy motoru spočívají ve změně spalovacího prostoru v hlavách a speciální vodíkové vstříky. Model *H2R* není na rozdíl od jiných vodíkových prototypů BMW, jezdí pouze na vodík.





Obr. 37 BMW H2R [18]

Prototyp *H2R* překonal 9 rychlostních rekordů a dosáhl maximální rychlosti 302,4 km/h a start z 0-100 v čase 6 vteřin.

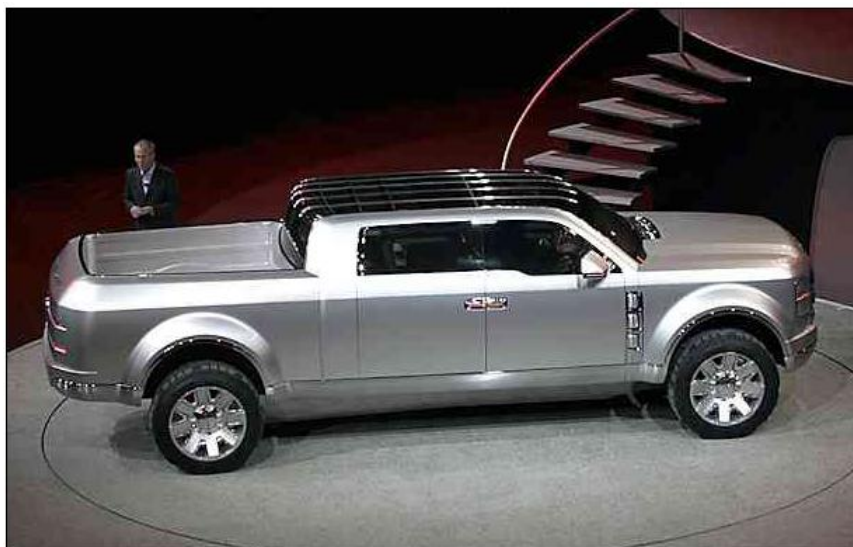
	time in sec	speed in kph
Flying-start kilometer	11.993	300.190
Flying-start mile	19.912	290.962
Standing-start 1/8 mile	9.921	72.997
Standing-start 1/4 mile	14.933	96.994
Standing-start 1/2 kilometer	17.269	104.233
Standing-start mile	36.725	157.757
Standing-start 10 miles	221.052	262.094
Standing-start kilometer	26.557	135.557
Standing-start 10 kilometers	146.406	245.892

Tab. 3 Přehled rekordních časů dosažených BMW H2R [18]

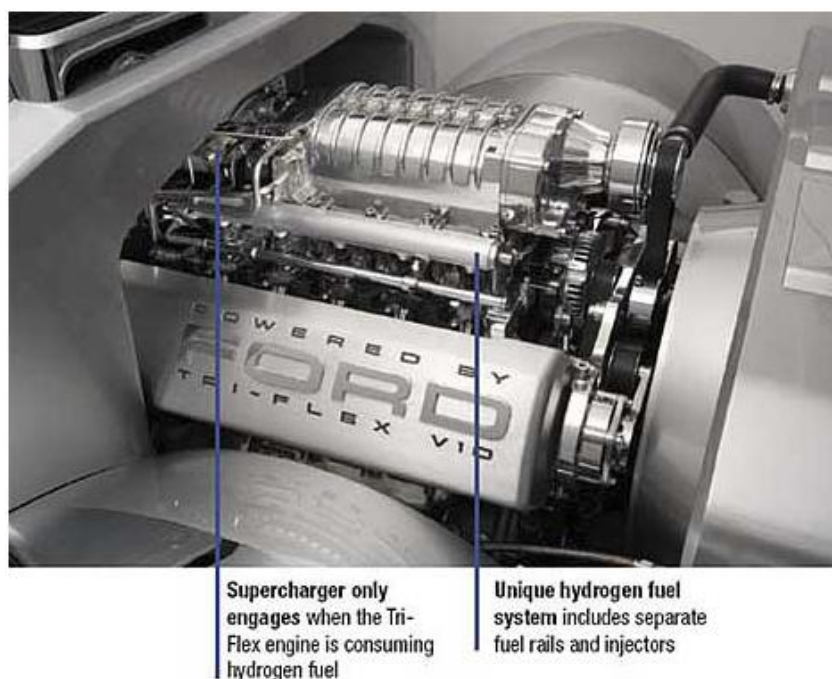
### 3.3 FORD

Automobilka nejen upravuje své stávající spalovací motory k provozu na vodík, ale současně vyvíjí palivové články pro své modely aut.

Společnost Ford nedávno představila prototyp nákladního auta *Ford F-250 Super Chief*, kde konstruktéři předvedli nový přeplňovaný motor V10 s palivovým systémem tri-flex, který umožňuje uživatelům vybrat ze tří druhů paliv. Uživatel pomocí flip přepínače si může zvolit palivo E85, vodík nebo benzín. *Ford F-250 Super Chief* má na vodík dojezd 804 km a kroutící moment dosahuje 542 N.m.



Obr. 38 Ford Super Chief F-250 [18]



Obr. 39 Motor Ford Super Chief F-250 [18]

Dalším vozidlem spalující vodík automobilky Ford je *H<sub>2</sub>ICE Shuttle Bus*. Základem je přestavěný sériový model *Ford E-450*, na jehož šasi byla umístěna skříň autobusu. Tento autobus byl poháněn přeplňovaným motorem *6,8 l Triton V-10*, který byl upravený pro spalování vodíku. Motor poskytuje maximální výkon 140 kW v rozmezí otáček 2600-3600. Model *H<sub>2</sub>ICE Shuttle Bus* byl představen poprvé v roce 2004. Autobus je schopen pojmout 12 cestujících včetně řidiče i se zavazadly. Ford uvádí jízdní dosah asi 240 km, což záleží na zatížení vozu.



Obr. 40 Motor Ford Super Chief F-250 [18]

### 3.4 MAZDA

Jako jediný motor spalující vodík s rotačním pohybem pístu přestavěla Mazda, která Wankelův motor používá ve svých sériových vozech. Významnou roli ve vývoji vodíkových vozidel sehrál model, který v roce 2003 byl představen na Tokijském autosalonu a vychází ze sériového sportovního modelu poháněného dvourotorovým Wankelovým motorem *Renesis*, který získal prestižní titul *Engine of the Year 2003* model RX-8 Hydrogen RE. Motor je vybaven dvoupalivovým systémem přepínání vodík/benzín nazývaný Dual-Fuel, k němuž byly navíc přidány dva vstřikovače vodíku přímo do rotorových komor. Největší problém byl příliš velký rozdíl výkonu při spalování vodíku a benzínu, ovšem velkým pozitivem byl provoz bez emisí, kdy z výfuku odcházela pouze vodní pára. V roce 2004 se uskutečnily jízdní zkoušky, kterým se dosáhlo schválení pro provoz na běžných silnicích. Rok 2006 se zahájilo komerční pronajímání vodíkových vozidel. [20]

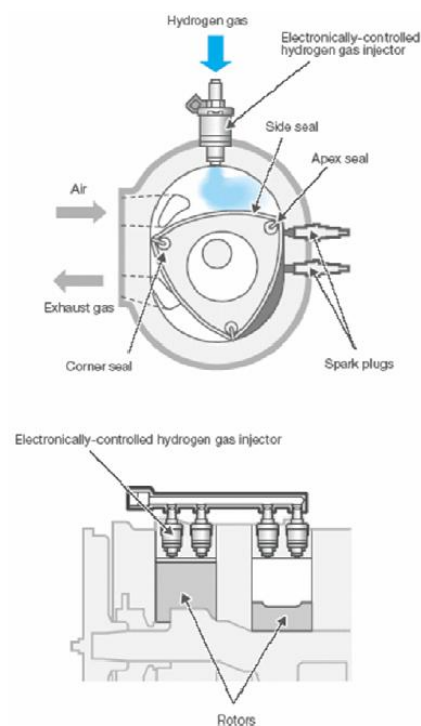


Obr. 41 Motor s rotačním pístem [20]

Wankelův motor upravený pro spalování vodíku má výhodu oproti běžnému pístovému motoru například v tom, že zde nedochází k zpětnému zášlehu do sacího potrubí, protože sací a spalovací prostor jsou od sebe odděleny rotujícím pístem. Při modifikaci konvenčního motoru na vodíkový spalovací motor musela být upravena poloha, počet a velikost sacích a výfukových otvorů. Dále museli snížit hmotnost rotačních pístů a vybavit motor zcela novými vstřikovači paliva. Ty jsou vždy dva na spalovací prostor a provádí několik vstřiků vodíku během jednoho zdvihu, aby do spalovacího prostoru dodaly potřebné množství vodíku.



Obr. 42 Prototyp Mazda RX-8 Hydrogen RE [20]



Obr. 43 Motor Renesis Hydrogen 13B Dual –Fuel [21]

## Mazda RX-8 Hydrogen RE – Základní technické údaje

Čtyřmístné čtyřsedadlové kupé, typ Mazda ABA-SE3P Kai (upravený model); vpředu podélně uložený dvourotorový motor Mazda RENESIS Hydrogen 13B Dual-Fuel, objem 2x 654 cm<sup>3</sup>, výkon a točivý moment 80 kW (109 k) a 140 N.m na vodík, resp. 154 kW (210 k) a 222 N.m na benzin; čtyřstupňová samočinná převodovka, pohon zadních kol; objem nádrže benzínu 61 l; objem vysokotlakých nádrží vodíku 110 l při tlaku 35 Mpa; rozvor náprav 2700 mm; d/š/v 4435/1770/ 1340 mm; pohotovostní hmotnost 1460 kg; akční rádius 100 km na vodík a 550 km na benzin. [20]

Nejnovější vůz spalující vodík je model *Mazda Premacy Hydrogen RE Hybrid*, který používá stejný motor jako model *RX-8 Hydrogen RE*. Jedná se o hybridní vozidlo kombinující elektromotor a vodíkový rotační motor, který slouží pouze k výrobě elektrické energie, kterou využívá elektromotor pro pohon kol. Tento hybridní systém zvyšuje dojezd při spalování vodíku na 200 km, což je dvakrát více než u modelu *RX-8 Hydrogen RE*.

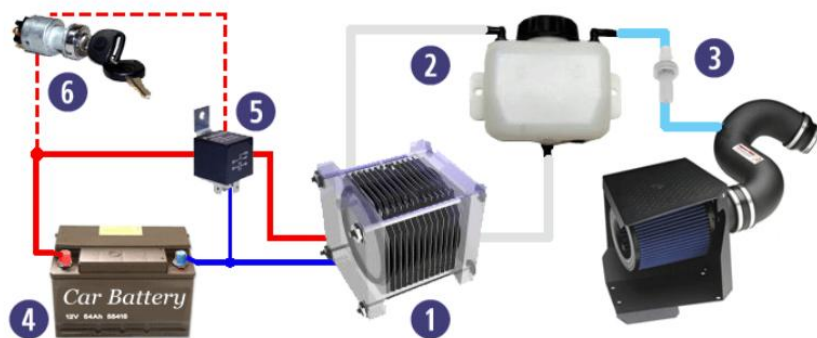


Obr. 44 Mazda Premacy Hydrogen RE Hybrid [22]

## 3.5 VÍCEDRUHOVÉ SPALOVÁNÍ PALIV

### 3.5.1 HHO VYVÍJEČE

Posledních pár let se začaly v našich médiích objevovat zprávy o zakázaných úpravách zážehových a vznětových motorů s neschválenými komponenty výrobců automobilů na základě obohacování směsi paliva o vodík pomocí HHO (Hydrogen + Hydrogen + Oxygen) vyvíječů, tedy výroby vodíku, k dosažení úspory paliva a zvýšení výkonu. Základem celého zařízení je elektrolýza, která využívá přebytek elektrické energie z alternátoru motoru k rozkladu vody na směs plynů kyslík a vodík, nazývaný Brownův plyn. Množství vyprodukovaného vodíku tímto způsobem ovšem není natolik velké, aby se dalo dosáhnout výrazné úspory paliva.



(1)HHO článěk, (2)odlučovač - rezervoár na elektrolyt, (3)jednocestý ventil, (4)autobaterie, (5)relé pro ovládání přívodu elektrického proudu, (6)skříňka zapalování.

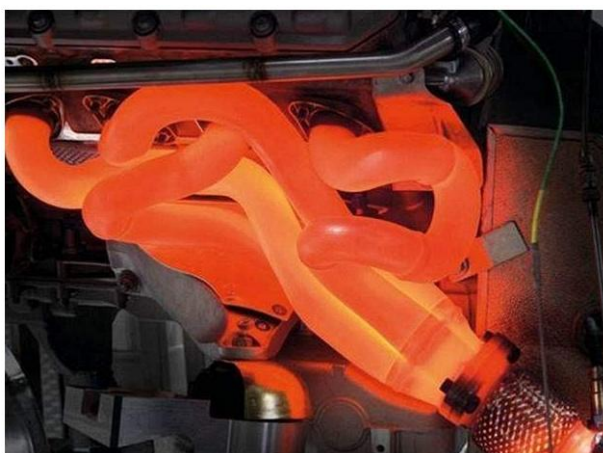
Obr. 45 Schéma zapojení HHO u automobilu [25]

### 3.5.2 ELECTRO HYDROGEN GENERÁTOR

Britská společnost OM Energy vyvíjí elektro-vodíkový generátor, který umožní vyrábět v automobilu vodík za pomoci odpadního tepla. Vodík pak vůz použije jako příměs do paliva. Tím se sníží spotřeba a klesnou emise.

Firma OM Energy svůj Electro hydrogen generator (EHG) vyvíjí již přes čtyři roky a před nedávnem získala na jeho další vývoj investici od společnosti Ultra Green Group. V průběhu tohoto roku bychom se tak měli dočkat prvních dvou testovacích vozů, které budou elektro-vodíkový generátor zkoušet v praxi. Vývoj bude nadále probíhat v nově vzniklé společné firmě Ultra Green OM.

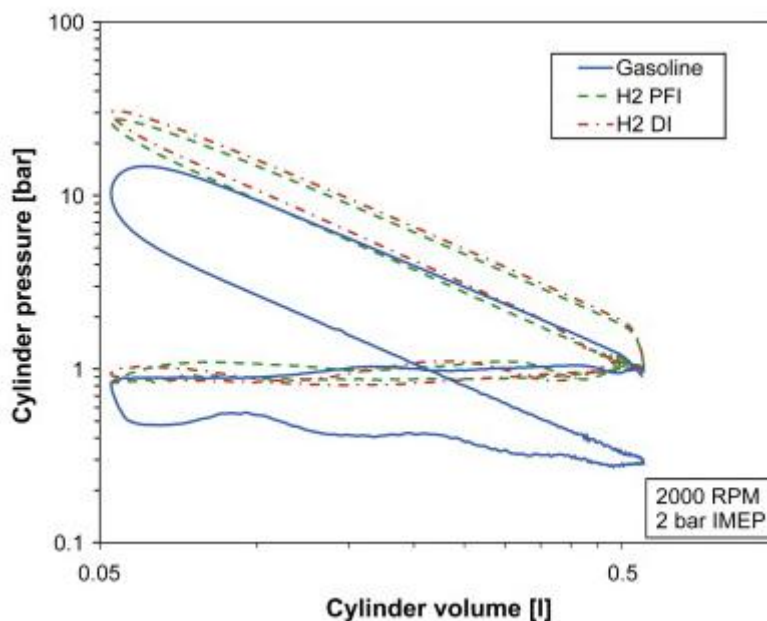
EHG bude pro výrobu vodíku z vody používat energii z výfukových plynů, která se jinak běžně v automobilu ztrácí. Generátor bude z vody vyrábět vodík, který následně motor použije jako příměs do svého běžného paliva – nafty nebo benzínu. Podíl vodíku v palivu by měl být až 20%. O tuto hodnotu klesne spotřeba paliva, emise klesnou až o 30%. [28]



Obr. 46 Tepelné zatížení výfukového potrubí [28]

#### 4 NÁVRH KONSTRUKČNÍCH ÚPRAV KONVENČNÍHO MOTORU

Stávající zážehové pístové motory pracují v kruhovém ději popsaném Ottovým cyklem. Se stejným cyklem pracují i vodíkové motory, což dává základ tomu, vycházet z této koncepce spalovacího motoru. Pracovní oběh čtyřdobého zážehového spalovacího motoru je dán čtyřmi fázemi: sání, komprese, expanze a výfuk. Z těchto fází koná motor práci pouze při expanzní části.



Obr. 47 P-V diagram vodíkového spalovacího motoru [23]

Na úpravu konvenčního motoru, aby bylo možné spalovat vodík, bude navrženo několik úprav pro chod motoru s nejvyšší možnou účinností a aby bylo odstraněno nebezpečí zpětného šlehnutí do sacího potrubí, které je největším nebezpečím vodíkového motoru. Pro tento návrh úprav je ovšem nutnou podmínkou zásah do konstrukce hlavy válců. Je vycházeno z vlastností vodíku, které jsou popsány v předešlých kapitolách.

- Přímý vstřík paliva pro odstranění nebezpečných zpětných zášlehů do sacího potrubí vznikajících kontaktem čerstvé náplně se zbytky výfukových plynů.
- Pro zapálení chudých směsí použít speciální plazmové zapalovací svíčky. Plazmový výboj svíčky dodá větší energii než jiskra běžné svíčky.
- Zvýšení kompresního poměru užitím přeplňování pro dosažení vyšší účinnosti.
- Časování zapalovací soustavy posunout blíže k horní úvratí. Důvodem této úpravy je nižší teplota samovznícení benzínu, která je 280°C než vodík, který má teplotu samovznícení 580°C.



---

Další varianta úpravy konvenčního motoru, která by nevyžadovala zásah do stávající konstrukce motoru, je použití směšovače pro míšení vodíku se vzduchem, umístěný za škrtkou klapkou a filtrem vzduchu. Další úpravou by bylo posunutí časování zapalovací soustavy k horní úvrati. U této varianty úprav ovšem musí být pročitáno s tím, že účinnost motoru bude nízká a riziko zpětného šlehnutí do sacího potrubí naopak vysoké.



## 5 REALIZACE

### 5.1 ELEKTROLYZÉR

Další částí této práce je realizace vodíkového motoru pomocí navržených úprav ze stávajícího konvenčního pístového motoru spalující benzín. K získání vodíku byl použit proces elektrolýzy, která rozkládá vodu na atomy vodíku a kyslíku. Zdroj elektrické energie byl odebírán z rozvodné sítě 220V. Pro zvýšení vodivosti v elektrolyzátoru byl přidán do destilované vody Hydroxid draselný.

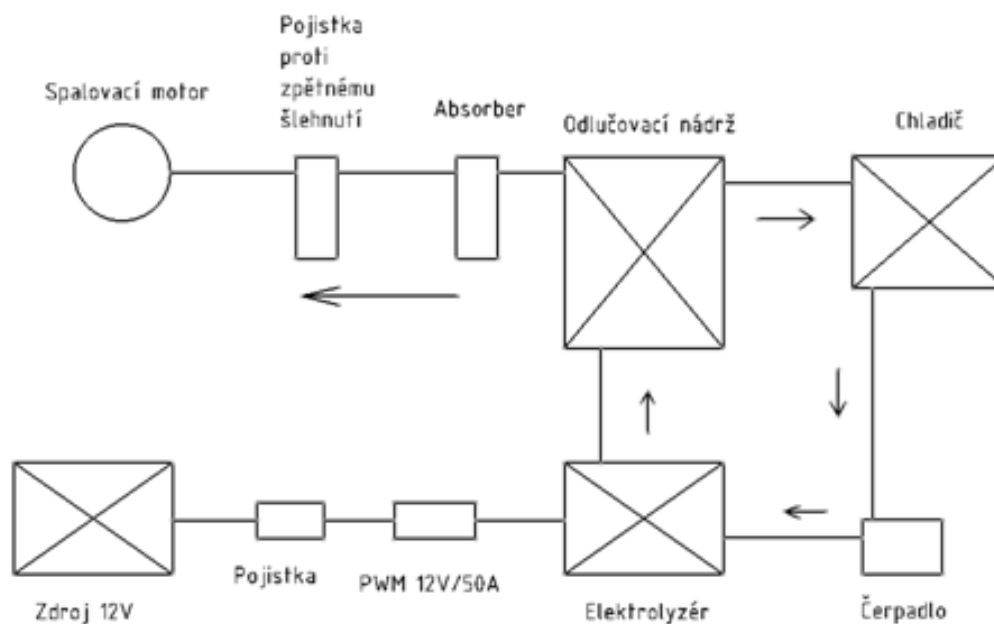


Obr. 48 Elektrolyzér

Množství vyvíjeného Brownova plynu, tedy dvou molekul vodíku a jedné molekuly kyslíku byl naměřen průtok 2,2 litrů plynu za jednu minutu při 80% zatížení elektrolyzátoru. Pro propojení jednotlivých částí zařízení bylo zvoleno chemicky odolné a nehořlavé silikonové hadice. Proti poškození plamenem, v případě zpětného zášlehu od motoru, je na výstupu přidána pojistka proti průchodu plamene do odlučovací nádrže a elektrolyzátoru. Systém neobsahuje žádnou nádrž, kde by byl plyn skladován, tedy vyvíjený plyn je hned využit.

Elektrolyzér a hlavní komponenty:

- Zdroj stejnosměrného napětí – Mean Well AC/DC  $U = 12\text{ V}$ : napětí  
 $P = 600\text{ W}$ : výkon  
 $I = 50\text{ A}$ : proud
- Pulzní zdroj – HHO PWM 12V / 70A
- Elektrolyzér – DC 12V bipolární zapojení elektrod
- Odlučovací nádrž
- Chladič elektrolytu
- Oběhové čerpadlo
- Absorber
- Pojistka proti zpětnému šlehnutí (Bubler)



Obr. 49 Schéma zapojení elektrolyzéro

## 5.2 SPALOVACÍ MOTOR

Pro testování spalování vodíku v pístovém spalovacím motoru byl vybrán jednoválcový motocyklový zážehový motor:

- Typ FMB 139
- Zdvihový objem  $50\text{ cm}^3$
- Maximální otáčky motoru 7200 ot/min
- Výkon udávaný výrobcem 2,2 kW.



Obr. 50 Zážehový spalovací motor

### 5.3 PROVEDENÉ ÚPRAVY

- Motor byl osazen solenoidovým ventilem, který je uzavřen bez napětí. Přidáním ventilu je umožněno rychlé uzavření přívodu vodíku do motoru.
- Pro mísení vodíku se vzduchem je přidán do sacího potrubí směšovač, který je instalován u hlavy válce, zároveň tedy i v blízkosti sacího ventilu.
- Na karburátoru motoru byla zaslepena hlavní tryska a byla ponechána pouze tryska volnoběhová.
- Standardní sériová zapalovací svíčka byla nahrazena za iridiovou pro silnější výboj.



Obr. 51 Směšovač



V další části úkolu úprav konvenčního motoru bylo vyzkoušet chod motoru na samotný vodík. To se ukázalo jako nereálné, a to z důvodu nedostatečného množství vodíku, který není skladován, ale je odčerpáván pouze za chodu elektrolyzéry. Tedy motor se při startování nerozběhl, navíc se přivodil zpětný zášleh do sacího potrubí. Tento zášleh plamene byl doprovázen velice silným zvukovým projevem. Zpětné šlehnutí mohlo způsobit překrytí ventilů, kdy se čerstvá směs dostala do kontaktu s výfukovými plyny.

Dále byl testován chod motoru se dvěma palivy, a to benzín a vodík, kde byl benzín plněn karburátorem, přes volnoběžnou trysku a směšovačem přidáván vodík. Toto řešení se ukázalo jako velice efektivní, kdy došlo po přimíchání vodíku do směsi k nárůstu otáček a plynulému chodu motoru. Při chodu motoru na benzín bylo pozorováno kolísání otáček v rozmezí  $\pm 150$  ot/min a při obou palivech pouze  $\pm 50$  ot/min. Pro porovnání byl motor spuštěn na oba režimy se stejným množstvím benzínu, který byl naměřen v plovákové misce o obsahu 34 ml benzínu a čas, po kterou dobu běžel do zhasnutí po vyčerpání benzínu. Motor byl testován v nezátíženém stavu. Časování zapálení směsi zapalovací svíčkou bylo ponecháno na původním úhlu. Důvodem je přítomnost benzínu, který má proti vodíku nižší teplotu samovznícení, tedy by docházelo k nežádoucímu předčasnému samozápalu a klepání motoru.

Palivo	Volnoběžné otáčky	Čas chodu motoru	Zatížení elektrolyzéry
	[ot/min]	[min]	[A]
Benzín	2050 - 2350	9:40	-
Benzín + Vodík	4200-4300	8:10	30

Tab. 4 Porovnání chodu motoru

Zaznamenané hodnoty ukázaly, že přítomnost vodíku a čistého kyslíku z elektrolyzy zvýšily otáčky motoru téměř na dvojnásobnou hodnotu původních otáček. To dokazuje, že vodík přidaný do benzínu přidal teplo při expanzi a zrychlil průběh hoření. Šoupátko karburátoru bylo při obou měření v původní volnoběžné poloze. Měření časů ukázalo rozdíl v délce chodu motoru, kde čas u směsi obou paliv byl kratší o 90 sekund než čas samotného benzínu. To mohlo být zapříčiněno samotnou funkcí karburátoru, kdy zvýšený průtok proudícího vzduchu odebíral od volnoběžové trysky více benzínu vlivem navýšení počtu otáček.



---

## 6 ZÁVĚR

Cílem práce bylo porovnat vodíkový motor s konvenčním motorem. Jejich hlavní rozdíly, výhody a nevýhody obou typů motorů. Navrhnout v rámci rešerše technicky možné úpravy existujícího spalovacího motoru. Byla provedena realizace navržených úprav a na jejich základě, byl proveden test takto upraveného motoru. Přesto, že se nepodařilo při testování spustit motor pouze na vodík, což bylo dáno nedostačující výrobou vodíku, podařilo se dokázat, že oba typy motorů nejsou od sebe příliš odlišné.

Automobilky a jejich výzkum vodíkových prototypů je na takové úrovni, kdy se dá říci, že je pouze otázkou hodin, kdy se v reklamních médiích začnou nabízet sériově vyráběná vozidla světových výrobců poháněná vodíkem. Do jisté míry jim můžeme být vděční, za snahu dělat ovzduší čistší s využitím obnovitelných zdrojů. Na druhou stranu si budeme muset ještě počkat na okamžik, kdy začne masivní výstavba infrastruktury a skladovacích kapacit pro tento druh paliva, který tady zatím není, kromě ojedinělých zkušebních stanic.

Nezodpovězenou otázkou také je, jestli bude vodík v automobilech spalován v pístových motorech nebo bude vodík dodávat elektrickou energii elektromotorům z palivových článků, kterým je v současné době kladena velká pozornost. Další otázkou je, kdy se začne s výrobou vodíku v takovém množství, aby pokrylo vzniklou poptávku automobilového průmyslu.

Spalovat vodík není nereálné a určitě by nemělo být odsunuto na odstavňovou kolej, když nám může ještě přinést spoustu příjemných prožitků z charakteristik spalovacího motoru.



## 7 POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] Vodík: Wikipedia otevřená encyklopedie [online]. 10.3.2015 [cit. 2015-04-12]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Vod%C3%ADk>
- [2] Elektrolýza. Webchemie [online]. [cit. 2015-04-12]. Dostupné z: <http://www.webchemie.cz/elektrolyza.html>
- [3] Hytep: Výroba vodíku. [online]. [cit. 2015-04-13]. Dostupné z: <http://www.hytep.cz/cz/vodik/informace-o-vodiku/vyroba-vodiku/491-vyroba-vodiku>
- [4] Petroleum: Výroba vodíku parním reformováním. [online]. [cit. 2015-04-13]. Dostupné z: <http://www.petroleum.cz/zpracovani/zpracovani-ropy-43.aspx>
- [5] Povrcháři. *Www.povrchari.cz* [online]. 2008 [cit. 2015-04-19]. Dostupné z: [http://www.povrchari.cz/kestazeni/200801\\_povrchari.pdf](http://www.povrchari.cz/kestazeni/200801_povrchari.pdf)
- [6] Vodík: vlastnosti, výroba a využití. In: *Web.vscht.cz* [online]. 7. listopadu 2013 [cit. 2015-04-19]. Dostupné z: <http://web.vscht.cz/~nadhernl/projektIV/vodik.html>
- [7] HYTEP: Skladování vodíku I. DLOUHÝ, Petr a Luděk JANÍK. *HYTEP* [online]. 2007, 17.5. [cit. 2015-05-03]. Dostupné z: <http://www.hytep.cz/cz/vodik/informace-o-vodiku/transport-a-skladovani-vodiku/495-skladovani-vodiku-i>
- [8] Skladování vodíku II. DLOUHÝ, Petr a Luděk JANÍK. *HYTEP* [online]. 2007, 29.5. [cit. 2015-05-03]. Dostupné z: <http://www.hytep.cz/cz/vodik/informace-o-vodiku/transport-a-skladovani-vodiku/494-skladovani-vodiku-ii>
- [9] Vodík: Česká asociace technických plynů. 2004. TUČEK, Vít, Ludmila DVOŘÁKOVÁ a Jiří HANZAL. *ČATP* [online]. Praha [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: <http://www.catp.cz/publikace/vodik.pdf>
- [10] HYTEP: Vodík jako úschovna energie. 2015. VLČKOVÁ, Eva. *HYTEP* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://www.hytep.cz/cz/clanky/kategorie-clanku/clanky/587-vodik-jako-uschovna-energie>
- [11] François Isaac de Rivaz: Interna combustion engine. *Wikipedia* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/Fran%C3%A7ois\\_Isaac\\_de\\_Rivaz](http://en.wikipedia.org/wiki/Fran%C3%A7ois_Isaac_de_Rivaz)
- [12] *The Rev. W. Cecil's Engine* [on-line]. Vydáno: 2002 [citováno 2015-05-10]. Dostupné z: <http://www.eng.cam.ac.uk/DesignOffice/projects/cecil/engine.html>
- [13] *The aircraft powerplant* [on-line]. Vydáno: 2006 [citováno 2015-05-10]. Dostupné z: <http://www.free-online-private-pilot-ground-school.com/aircraft-powerplant.html>



- [14] Palivové články. 2007. DLOUHÝ, Petr a Luděk JANÍK. *HYTEP* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://www.hytep.cz/cz/clanky/kategorie-clanku/clanky/410-palivove-clanky>
- [15] Mjauto: Vstřikovací čerpadla. 2015. *MJauto* [online]. [cit. 2015-05-11]. Dostupné z: [http://www.mjauto.cz/newdocs/ferenc/fer\\_mo11/obrazy11.htm](http://www.mjauto.cz/newdocs/ferenc/fer_mo11/obrazy11.htm)
- [16] High-Pressure Direct-Injection Hydrogen Engine Achieves Efficiency of 42%; On Par with Turbodiesels. 2009. *Green car congress* [online]. [cit. 2015-05-11]. Dostupné z: <http://www.greencarcongress.com/2009/03/high-pressure-d.ht>
- [17] 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.2015-05-11]. Dostupný z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V2B497ST9MC2/2/2f20c61d503ba5bbc0084185f16308be>.
- [18] Hydrogen Cars Now: BMW Hydrogen 7. KANTOLA, Kevin. *HydrogenCarsNow* [online]. 2005 [cit. 2015-05-16]. Dostupné z: <http://www.hydrogencarsnow.com/bmw-hydrogen7.htm>
- [19] BLANCO, S. Two Ford hydrogen H2ICE buses arrive at Detroit Metro airport[on-line]. Vydáno: 17.3.2008 [citováno 2015-05-11]. Dostupné z: < <http://www.autobloggreen.com/2008/03/17/two-ford-hydrogen-h2ice-busesarrive-at-detroit-metro-airport/>>
- [20] Automobil Revue: Mazda RE Hydrogen - Jedeme na vodík !. *Automobil Revue* [online]. 2008 [cit. 2015-05-16]. Dostupné z: [http://www.automobilrevue.cz/rubriky/automobily/technika/mazda-re-hydrogen-jedeme-na-vodik\\_32678.html](http://www.automobilrevue.cz/rubriky/automobily/technika/mazda-re-hydrogen-jedeme-na-vodik_32678.html)
- [21] Mazda to Lease Rotary H2ICE, Add Mild Hybrid Support [on-line]. Vydáno:15.10.2004 [citováno 2015-05-16].Dostupné z:[http://www.greencarcongress.com/2004/10/mazda\\_to\\_lease\\_.html](http://www.greencarcongress.com/2004/10/mazda_to_lease_.html)
- [22] Motor Trend: Mazda Gets Clearance to Lease World's First Hydrogen Hybrid Read more: <http://wot.motortrend.com/mazda-gets-clearance-to-lease-worlds-first-hydrogen-hybrid-4277.html#ixzz3aL6UdDue>. *Motor trend* [online]. 2009 [cit. 2015-05-16]. Dostupné z: <http://wot.motortrend.com/mazda-gets-clearance-to-lease-worlds-first-hydrogen-hybrid-4277.html>
- [23] VERHELST, Sebastian a Thomas WALLNER. Hydrogen-fueled internal combustion engines: Progress in Energy and Combustion Science. In: *Hydrogen-fueled internal combustion engines* [online]. 2009 [cit. 2015-05-23]. DOI: doi:10.1016/j.pecs.2009.08.001. ISSN 03601285. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128509000422>
- [24] Galleryhip: Hydrogen Deuterium. *Galleryship* [online]. [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: <http://galleryhip.com/hydrogen-deuterium.html>



- 
- [25] H2 shop: Praktická instalace ve vozidle. *H2 shop* [online]. 2012 [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: <http://www.h2shop.cz/index.php?p=article&id=14>
- [26] Průmyslový zdroj: PSP-600-12. *Mean-Well* [online]. 2011 [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: <http://www.mean-well.cz/napajeci-zdroje/pr-myslove-zdroje/pfc/psp-600/show/psp-600-12>
- [27] Pulzní zdroj: PWM 12V/70A. *H2 shop* [online]. 2015 [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: <http://www.h2shop.cz/index.php?p=h2-shop&skupina=7&articleID=35>
- [28] Auta si budou sama vyrábět vodík, který budou spalovat. VOKÁČ, Luděk. *IDnes* [online]. 2010 [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: [http://auto.idnes.cz/auta-si-budou-sama-vyrabet-vodik-ktery-budou-spalovat-pff-/automoto.aspx?c=A100110\\_235321\\_automoto\\_vok](http://auto.idnes.cz/auta-si-budou-sama-vyrabet-vodik-ktery-budou-spalovat-pff-/automoto.aspx?c=A100110_235321_automoto_vok)





---

## 8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

A/F ratio	Poměr vzduch palivo
amu	Atomová hmotnostní jednotka
CO <sub>x</sub>	Oxid uhlíku
C <sub>x</sub>	Odpor vzduchu
Dual fuel	Spalování dvou paliv
E85	Etanol 75% + benzín 15%
EHG	Electro hydrogen generator
H	Vodík
H <sub>2</sub>	Molekula vodíku
HHO	Hydrogen + Hydrogen + Oxygen
HICE	Hydrogen internal combustion engine
NO <sub>x</sub>	Oxid dusíku
O <sub>2</sub>	Molekula kyslíku
PEM	Palivový článek